Agua subterránea recurso estratégico

Tomo I

Nilda González,
Eduardo E. Kruse,
María Marta Trovatto
y Patricia Laurencena
(Editores)

Edulp
Editorial de la Universidad de La Plata

AGUA SUBTERRÁNEA
RECURSO ESTRATÉGICO

Tomo I

AUTORIDADES HONORARIAS

Dr. Arq. Fernando Tauber. Presidente de la Universidad Nacional de La Plata
D. Daniel O. Scioli. Gobernador de la Provincia de Buenos Aires
Dr. Pablo Bruera. Intendente de la Ciudad de La Plata

COMISIÓN ORGANIZADORA

Presidente: Mario A. HERNÁNDEZ
Vicepresidente: Liliana RASKOVSKY
Secretario: Eduardo KRUSE
Secretario Adjunto: Julio César CASTRO
Tesorero: Eduardo PERURENA
Pro-Tesorero: Carlos F. SCATIZZA
Vocales: Nilda GONZÁLEZ, Luis VIVES, Guillermo BALDELLÓ, Cristina DAPEÑA, María Marta TROVATTO, Patricia LAURENCENA, Mariana GAMBIER

La Comisión Organizadora agradece la eficaz colaboración de la Sra. Graciela Berri en su permanente apoyo a la Secretaría.

COMITÉ CIENTÍFICO

Jerónimo Ainchil
Miguel P. Auge
Mónica Blarasin
A. Guillermo Bonorino
Rodolfo F.García
Fernando López Vera
Eduardo Mariño
Daniel E.Martínez
Josep Mas-Pla
Hector O. Panarello
Raul E. Rivas
Xavier Sanchez Vila
Alfredo Tineo
Ofelia C. Tujchneider

Revisores de trabajos: René Albouy, María del Pilar Álvarez, Guillermo Baudino, Adriana Cabrera, Boris Calvetty Amboni, Eleonora Carol, Jorge Carrica, Emilio Custodio, Mónica D' Elia, Gabriela Garcia, Fernanda Gaspari, Dardo Guaraglia, Luís Guarracino, Ricardo Hirata, Claudio Lexow, Héctor Massone, Edel Matteoda, Marta Paris, Andrea Pasquini, Marcela Pérez, Mauricio Quiroz Londoño, Alejandro Ruíz de Galarreta, Angel Storniolo, Marcelo Varni, Pablo Weinzettel, Erik Zimmermann.

AGUA SUBTERRÁNEA
RECURSO ESTRATÉGICO

Tomo I

Nilda González, Eduardo E. Kruse, María Marta Trovatto
y Patricia Laurencena
(Editores)

Los editores agradecen la valiosa participación y apoyo a su cometido
de la Dra. María del Pilar Álvarez

Habiendo contado los autores con un template para la confección de los trabajos,
no se responsabilizan de los defectos que pudiesen derivar de su uso incorrecto.

Edulp
Editorial
de la Universidad
de La Plata

Temas actuales en hidrología subterránea 2013 / Nilda González ... [et.al.] ; edición literaria a cargo de Nilda González ... [et.al.]. - 1a ed. - La Plata: EDULP, 2013.
450 p. ; 21x15 cm.

ISBN 978-987-1985-03-6

1. Hidrología Subterránea. I. González, Nilda II. González, Nilda, ed. lit.
CDD 551.49

Fecha de catalogación: 06/09/2013

AGUA SUBTERRÁNEA RECURSO ESTRATÉGICO - Tomo I

ISBN : 987-1985-04-5

Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (Edulp)
47 N.° 380 / La Plata B1900AJP / Buenos Aires, Argentina
+54 221 427 3992 / 427 4898
editorial@editorial.unlp.edu.ar
www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias (REUN)

Primera edición, 2013

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723
©2013 - Edulp
Impreso en Argentina

ÍNDICE

PRÓLOGO 11
Mario A. Hernández

HIDRODINÁMICA E HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

Estimación de la recarga en zonas áridas según distintos métodos. Área medanosa del Sur de Península Valdés 15
María del Pilar Alvarez, Mario Alberto Hernández, María Marta Trovatto, Nilda González

Recarga artificial en Bajos Submeridionales 23
D. Sosa; E. Diaz, M. Venencio; H Picatto;, M. Genesio, E.Vergini, M. Basan, R. Tosolini, A. Lahitte, María I. Parodi, L. Sánchez, P. Firman,G. Oprandi, F. Colombo, F. Rotela, L. Monzón

Estimación de la recarga al acuífero del Azul: 1. Análisis de las características climáticas 31
Marcelo Varni y Emilio Custodio

Estimación de la recarga al acuífero del Azul: 2. Balances de agua en el suelo y de deposición atmosférica de cloruro 38
Marcelo Varni y Emilio Custodio

Aproximación de volúmenes de agua subterránea disponibles para riego en las cuencas de los ríos Areco y Arrecifes (Buenos Aires) 46
Mario A. Hernández, Nilda González, Pablo Romanazzi, M. Marta Trovatto, Claudia Solero, J. Horacio Ceci y M. del P. Alvarez

Tipificación de la dinámica del nivel freático en áreas medanosas del noreste de La Pampa, Argentina 52
Eduardo E. Mariño

Funcionamiento del sistema hidrogeológico en el área del Sector Industrial Planificado de la localidad de Tornquist (Buenos Aires, Argentina) 58
Claudio Lexow, René Albouy, Jorge Carrica y Daniela Lafont

Dinámica freática de la llanura aluvial en los alrededores de la ciudad de Neuquén, Argentina 66
Patricia Laurencena, Eduardo Kruse y Marta Deluchi

El rol de la evapotranspiración en la geohidrología del humedal de la Planicie Costera de Ajó (provincia de Buenos Aires) 72
Eleonora Carol, Eduardo Kruse, Federica Braga y Luigi Tosi

Evaluación del comportamiento del acuífero del Alto Valle de Río Negro para control de heladas en un distrito de riego 78
Gabriela Polla, Javier Pavese, Maite Elissalde y Federico Horne

Evidencias hidrodinámicas de explotación intensiva en cuencas del Noreste de la provincia de Buenos Aires 84
María Marta Trovatto, María del Pilar Álvarez, Nilda González y Mario Alberto Hernández

Relación entre acuíferos y lagunas del noreste de La Pampa, Argentina, desde una perspectiva hidrológica ambiental 92
Carla Moscardi y Carlos Schulz

Relación entre el agua superficial y subterránea en la cuenca del Arroyo Buriñigo (Buenos Aires, Argentina) 100
Francisco Cellone, Lucía Gomez, Federico Vera y Eleonora Carol

Reseña geológica-técnica de la perforación Villa Elisa-2 Entre Ríos 106
Julio Benítez y Daniel Mársico

Características hidrolitológicas de las formaciones Patagonia y Santa Cruz. Cuenca del Golfo San Jorge. (Provincias de Chubut y Santa Cruz) 112
Lisandro Hernández y Mario A. Hernández

Contribución al conocimiento de la hidrogeología de las cuencas intraandinas del N de Chile 118
Orlando Acosta, Jordi Guimerà, Emilio Custodio, Isabel Ansón y José Luis Delgado

Caracterización hidrogeológica en tres áreas medanosas en el nordeste de La Pampa, Argentina 126
Eduardo Castro, Carlos J. Schulz, Eduardo E. Mariño, María Emilia Ughetti, Lorena Ceballo y Nayla M. Massara

O Sistema Aquífero Tikuna: o aquífero Cretáceo da Bacia Amazônica 132
Fátima Ferreira do Rosário, Emilio Custodio, Gerson Cardoso da Silva Jr.

El Complejo Acuífero Profundo de Arauco, provincia de La Rioja 140
Esteban Tálamo, Federico Moya Ruíz, Rodolfo García, Verónica Rocha Fasola y Francisco R. López

Acuíferos terciarios y cuaternarios. Provincia de Entre Ríos. República Argentina 148
María Santi, Guillermo Bianchi y Graciela Rezzónico

Avance en el conocimiento hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en el sector sur 156
Leticia Rodríguez, Pablo Gamazo, Andrés Mira, Juan Nittmann, Julián Ramos, Luis Vives, Jorge Santa Cruz, Jorge de los Santos y Gerardo Veroslavsky

Investigaciones Hidrogeológicas Acuífero El Zapallal (Perú) 164
José Bolzicco, Juan García, Raul Ortiz, Alex Ludeña, Maritza Jurado, Guillermo Diaz, Fernando Estrada, Felipe Huerta

Estudio Hidrogeológico en la Cuenca Abaucán - Colorado - Salado. Catamarca, Argentina 170
Carlos A. J. Torres, Norberto G. Bucich, Ernesto García Perón, Rubén N. Gianni y Patricia S. Luna

Caracterización hidrogeológica de la ciudad de Río Tercero y entorno rural, Córdoba 178
David Palacio, Mario Aguirre y Héctor Frontera

Caracterización de los principales acuíferos de la provincia de Entre Ríos 186
María Santi, Guillermo Bianchi y Graciela Rezzónico

Estudio de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca del río de la Flecha, Departamento Sarmiento, San Juan 194
Gerardo Salvioli, Silvia Meriday Dante Salvioli

Actualización del modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní y la influencia geológica en el sector argentino 202
Andrés Mira, Leticia Rodríguez, Gerardo Veroslavsky y Luis Vives

Caracterización hidrogeológica del acuífero freático en el entorno de la Laguna Moreno, localidad de Pico Truncado, Provincia de Santa Cruz 210
Hugo Gabriel Paoletti, Fernando Leopoldo Perera, Maria Soledad Ruiz, Patricio Agustín Hernandez, Alejandro Castilla, Sebastian Martino, Leonardo Pierrard

El relieve y su incidencia en el hallazgo de agua para abastecimiento humano en la Planicie Medanosa Sudoriental cordobesa 218
Blarasin Mónica, Adriana Cabrera, Fátima Bécher Quinodóz, Juan Felizzia y Jesica Giuliano Albo

Análisis del funcionamiento del sistema hídrico subterráneo en el área del Antiguo

Relleno Sanitario de Navarro (Santiago de Cali, Colombia) 226
John Jairo Márquez Molina y Marcela Pérez

Análisis de Sensibilidad Ambiental en sistemas acuíferos fisurados de la cuenca del río Santa Lucía, Uruguay 234
Jorge Montaño, Mario Hernandez, María del Carmen Alvez, Mauricio Montaño, Alvaro Califra y Marcos Bonjour

Construcción de pozos para extracción de agua mediante pala barreno en el Chaco Salteño 240
Guillermo Baudino, Franklin Gomez Godoy, Hugo Meri y Gabriela Pitzzú

Características hidrogeomorfológicas del humedal costero de Atalaya (Argentina) 246
Melo Marisol, Carol Eleonora, Laurencena Patricia, Deluchi Marta

Heterogeneidades hidrogeológicas de la Cuenca inferior del Río Uruguay 250
Marcos Bonjour, Jorge Montaño y Mario Hernández

GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Régimen de dominio de las aguas subterráneas y consecuencias para su gestión, protección, tutela y aprovechamiento 259
Leonardo F. Pastorino, María de las Nieves Cenicacelaya y Alfredo G. Diloreto

Gestión del agua subterránea en el centro-este de La Pampa: una propuesta de actuación ante factores de incertidumbre hidrológica 267
Carlos Schulz, Eduardo Mariño, Pablo Dornes, Eduardo Castro y Cristina Dapeña

Diagnóstico ambiental aplicado ao manejo e gestão da microbacia do Córrego Monjolo, Chapada Guimarães, Mato Grosso, Brasil 275
Mileny Batista de Souza, Prudêncio Rodrigues de Castro y Alteredo Oliveira Cutrim

Metodología de determinación de estrés hídrico en zonas semiáridas como ayuda a la toma de decisiones 283
Damián Córdoba, Juan F. Gallardo y Sonia Amaro

Problemática del agua en el noroeste bonaerense. Experiencia de gestión comunitaria en una población pequeña 291
Eleonora Moschione, Emilia Bocanegra, Guillermo Casanova, Santiago Leiva, Patricio Picco

Agua subterránea y sociedad en regiones áridas. Caso de estudio Algarrobo del Águila, La Pampa, Argentina 299
Eleonore Ploil, Carlos J. Schulz y Matalón Patricia

Evaluación del agua subterránea y transformaciones territoriales en María Ignacia-Vela (Buenos Aires, Argentina) 306
Corina I. Rodriguez, Adriana Díaz, Guillermina Jacinto, Anahí Tabera, Bárbara Pessolano, Alejandro Ruiz de Galarreta

Planificación de perforaciones y estudios hidrogeológicos en la provincia del Chubut 314
Érico H. Bianchi

Indicadores de sustentabilidad de los recursos hídricos subterráneos en el área central de la provincia de Santa Fe, Argentina 322
Ofelia Tujchneider, Marcela Perez, Marta Paris, Mónica D'Elía, Silvina Gualini y Verónica Musacchio

Caracterización de la sostenibilidad socio-productiva y ambiental en áreas representativas de la cuenca del río Carcarañá, en el sur de la provincia de Santa Fe 330
Julio Castellarín, Julio Sánchez, Luis Herrera, Francisco Casiello, María del Valle Venencio y Juan Carlos Papa

Perímetros de protección de pozos: marco legal para su implementación en Argentina 334
Viviana Rodriguez, Carlos G. Paoli y Marta Paris

La calidad del agua subterránea como parte importante de su gobernanza 340
Emilio Custodio

PRÓLOGO

Los libros “Agua subterránea recurso estratégico“ y “Temas actuales sobre la Hidrología subterránea 2013” contienen, a modo de capítulos, las contribuciones evaluadas y presentadas al VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas actuales de la Hidrología Subterránea, llevado a cabo en la ciudad de La Plata entre los días 17 y 20 de Septiembre de 2013, organizado por el Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GA) y la Universidad Nacional de La Plata.

A partir de su primer edición (Bahía Banca, 1997), el Congreso ha mantenido una regularidad bianual que le confiere ya el carácter de tradicional, con cada vez mayor cantidad de trabajos y de participantes, más variada temática específica y nutrida concurrencia de hidrogeólogos provenientes de otros países, fundamentalmente de América Latina y España.

La ciudad anfitriona tiene una entrañable ligazón con las aguas subterráneas, ya que se constituyeron en un factor decisivo para su emplazamiento. Planificada para ser capital de la Provincia de Buenos Aires, el mensaje elevado a la Honorable Asamblea Legislativa el 14 de mayo de 1882 por su ilustre fundador, Dr. Dardo Rocha reza: “*El lugar elegido ofrece las conveniencias necesarias para el establecimiento de una ciudad populosa, es suficientemente elevado e higiénico y tiene agua abundante para satisfacer sus necesidades, para lo cual puede proveerse del río de la Plata o de una napa de agua subterránea de excelente calidad que hay a unos cuarenta metros de profundidad…*”.

Fue la primera ciudad del país en utilizar para su abastecimiento por red el agua subterránea, sobre un proyecto de los ingenieros Lavalle y Médici, inaugurado a poco tiempo de la fundación. Hasta 1955 cuando se habilita la Planta potabilizadora de agua del río, se abasteció exclusivamente del recurso subterráneo, excediendo ya entonces la planta urbana.

También la Universidad Nacional participa en la importancia de la hidrogeología, ya que aloja a una verdadera escuela en su Facultad de Ciencias Naturales y Museo, una de las pioneras en incluir su enseñanza dentro de las carreras de Geología en Argentina. Actualmente reúne el mayor número de profesionales especializados del País, contando los que se desempeñan en la Universidad, numerosos organismos públicos, empresas privadas, consultoría individual y actividades relacionadas (Poder Judicial, asesoramientos industriales, proyectos de riego, protección ambiental y otros).

Los trabajos publicados en estos libros, que cuantitativamente constituyen un record para los Congresos AIH-GA, marcan de una u otra forma un paso más hacia el desarrollo de la hidrogeología en los países iberoamericanos y en particular de Argentina, con la adquisición de nuevos conocimientos y la aplicación de metodologías que exceden su propio campo.

Es perceptible también la vinculación con otras actividades del medio productivo, como la minería, producción de hidrocarburos, agricultura bajo riego, y su creciente participación en las cuestiones ambientales de los ámbitos urbano y rural.

Se marca así la vocación de los hidrogeólogos para desempeñarse en espacios que años atrás no eran considerados como propios y que paulatinamente van ocupando, especialmente las nuevas generaciones, con buenos resultados sin duda a juzgar por la diversidad de enfoques expuestos.

Un vehículo idóneo y prestigioso para la difusión de las contribuciones ha sido la Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), que desde 1987 está al servicio de la cultura y la difusión del conocimiento, excediendo la cobertura de producciones académicas de la propia Universidad al transformarse ya en un emblema para Latinoamérica.

Si la información aquí contenida puede resultar de utilidad al medio científico y profesional que participa de la disciplina Hidrología Subterránea, y a quiénes utilizan sus contenidos, el Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos habrá de considerarse muy satisfecho y alentado para una continua mejora y mayor acercamiento entre colegas, que seguramente se manifestará en las próximas ediciones del Congreso.

Mario A. Hernández

HIDRODINÁMICA E HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

Estimación de la recarga en zonas áridas según distintos métodos. Área medanosa del Sur de Península Valdés

María del Pilar Alvarez[1], Mario Alberto Hernández[1], María Marta Trovatto[1], Nilda González[1]

[1] Cátedra de Hidrogeología. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Av. 60 y 122, (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Mail de contacto: alvarez.maria@conicet.gov.ar

RESUMEN

La Península Valdés, ubicada en el noreste de la Patagonia extrandina, se desarrolla bajo clima árido y carece de cursos de agua permanente. El objetivo principal de este estudio es estimar la recarga del acuífero local para su captación. La metodología utilizada consistió en la resolución del balance hídrico de paso diario, la estimación a través de la fluctuación de niveles y el balance del ion cloruro. Los resultados obtenidos indican que el porcentaje de agua de lluvia que alcanza al acuífero es del orden del 10 % según la metodología del balance, entre 9 % y 16 % en relación a la fluctuación de niveles, y del 4,5 % en base al método de los cloruros. Teniendo en cuenta las limitaciones de cada uno de ellos se concluye que el agua de recarga representa el 10 % de la precipitación local.

Palabras clave: Recarga; Zonas áridas; Médanos; Patagonia Extrandina

ABSTRACT

The Península Valdés, in northeastern Extra-Andean Patagonia, is characterized by its arid climate and the lack of perennial watercourses. The main objective of this study is to estimate the local aquifer recharge for its exploitation. The methodology consists in the use of three methods: daily time-step soil water balance, water-table fluctuation and chloride mass balance. The results obtained show that the precipitation percentage that reaches the aquifer is approximately 10% according to the water balance method, between 9% and 16% for the water table fluctuation method and 4.5% based on the chloride mass balance. Taking into account the limitations of each method, it can be concluded that groundwater recharge represents 10% of the local precipitations.

Keywords: Recharge; Arid zones; Dunes; Extra-andean Patagonia

Introducción

Una de las principales limitantes para el desarrollo socioeconómico de las regiones áridas, es la escase**z** de agua disponible en cantidad y calidad, principalmente en aquellas zonas donde el recurso hídrico superficial está ausente, teniéndose que recurrir al subterráneo. En esos casos, una vez reconocidos conceptualmente los mecanismos actuantes, la recarga del sistema acuífero se convierte en el insumo más importante y a la vez más difícil de cuantificar (Scanlon et al., 2010; Timms, 2012; de Vries y Simmers, 2002; Hernández et al., 2009; Herczeg y Leaney, 2011, Alcalá et al. 2012). Un buen método de estimación de entrada de agua al acuífero debe contabilizar todos los componentes del balance hidrológico, contemplar los procesos y mecanismos de la recarga, tener bajos errores asociados y no ser sensible a parámetros difíciles de estimar o medir (Lerner et al., 1990). Se sabe a su vez que, las principales causas de error son la adopción de modelos conceptuales incorrectos e inobservancia de la variabilidad espacial y temporal de los factores involucrados en el proceso (Simmers, 1997).

Los métodos más comúnmente utilizados para estimar la recarga en zonas áridas son los balances hidrológicos, análisis de fluctuaciones de los niveles freáticos, cuantificación de la perdida de caudal de cursos influentes, modelos numéricos y balance de masa de ión cloruro. Cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas, las que no solo dependerán del método propiamente dicho, sino de las características hidrogeológicas del medio en donde se aplican. Es por ello que en general es aconsejable utilizar más de un método en la estimación de la recarga, de modo de poder compara los resultados y validarlos con observaciones de campo, siendo este aspecto al que apunta la presente investigación destinada a evaluar la recarga del acuífero

productivo de Península Valdés, para la captación con destino a proveer agua a Puerto Pirámides.

La inquietud parte del interés del gobierno provincial en verificar la sustentabilidad del aprovechamiento pretendido, habida cuenta de las particularidades climáticas de la zona, condicionantes de la presencia del recurso hídrico subterráneo en calidad y cantidad suficiente.

Metodología y área de estudio

El área seleccionada para el alcance de los resultados es de aproximadamente 7 km^2, localizada en el sector central de la Península Valdés al Suroeste de la Salina Grande (Figura 1).

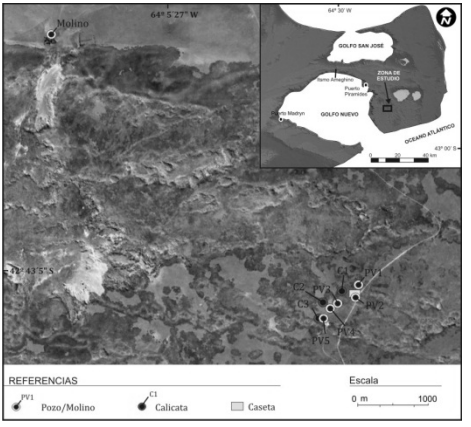


Figura 1. Área de estudio

Para cumplir con el objetivo, debió instalarse instrumental específico de registro, practicar calicatas para la toma de muestras de suelo y mantener un monitoreo de medición y muestreo durante el año abarcado por el estudio.

El sitio de monitoreo cuenta con una estación meteorológica programada para registrar cada dos horas precipitación acumulada, temperatura, velocidad y dirección del viento, un dispositivo de registro continuo de nivel piezométrico instalado en una de las 6 perforaciones preexistentes (PV5), programado para realizar cuatro lecturas diarias, y un colector de lluvias.

En el mismo predio se realizaron tres calicatas, seleccionándose la ubicación en función de los cambios de vegetación, a los fines de obtener las muestras necesarias para el cálculo de la textura y capacidad de campo (insumo del balance hídrico a nivel del suelo). En ellas se extrajeron muestras, a los 10 cm, 50 cm y 100 cm de profundidad y se identificaron "*in situ*" color, humedad, granulometría, estructura, grado de consolidación, presencia raíces y tipo de límite entre los diferentes horizontes.

La caracterización hidrometeorológica regional se efectuó en base a registros seriados diarios de precipitación y temperatura de la estación meteorológica del Centro Nacional Patagónico (CENPAT para el período 1982 - 2011) y a los de precipitación acumulada mensual de la Estancia La Adela (1912 - 2006), localizada en las inmediaciones de Puerto Pirámides.

El balance se calculó con el software Balshort v.3, sobre un lapso de 30 años y el insumo ETP con el método Thorntwaite-Mather (1957).

Resultados

Caracterización general de las precipitaciones

Con los datos pluviométricos de las dos estaciones se construyó un pluviograma integrado (Figura 2) para caracterizar regionalmente el fenómeno. Resalta la alta variabilidad interanual de las precipitaciones medias anuales, factor común a ambas estaciones y característico de regiones áridas. Hay que notar que si bien la fluctuación es alta, el comportamiento comparativo entre estaciones es relativamente homogéneo.

La media anual de precipitaciones se posiciona en 234,4 mm para el período 1912 a 2006 (Ea. La Adela), y en 217 mm para el período 1982 a 2011 (CENPAT). Puntualmente, el total anual acumulado para 2011 por la estación instalada es de 193 mm. Es importante destacar la gran variabilidad en los valores medios anuales en ambas series, típica de regímenes áridos donde un efecto de tormenta puede alterar marcadamente el monto anual esperado. La franja de valores más frecuentes observable en la grafica se desarrolla entre los 100 mm/año y los 300 mm/año.

Con la intención de suavizar las variaciones puntuales y analizar si existe una tendencia histórica, se incorporó al pluviograma la curva de promedios móviles (para lapsos decenales) donde se puede observar (Figura 2) que no hay una tendencia uniforme para todo el periodo, sino que en general se reconocen periodos húmedos o secos, alternantes a lo largo de la serie, aunque con inclinación descendente hacia fines del período.

Interesa resaltar de este análisis la ocurrencia de periodos donde los valores de precipitación se mantuvieron por encima de la

media histórica, en los cuales las probabilidades puntuales de infiltración serían mayores.

De todas formas, es necesario introducir el concepto de precipitación efectiva como aquella que supera el umbral de intercepción vegetal y "mojado" del suelo. Para Patagonia extrandina y de acuerdo con Hernández et al. (2002), estarían en el orden de los 5 mm diarios.

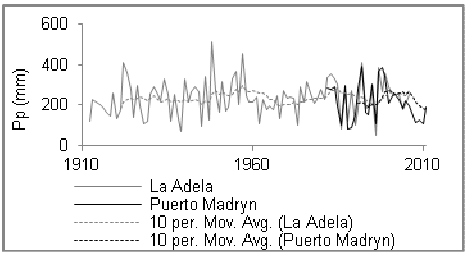


Figura 2 Pluviograma integrado de las estaciones CENPAT y Ea. La Adela

Caracterización hidrológica subterránea

Hidrogeología

En base a información antecedente (Alvarez, 2010), se conoce que el sistema geohidrológico regional está conformado por:

- una Zona No Saturada (ZNS) correspondiente a los depósitos cuaternarios (predominantemente arenas, gravas y limos) y según la posición topográfica, parte de los terciarios,
- un acuífero freático contenido, según la posición espacial, en estos mismos depósitos o exclusivamente en arenas de la *Formación Puerto Madryn*, (explotado fundamentalmente en la región),
- uno o más acuíferos semiconfinados/ confinados, limitados por estratos arcillosos o limo-arcillosos en la misma formación o en la *Formación Gaiman* infrayacente (acuitardos/ acuícludos),
- Un hidroapoyo dado por el potente espesor de sedimentos con características acuícludas de la infrayacente *F. Gaiman*.

La descripción hidrogeológica local, se presenta en base a los registros de los sondeos existentes en el área (PV1 a PV5), de los cuales se cuenta con interpretación gráfica del cutting de perforación. Las perforaciones alcanzan entre 70 y 90 metros de profundidad y se encuentran distribuidas en un radio menor a 0,5 km. Dada la proximidad entre sondeos y similitud de sus perfiles, se ha decidido describirlos de manera integrada.

La columna general comienza con un nivel arenoso, en la mayoría de los casos interrumpido por una capa de rodados dentro de los primeros 5 metros. Continúa con estratos de arenas, tobas y arcillas típicas de la *Fm. Puerto Madryn*. Aproximadamente a los 50 m aparece el primer nivel acuífero productivo, constituido por una intercalación de tobas arcillosas y arenas. Luego continúa una secuencia de arcillas con algunas intercalaciones de tobas arcillosas hasta alcanzar después de los 65 m (en uno de los sondeos después de los 75 m), el segundo nivel acuífero. Los registros de las perforaciones finalizan por debajo de este último, luego de atravesar entre 2 y 3 metros de arcillas.

Hidrodinámica

Con respecto a las características hidrodinámicas regionales, el fenómeno de recarga se reconoce a partir de la configuración de la red de flujo (Alvarez et al., 2010) y de las características físicas de la comarca, identificándose un tipo de recarga autóctona directa (infiltración del agua de lluvias que cae en la región) para el acuífero freático y una autóctona indirecta, por percolación a través del mismo, para los niveles acuíferos inferiores. Se la localiza principalmente en la porción Sur de la Península, en coincidencia con una de las divisorias subterráneas. Ese sector esta caracterizado geomorfológicamente por la presencia de grandes médanos y mantos medanosos, unidades que indican condiciones favorables para la infiltración efectiva/recarga.

La descarga del sistema se produce regionalmente sobre el perímetro de la Península y de modo local en las inmediaciones de las Salinas Grande, Chica y gran Salitral.

El área bajo estudio se encuentra sobre el ámbito principal de recarga, donde el flujo subterráneo es esencialmente de tipo vertical descendente. La importancia de identificar la dirección y sentido del flujo radica en que, al momento de analizar el origen de la recarga, debe identificarse si existe o no afluencia subterránea.

Dadas las condiciones descriptas, en este caso el ingreso lateral de agua subterránea sería despreciable, tomándose por lo tanto como único, el procedente de la infiltración del agua de lluvias.

Estimación de la recarga

Balance hídrico local

El balance hidrológico sigue siendo el método más difundido y utilizado como estimador. No obstante, hay que aclarar que los balances atmosféricos modulares anuales o mensuales en estas regiones, no tienen sentido real ya que resultan siempre deficitarios, puesto que la evapotranspiración potencial siempre superará a la precipitación y no existirían, por lo tanto, excesos atribuibles a una potencial recarga (Carrica, 2009). Pero ocurre que durante un evento importante de tormenta, el valor de evapotranspiración puede ser superado, existiendo en ese momento un exceso hídrico.

Es por ello que el balance hídrico a nivel del suelo se realizó de modo seriado diario, y para que el valor de recarga calculado fuese representativo se optó por efectuarlo para un lapso de 30 años (1982-2011).

Se utilizó el sotware Balshort v.3 (Carrica, 1993), cuyos insumos son precipitaciones acumuladas diarias (Ppdía), textura del suelo (Tx), capacidad de campo (Cc) y evapotranspiración potencial mensual (ETP).

Los registros de Ppdía corresponden a la estación meteorológica CENPAT, no obstante lo cual, para el año 2011 se manejaron datos de la estación meteorológica instalada en el área de estudio. Cabe aclarar que las precipitaciones utilizadas fueron las consideradas "efectivas", iguales o mayores a 5 mm (precipitación calificada).

El insumo ETP se calculó con el método Thorntwaite Mather (1957).

Tx y Cc corresponden a determinaciones en laboratorio sobre muestras extraídas de las tres calicatas. De los resultados se tomó el valor promedio para capacidad de campo (37 mm) y la textura más representativa (arenosa).

Los resultados del balance de paso diario se sintetizan de manera anual en la Tabla 1.

Es posible advertir la gran variabilidad existente entre los excesos obtenidos para los diferentes años, lo que se explica como se mencionara al tratar las precipitaciones, por el efecto que tiene un evento de tormenta sobre una media anual baja.

Es por tal razón que el fenómeno de recarga ocurre sólo durante eventos puntuales y se manifiesta de manera irregular a lo largo de todo el lapso considerado, fluctuando entre valores nulos y mayores a 200 mm. El promedio de los excesos del lapso 1982-2011 alcanza los 32 mm, que expresado como porcentaje del promedio anual histórico de precipitaciones (217 mm), representa el 14,7 %, pero si se descartan los dos años con tormentas extremas (1992 y 1998), se tiene que los excesos alcanzan los 22 mm anuales, lo que resultaría en una recarga de aproximadamente el 10%.

Es importante mencionar que para los últimos 5 años se registran excesos solamente en 2011, donde sobre una precipitación calificada de 143 mm, ingresarían potencialmente 13,2 mm, representando una recarga del 9 % respecto de las lluvias calificadas y de 6,3 % mm de las totales de dicho año. Este último valor se considera más real y representativo, por lo tanto será considerado al momento de evaluar la comparación de resultados según las diferentes metodologías.

Tabla 1: Síntesis anual de los resultados diarios del balance hídrico a nivel del suelo.

Año	*Pp calificada*	*EVTR*	*Exc*
1982	236	159,8	76,2
1983	219	159,2	59,8
1984	208	208	21,1
1985	149	109,1	40,3
1986	61	58,3	0
1987	261	197,3	66,4
1988	50	50	0
1989	61	61	0
1990	108	105,5	2,5
1991	229	168,5	57,9
1992	337	209,8	128,9
1993	118	118	0
1994	92	91,3	0
1995	257	205,7	49,6
1996	86	86	0
1997	281	219,1	58,6
1998	346	131,6	217,8
1999	287	247,7	38,5
2000	131	126,8	5
2001	181	164,1	16,9
2002	170	138,7	27,7
2003	127	126,3	4,3
2004	146	137,8	8,2
2005	150	92,9	25,2
2006	129	113,6	47,4
2007	91	90,9	0
2008	69	69	0
2009	71	70,3	0
2010	54	54	0
2011	143	129,7	13,2
Promedio	162	130	32

Estimación de recarga por fluctuación de niveles de agua subterránea

El método se basa en la premisa de que el ascenso de niveles en un acuífero libre es debido a la llegada del agua grávica al nivel freático. Puede usarse bajo cualquier condición climática, indicado principalmente para acuíferos someros con respuestas rápidas. Si bien en este caso no es somero y es esperable que la respuesta sea diferida, se considerará dicho aspecto al momento de interpretar los resultados.

La recarga se calcula en base a la siguiente ecuación (Scanlon et al., 2002):

$$R = Sy * \Delta h / \Delta t$$

Sy: rendimiento específico (porosidad efectiva)

Δh/Δt: ascenso del nivel freático en un tiempo determinado

El valor de Sy se obtuvo de tablas que lo estiman en función de la litología y/o granulometría. Los sedimentos que conforman el acuífero objeto se incluyen dentro de la clasificación de Sanders (1998) en la categoría "arenas finas a arenas limosas" correspondiéndoles el rango de 10 a 28 % de porosidad efectiva. Por otro lado Custodio y Llamas (2001) proponen 18 % para gravas y arenas con algunos limos y 15 % para limos con arenas muy finas.

Dado que la *Formación Puerto Madryn* presenta variaciones faciales evidentes, es esperable que se reflejen en valores dispares de la porosidad efectiva, por lo cual se decidió considerar un valor medio situado entre los dos más bajos propuestos por los mencionados autores, resultando en tal sentido en una porosidad efectiva de 12,5 %.

El valor Δh se calculó entre el máximo y el mínimo registrado por el Diver instalado en PV5.

Los datos obtenidos indican una fluctuación de 280 mm, que multiplicada por la porosidad efectiva (0,125) da un valor de altura de lámina de agua de 35 mm. Esto representaría aproximadamente el 16 % de las precipitaciones medias históricas (219 mm) y si se consideraran solo las lluvias caídas durante el lapso 2010-2011 (193 mm), la recarga resultaría 18 % de las precipitaciones.

Teniendo en cuenta lo expuesto al presentar el método, cabe contrastar la respuesta de los niveles con las lluvias, tal como puede observarse en la grafica de la Figura 3. Es posible advertir que no existe un correlato claro entre los picos de precipitación y los ascensos potenciométricos, interpretándose que existe un lógico desfasaje entre los eventos de lluvias mayores a 10 mm y las elevaciones del nivel del agua subterránea.

A modo de obtener un valor mínimo o más conservador, se tomó el año de precipitaciones extremas (387 mm en 1998) observándose que la recarga disminuye al 9 %.

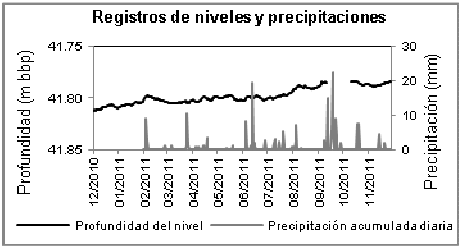


Figura 3. Registro de la fluctuación de niveles y precipitaciones acumuladas diarias.

Balance de cloruros

El balance de cloruros es un método hidroquímico que permite establecer el porcentaje de las precipitaciones que alcanza el acuífero, mediante el contraste del contenido de cloruros en agua subterránea respecto al de la lluvia. Constituye una herramienta que se ha utilizado para cuantificar la infiltración eficaz en diferentes ambientes, tanto geomorfológicos como climáticos (Bonorino, 1991; Varni et al., 1996; Bonorino y Torrente, 1992; Malán et al., 1993, 1997; Custodio, 2010; Alcalá et al., 2012) comprobándose su buena correspondencia con otras metodologías.

Se basa en que el balance de cloruro en el terreno a largo plazo (sin variación del almacenamiento en el perfil del terreno) y sin otras fuentes de cloruro, naturales o antrópicas, en condiciones climáticas estables, según Custodio (2009), es:

$$A = R * Cl_R - ES * Cl_{ES}$$

A: Deposición atmosférica

R: Recarga

Cl_R: Concentración de Cl del agua de recarga

ES: escorrentía superficial

Cl_{ES}: Concentración de Cl del agua de escorrentía superficial

En terreno llano, en especial bajo climas semiáridos, suele ocurrir que el último término es pequeño y puede despreciarse (Custodio, 2009).

El método arroja buenos resultados cuando se dispone de registros extensos de deposición atmosférica (obtenida con totalizadores que recojan la deposición húmeda con la lluvia y la seca) y cuando el agua muestreada proviene de la porción superior del acuífero freático.

Para desarrollar este análisis se aplicó el concepto de Factor de Enriquecimiento en Cloruros (FEC) de acuerdo a Mercado et al. 1977, en Rosenthal, 1987, tal que:

$$FEC = {}^{Clas}/_{Clp}$$

Clas: concentración de cloruros en el agua subterránea (mg/l)
Clp: concentración de cloruros en el agua de lluvia (mg/l)

En zonas con escurrimiento superficial poco significativo (tal el caso de la zona medanosa en la Península), la inversa de este valor representa el coeficiente de infiltración eficaz, como fuera propuesto por Schöeller (1962).

Para el área de estudio se utilizaron valores de Clp, obtenidos del análisis de muestras tomadas del colector de lluvias, optándose para el cálculo por el valor medio de una serie de 3 muestras del lapso 2010-2011 (22,75 mg/l).

Las determinaciones de Clas, se hicieron sobre muestras del molino (único pozo suficientemente somero para que el balance hidroquímico tenga sentido), cuyo contenido medio es de 496 mg/l.

Tanto las concentraciones de cloruros en agua de lluvia como en subterránea corresponden a valores medios de registros muy cortos, como para ser considerados característicos de área, especialmente el asociado a las precipitaciones (Clp).

No obstante, dado que son los únicos datos disponibles en la región, el cálculo de la recarga por medio del balance de cloruros será considerado como una herramienta de contraste de los otros métodos.

En base a la fórmula anteriormente presentada, se calculó un factor de enriquecimiento de 21,8, por lo cual el coeficiente de infiltración resultante es de 0,045, o bien la recarga representa el 4,5 % de las precipitaciones. Es importante advertir que la recarga estimada por este método está en el orden de magnitud de la obtenida por del balance del suelo para el mismo período.

Discusión

En base a los diferentes métodos aplicados, se hará a continuación una valoración de los resultados obtenidos por cada uno de ellos (Tabla 2).

En primera instancia es posible advertir una coherencia a nivel general encontrándose los extremos en un rango de 15 % - 4 %, lo cual habla de la validez de las técnicas aplicadas. No obstante se deben aclarar determinados aspectos de cada una de ellas que permitirán acotar el rango.

Tabla 2. Síntesis de la estimación de la recarga por los diferentes métodos.

Método	***Porcentaje de recarga respecto de la precipitación***
Balance hídrico local	Promedio histórico: 14,7 % Depurado (sin tormentas): 10% Año 2011: 6,3 % Año 2011: 18 %
Fluctuación de niveles	Promedio histórico: 16% Máximo de precipitación: 9 %
Balance de cloruros	Año 2011: 4,5 %

En el caso del balance hídrico local, es necesario indicar:

1. Se espera que el método en general arroje valores menores que los reales puesto que el cálculo de evapotranspiración incluido en el balance fue diseñado para zonas húmedas con mayor cobertura vegetal y además no tiene en cuenta mecanismos que faciliten la recarga en zonas áridas (Hernández et. al. 2002, 2009) tales como "reducción de las pérdidas consuntivas" (modificaciones de la vegetación que disminuyen la evapotranspiración) o "infiltración rápida" (suelo con alta permeabilidad) que se encuentran presentes en el área.

2. Los años con tormentas en el lapso 1982-2011 están desviando notablemente los resultados, puesto que sin duda en esos momentos ocurre el fenómeno de recarga, debiendo ser considerados como excepcionales por la baja recurrencia que tienen dentro del

registro histórico, de modo de no sobreestimar el ingreso.

En base a lo antedicho, se desestimarán el valor mínimo de 6,3 % y el máximo de 14,7 % quedando como porcentaje de recarga referencial obtenido bajo esta metodología el de 10 %.

Con relación al método de la fluctuación de niveles, la principal crítica es como se mencionara, la profundidad a la que se encuentra el nivel del agua subterránea, por lo que no sería posible asignar las fluctuaciones medidas a eventos de precipitación puntuales.

Existe un margen de error que se intentará disminuir, considerando el promedio histórico de precipitaciones y teniendo como referencia que el ingreso mínimo ocurriría si se asigna la fluctuación máxima medida a la precipitación anual extrema dentro del periodo (año 1998). De este modo, la recarga sería mayor a 9 % y cercana a 16 %.

Por su parte, el balance de cloruros, usado en este caso como contraste, dada la limitación debida al corto período monitoreado, indica una recarga de 4,5%, en el orden de magnitud de las obtenidas por los otros dos métodos.

Hechas todas las aclaraciones, se toma como recarga referencial del área la procedente del promedio de los porcentajes seleccionados de cada metodología, resultando en el 10 % de la precipitación local. Cabe aclarar que para otros sectores de Patagonia extraandina, análisis agronómicos del flujo del agua en el suelo indicaron, una "pérdida de agua por percolación" (termino equiparable al de recarga), del 10% de las precipitaciones (Paruello y Sala 1995).

Conclusiones

El área de estudio se encuentra sobre el ámbito principal de la recarga regional, donde el flujo subterráneo es esencialmente vertical descendente, siendo el único ingreso el procedente de la infiltración de agua de lluvia.

Se identifica un tipo de recarga autóctona directa para el acuífero freático y una autóctona indirecta a través del mismo, hacia el nivel acuífero inferior.

Para la estimación de la recarga es aconsejable utilizar más de un método, para poder comparar resultados y validarlos con observaciones de campo.

Dentro de los más convenientes para zonas áridas, se aplicaron el balance hidrológico de paso diario, análisis de fluctuaciones de niveles freáticos y balance de cloruros en la zona saturada. Cada uno presentó ventajas y desventajas, las que no solo dependieron del método, sino de las características hidrogeológicas del medio en donde se lo empleó.

No obstante fue posible advertir una coherencia general encontrándose los extremos en un rango de 15 % - 4 %, lo cual muestra su validez. Se tuvieron además en cuenta determinados aspectos que permitieron acotar el rango, resultando en una recarga del 10% según el balance hídrico, entre 9 - 16 % en base a la fluctuación de los niveles y por ultimo de 4,5 % según el balance del ión cloruro.

Se tomó como recarga referencial del área la obtenida por promedio de los resultados obtenidos de cada metodología, del orden de 10 % de la precipitación local.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaria de infraestructura, Planeamiento y Servicios Públicos de la provincia del Chubut por haber impulsado este estudio,

Al Lic. Erico Bianchi por su participación en las tareas de campo.

Al personal de la comuna de Puerto Pirámides y al Establecimiento ganadero Los Médanos por haber facilitado la instalación y cuidado del instrumental de monitoreo.

Referencias

Alcalá, J.A. y Custodio, E. 2012. Evaluación de la recarga a los acuíferos mediante balance de masa de cloruro atmosférico y su incertidumbre en el territorio continental Español. *7º Asamblea Hispano-Portuguesa de geodesia y geofísica*. Donostia. San Sebastián. Nº 551.

Alvarez, M. P. 2010. Investigación geohidrológica de un sector de Península Valdés, provincia de Chubut. *Tesis doctoral*. UNLP. Inédita.

Alvarez, M. P., Weiler, N. E., Hernández, M. A. 2010. Linking geomorphology and hydrodynamics: a case study from Península Valdés, Patagonia, Argentina. *Hydrogeology Journal*. 18:473-486. DOI: 10.1007/s10040-009-0528-x.

Bonorino, A, G. 1991. Evaluación de la recarga de agua subterránea en el área de la vertiente occidental de las sierras australes, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, XLVI (1-2):93-102.

Bonorino, A. G. y Torrente, R. H. 1992. Balance iónico aplicado al cálculo de la infiltración eficaz en áreas de relieve medanoso.

Terceras Jornadas Geológicas Bonaerenses, Actas:189- 194, La Plata.

Carrica, J.C. 1993. Balshort: Un programa de balance hidrológico diario del suelo aplicado a la región sudoccidental pampeana. *XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos* (4): 243-248. Mendoza.

Carrica, J. C. 2009. Cálculo de la recarga en zonas áridas y semiáridas. Recarga de acuíferos. Aspectos generales y particulares en regiones áridas. *VI Congreso Argentino de Hidrogeología*, 71- 80. Santa Rosa, La Pampa.

Custodio, E., & Llamas, R. M. 2001. Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Ed. Omega, S.A. Barcelona.

Custodio, E. 2009. Recarga a los acuíferos extensos a partir de la deposición atmosférica. *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 631-640

Custorio E. C. 2010. Estimation of aquiferrecharge by means of atmospheric chloride deposition balance in the soil. *Contributions to Science*, 6 (1): 81–97

de Vries, J.J. y Simmers, I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*. 10 :5–17.

Hernández, M. A., González, N., y Sánchez, R. 2002. Mecanismos de recarga de acuíferos en regiones áridas. Cuenca del Río Seco, provincia de Santa Cruz, Argentina. *XXXII Congreso AIH y VI Congreso ALSHUD*. Ed. CD Rom. Mar del Plata.

Hernández, M. A., González, N y Hernández, L. 2009. "Regiones áridas. Procesos diferenciales de recarga y casos ejemplo de Argentina". En: J. Carrica, M. Hernández y E. Mariño (eds.), *Recarga de acuíferos. Aspectos generales y particularidades en regiones áridas*,63-70

Herczeg , A. L. y Leaney, F. W. 2011. Review: Environmental tracers in arid-zone hydrology. *Hydrogeology Journal* 19: 17–29

Lerner, D.N., Issar, A.S. y Simmers, I. 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. *International contributions to hydrogeology*. Vol 8. IAH, Heisse, Hannover, 345 p.

Malán, J. M., Mariño, E. y Casagrande, G. 1993. Aplicación de distintos métodos para la estimación de la infiltración eficaz en áreas medanosas. *V Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales*, Actas II:51-54, Santa Rosa.

Malán, J. M., Mariño, E. E. y Casagrande, G. 1997. Estimación de la infiltración eficaz en dos sectores del acuífero Santa Rosa-Anguil, provincia de La Pampa. *I Congreso Nacional de Hidrogeología*, Actas: 153-163, Bahía Blanca.

Paruello J. M, y Sala, O. 1995. Water losses in the patagonian sterre: a modelling aproach. *Ecology* 76 (2) 510-520.

Rosenthal, E. 1987. Chemical composition of rainfall and ground water in recharge areas of the best Shean-Harod multiple aquifer system, Israel. *Journal of Hydrology*, 89 (3/4): 329-352.

Sanders, L. 1998. *A manual of Field Hydrogeology*. Prentice-Hall.

Scanlon, B. R., Mukherjee, A., Gates, J., Reedy, R. C. y Sinha, A. K. 2010. Groundwater recharge in natural dune systems and agricultural ecosystems in the Thar Desert region, Rajasthan, India. *Hydrogeology Journal,* Volume 18, Number 4, Pages 959-972

Scanlon B.R., Healy R.W., Cook P.G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*.10:18–39

Schöeller, H., 1962. *Les eaux souterraines*. Ed. Mason et Cie., 642 p., París

Simmers, I. 1997. Groundwater recharge principles, problems and developments. In: *Recharge of phreatic aquifers in (Semi-) arid areas*. IAH, A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield, (19): 1-18.

Thorntwaite, C. W., y Mather, J. R. 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance*. Centerton, 312 págs.

Timms, W. A., Young, R. R y Huth, N. 2012. Implications of deep drainage through saline clay for groundwater recharge and sustainable cropping in a semi-arid catchment, Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1203–1219

Varni, M., Rivas, R. Weinzettel, P. Usunoff, E. y Arias, D. 1996. Estimación de la recarga por el método del balance de cloruro en la zona intermedia de la Cuenca del Arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires. *VI Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales*, Actas:245- 253, Santa Rosa.

Recarga artificial en Bajos Submeridionales

D. Sosa[1]; E. Diaz[2], M. Venencio[1]; H Picatto[1]; M. Genesio[1], E.Vergini[1], M. Basan[3], R. Tosolini[3], A. Lahitte[4], María I. Parodi[3], L. Sánchez[3], P. Firman[3],G. Oprandi [3], F. Colombo[3], F. Rotela[3], L. Monzón[3]

[1] Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Litoral-. Santa Fe. Argentina
[2]UNER- FCA
[3]INTA EEA
[4]Productor ganadero

Mail de contacto: sosa.dora@gmail.com

RESUMEN

Se presenta la experiencia en desarrollo en un sector de Bajos Submeridionales próximo a Tostado, para monitorear los efectos de la recarga artificial de acuíferos. El objetivo del estudio es mejorar la disponibilidad de agua en calidad y cantidad para uso ganadero y evaluar una obra de recarga a partir de un pozo doble propósito recarga – bombeo para mejorar su eficiencia, y difundir estas prácticas.El área piloto se ubica en un paleocauce arenoso del río Salado. En el mismo se han realizado numerosos estudios geoeléctricos, de infiltración, sedimentológicos, químicos recuperación de niveles, de suelos y de recarga. Además se dispone de una estación meteorológica automática, caudalímetro y freatímetros.

Se realizó un análisis de eventos de recarga y su efecto sobre el sistema natural y en la obra. Se concluye que ha resultado exitosa y puede ser transferida a otros ambientes de paleocauces del chaco-santafesino.

Palabras Claves: Recarga Artificial – Ganadería – Bajos Submeridionales

ABSTRACT

This work describes an artificial recharge experience of groundwater as source for animal beverage, developed on a livestock demonstrative unit, placed in Bajos Submeridionales, Santa Fe province, Argentina. The aim of this study is to improve quality and quantity of water for livestock use, analyze a recharge-pumping well efficiency, and finally to spread this practice in the region. The study area is located in a antique sandy channel of the Salado river, where have been conducted geoelectric studies, sedimentologic, soil and water analysis, pumping and recharge, and infiltration tests. Additionally, it counts with metheorological on-line data from an automatic station, flowmeter, and water-level measurements from digital and analogical devises. An analysis of a recharge event has been conducted in order to assess environmental changes and response of facilities. This successful experience suggests that these kinds of facilities could be applied in similar environments of chaco-santafesino region.

Keyboard: artificial recharge - animal beverage- Bajos Submeridionales

Introducción

La práctica de la recarga en la región fue dejada de lado durante el último episodio húmedo que comienza a fines de la década del 70. Pero en el inicio de la colonización se ha recurrido a la recarga artificial de acuíferos para mejorar la disponibilidad del agua. Los colonos se encontraron con que el agua subterránea, único recurso hídrico disponible era muy salino, por lo que lograron mejorarlo introduciendo en pozos cavados aguas pluviales colectadas en techados. Este método se lo sigue utilizando en la actualidad en muchos establecimientos rurales sin tratamiento previo alguno, salvo desechar las primeras aguas. Por otra parte las empresas de Ferrocarril para abastecer a su parque de locomotoras a vapor recurrió a todos los sistemas disponibles para el abastecimiento de agua, construyó a principios del siglo XX algunas obras de recarga como las de las Estaciones del Ferrocarril Aerolito, Bandera, Esteban Rams, Fortín Inca y La Cañada. Es recién en el año 1948 cuando la recarga de acuíferos se utilizó en servicio reducido de abastecimiento de agua. En esa época Obras Sanitarias de la Nación diseñó y construyó en la Provincia del Chaco (Corzuela, Avia Terai y Campo Largo) plantas de abastecimiento con colectores pluviales que tenía como uno de sus componentes pozos de recarga. Mas tarde en

la década de 1950 en la localidad de Tostado se construyó una represa y pozos de gran diámetro tipo Ranney, (Custodio y Llamas,1976) con los que se prestó a esa localidad un servicio precario consistente en abastecimiento con camiones tanques a los pobladores cuyos aljibes se agotaban. (CFI-INA, 2011). El CRL-INA tiene como antecedentes de estudios de obras de recarga el Sub- Proyecto BID 2012 de la década de 1970. El dispositivo de recarga aquí presentado surge de ideas esbozadas en esa década que no se llevaron a cabo por presentarse luego periodos muy húmedos.

Como consecuencia de la ultima sequía importante ocurrida a partir del año 2008, muchos de los paleocauces y aguadas exigidas al máximo para el abrevado animal tuvieron un deterioro de su calidad y reservas. Los resultados que aquí se presentan corresponden a un trabajo de investigación financiado por el SECTEI (provincia de Santa Fe) en desarrollo entre INA- CRL, INTA EEA Reconquista y UNER- Facultad de Ciencias Agropecuarias y provincia de Santa Fe.

El proyecto se lleva a cabo en una unidad demostrativa o Planta piloto de recarga.

Objetivo

Mejorar la disponibilidad de agua en calidad y cantidad para uso ganadero, utilizando recarga artificial de acuífero con agua de lluvia.

Monitorear una obra en funcionamiento para conocer su comportamiento en el tiempo.

Analizar su funcionamiento para mejorar su eficiencia.

Utilizar la unidad demostrativa de “La Güeya” para ejemplo y docencia dentro de la zona.

Ubicación y descripción general del área

La unidad demostrativa localizada en el establecimiento “La Guella”, se encuentra situada a 10 Km rumbo NO de la ciudad de Tostado, Dpto. 9 de Julio, Provincia de Santa Fe. (29° 8'39.79"S; 61°50'23.62"O). Figura 1

El clima es mesotermal subhúmedo húmedo. La precipitación media anual oscila entre 900 y 1000 mm con concentración estivo-otoñal. Existe un ligero déficit en el verano dada la elevada evapotranspiración.

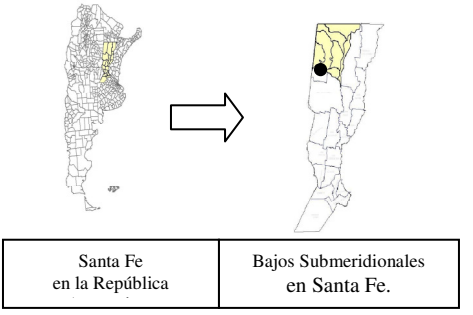


Figura 1. Ubicación de Unidad Demostrativa "La Güeya" dentro de la provincia

En la región de bajos Submeridionales la escasez de vegetación arbórea es ocupada por densos espartillares de *Spartina argentinensis* que se encuentran en las tres cuartas partes del área de bajos (FVSA - Fundapaz, 2007).

La región de bajos submeridionales presenta frecuente acumulación de agua en las depresiones naturales que forma las grandes reservas de biodiversidad.

Cuando los excesos pluviales se dan en toda la región simultáneamente las inundaciones suelen alcanzar magnitudes catastróficas (Lewis et al. ,1981), se destaca la existencia de un ciclo anual de inundaciones y sequías, con precipitaciones anuales que pueden variar entre los 400 y los 1400 mm, observables en la serie de precipitaciones del establecimiento de Miguel Zaballa, ubicado en las proximidades de Tostado que tiene registros desde 1929 al 2008.(Veizaga et al. 2009).Ver Figura 2.

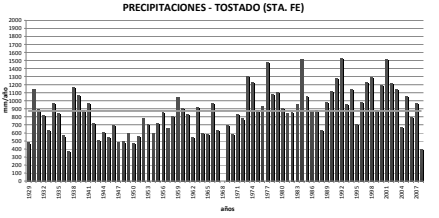


Figura 2. : Serie de precipitación
Fuente: Productor ganadero (at. Miguel Zaballa) Tostado. (Veizaga et al, 2009)

Según un análisis cualitativo de las sequías en la Provincia de Santa Fe a través de un análisis espectral mostró al norte de la Provincia como la región más afectada por el

fenómeno, resultando la localidad de Villa Minetti la más perjudicada. Ver Figura 3. (Venencio et al, 2002).

Figura 3. Zonificación cualitativa de las sequías (Fuerte (F),Moderada (M), Débil (D) y Suave (S)

La región se caracteriza por pertenecer a un sistema hidrogeológico no típico. (Sosa et al, 2011) que se define, como tal, a aquellos que se observan en zonas muy llanas, de baja pendiente piezométrica y permeabilidad moderada a baja, que se caracterizan por variaciones hidroquímicas de modo que a un mismo nivel conviven aguas de diferente contenido salino y densidad. Las variaciones salinas encontradas en el sistema acuífero, se reflejan en los contrastes resistivos a partir de la aplicación de métodos geoeléctricos. Las bajas pendientes hidráulicas del orden de cm/km. determinan lentos movimientos horizontales del flujo. Las bajas permeabilidades de estos sedimentos cuaternarios lo ubican en el entorno de los acuitardos. Estos sistemas presentan frecuentemente sectores menos salinos contenidos en los sedimentos mas permeables limosos arenosos y son los únicos aprovechables para la producción ganadera y el abastecimiento humano en un vasto sector de la llanura chaqueña. (Sosa et al. 2011)

Características del la región del Chaco santafesino

Según (Iriondo, 2011) en el chaco santafesino han actuado los sistemas fluviales de los ríos Salado, Bermejo y Paraná dejando paleocauces en toda la región. Los trabajos geoelctricos realizados en la región (Sosa, 2012) han permitido distinguir curvas de sondeos eléctricos verticales tipos en cada uno de los sistemas. Así a modo de ejemplo se presenta la Figura 4 con curvas típicas del sistema del Salado, Figura 5 del sistema del Bermejo y Figura 6 con curvas típicas del sistema del Paraná.

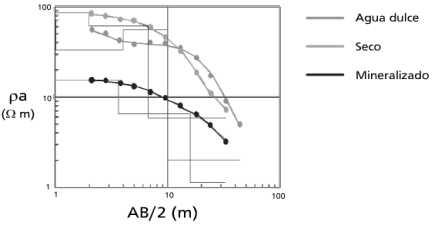


Figura 4. Paleocauces del Sistema Salado

Otros sistemas fluviales que actuaron dentro del chaco santafesino presentan curvas SEV tipos como las que se presentan a continuación.

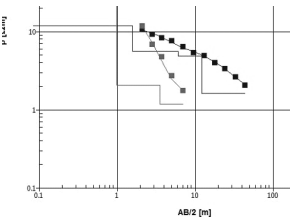


Figura 5. Sistema del Bermejo (dentro y fuera del paleocauce)

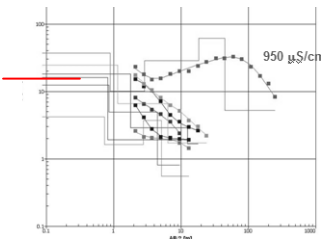


Figura 6. Sistema del Paraná (Dentro y fuera del paleocauce)

Metodología

El lugar para la obra se seleccionó considerando la presencia de un bajo y se complemento con estudios geoeléctricos para determinar la presencia de horizontes arenosos donde se pudiese realizar recarga. Además se realizaron: a) perforaciones de estudio con toma de muestra para análisis sedimentológico. b) Ensayos de infiltración en los suelos de la unidad demostrativa y dentro del cuenco receptor y Análisis Químicos de Suelos en

ambos lugares c) un ensayo de recarga controlada y d) ensayo de recuperación.

Se instalaron freatigrafos analógico y digital.

Se midió la conductividad eléctrica del agua en cada uno de los pozos a distintas profundidades.

Las muestras de los distintos perfiles del suelo en el área de investigación para determinar las características de textura del mismo, se analizó siguiendo la metodología de la Pipeta Robinson. Los análisis fueron realizados en la EEA de Pergamino.

Se extrajeron 2 muestras de suelo, una en suelo decapitado (cuneta) y otra en suelo natural, cuyos análisis fueron realizados en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias-UNL. Donde se analizo el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), conductividad eléctrica (CE) y pH, con el fin de identificar relaciones entre estos parámetros químicos y la infiltración del agua en el suelo

A los efectos de medir las variables hidrometeorológicas, se instaló una Estación Meteorológica Automática EMA aportada por INTA que mide, temperatura, lluvia, viento (velocidad y dirección) Humedad, punto de rocío, Índice THW, presión.

También el INTA instaló un caudalímetro para medir los consumos de bombeo.

Las mediciones que se realizan en la unidad demostrativa están a cargo del INTA Reconquista con la colaboración del INTA Tostado.

Los ensayos de infiltración se realizaron con infiltrómetros de doble anillo, con carga de 3 cm, con el objeto de analizar cualitativamente la infiltración en el terreno natural y en zonas donde se han removido los primeros centímetros de suelo.

Se analizaron los datos de la fluctuación de los niveles en los freatigrafos digital y analógicos.

Se ejecutó un ensayo de recarga con un volumen conocido de agua, que se efectuó a través de la cañería central del molino distribuyendo el agua a las 4 perforaciones simultáneamente. El objetivo del mismo fue determinar la respuesta que se produce en el freatígrafo digital.

Con los datos de la estación meteorológica automática se analizaron las lluvias más importantes en cuando a volumen de precipitación y la respuesta del nivel freático.

Además se midió la conductividad eléctrica (C.E) en las perforaciones utilizadas en la recarga desde el nivel estático, cada cincuenta centímetros, hasta el fondo de cada pozo. Así se pudo realizar un perfil de la variación de la C.E en profundidad y en cada pozo.

Se aplico con los valores de ascenso de la freática y la precipitación el método propuesto con Healy Cook 2002 para determinar la recarga

Planta Piloto de recarga

La Planta Piloto de Recarga se encuentra en un bajo topográfico que naturalmente, durante los períodos lluviosos acumula agua. Estudios realizados muestran que la capa superior de suelos es muy impermeable. Por debajo de los mismos la permeabilidad es muy superior Por otra parte estudios geoeléctricos y perforaciones realizadas mostraron que en el área existe un paleocauce con sedimentos arenosos..

Entre el año 2010 y 2011 se implementó la Planta con un proyecto de obra muy sencillo, cuatro pozos de doble propósito (inyección / bombeo) La obra de recarga en actual funcionamiento se ha descripto en publicaciones en Internet del INA e INTA y Sosa, 2011.

http://ina.gov.ar/crl/index.php?crl=33
http://intainforma.inta.gov.ar/?p=8751

Los componentes del sistema de recarga son una captación agua de lluvia consistente en canalizaciones aledaños a los caminos internos del establecimiento, los que aportan al bajo donde se encuentra el cuenco receptor. El mismo se encuentra localizado dentro del bajo donde se construyeron los pozos de recarga/bombeo, cuyos drenes horizontales se encuentran en una misma cota.

- Sistema de Recarga: el agua ingresa al sistema subterráneo por inyección directa (gravedad) a través de las perforaciones mediante un filtro horizontal
- Sistema de Bombeo-Inyección:

El sistema cuenta con cuatro pozos de doble función, bombeo / inyección que están conectados a un único molino que bombea un sistema de pozo araña.

Funcionamiento del Sistema

Durante la lluvia, el agua que escurre en los canales (sistema colector) es llevada al bajo que se ha acondicionado para dejar los filtros horizontales a una misma cota para que

pueda ingresar el agua. Luego, la extracción se realiza mediante molino de viento que toma de todas las perforaciones (sistema de pozos araña y descarga en una cisterna central de la que se distribuye el agua a los bebederos de los potreros, lo que favorece la entrega de agua de una misma calidad.

Resultados

El terreno natural (TN) es poco permeable tal situación se puede observar en los resultados obtenidos de los ensayos de infiltración con doble anillo. Figura 7

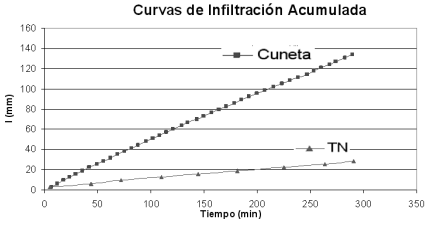


Figura 7. Curvas de infiltración acumulada en la cuneta y terreno natural

Los porcentajes de arena, limo y arcilla se determinaron para cada una de las perforaciones y en varias profundidades a modo de ejemplo se presenta una grafica representativa del pozo Nº 4. Figura 8 donde se puede apreciar la presencia de arena en un 40 % aproximadamente entre los 3 y 4 m de profundidad.

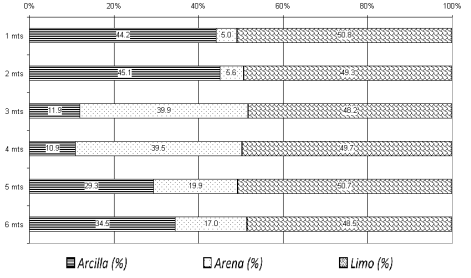


Figura 8. Porcentajes de Arena, Limo y Arcilla. Pozo 4

A continuación se presenta una grafica que sintetiza los resultados obtenido en los análisis químicos de los suelos dentro y fuera del cuenco de recarga Figura 9

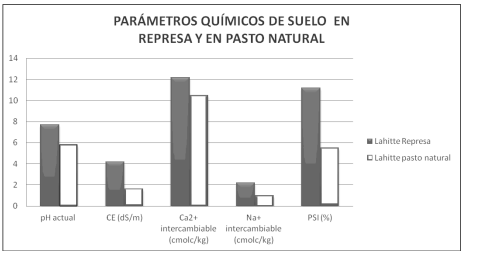


Figura 9. Comparación de valores químicos del suelo dentro del cuenco de recarga y el suelo natural

Del ensayo de recuperación de los pozos se obtuvo un valor de transmisividad de 2.67 m2/día y una conductividad hidráulica de 0.91 m/dia. Lo que denota los bajos valores de productividad de los espesores saturados.
En la Figura 10 se observa la variación de la conductividad eléctrica del agua en función de la profundidad del pozo y la distancia entre los mismos.

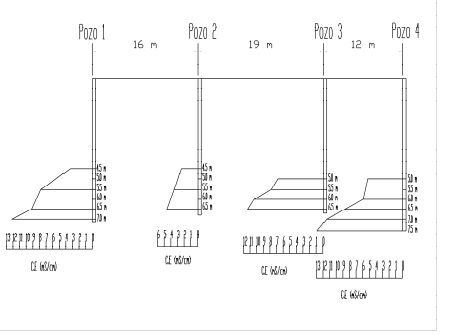


Figura 10. Conductividad eléctrica del agua

Ensayo de recarga controlada

En la Figura 11 se presenta la evolución en el tiempo de los niveles freáticos en el freatígrafo digital ante la aplicación de un volumen conocido de agua en los 4 pozos de recarga / bombeo.

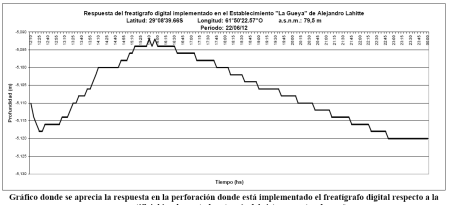


Figura 11. Registro de los ascensos en el freatígrafo digital

La experiencia de recarga que comenzó a las 12:25 hs del 22 de junio del 2012, como se puede apreciar, tuvo un retardo pequeño en la respuesta del freatígrafo de 20 minutos, considerando que la recarga se dio en perforaciones que están a distancias mayor a 12 metros del punto de medición (INTA, Informe Inédito, 2012). De este ensayo se determinó, que ante una recarga aplicada de 2100 lts aproximadamente el ascenso del nivel freático medido con el freatígrafo digital fue de 2.6 cm.

Recarga en la obra

Se aplico el método Healy Cook, 2002. con los datos del freatígrafo digital, para lo que se graficaron los valores de precipitación y ascenso del nivel freático de las lluvias más importantes de los meses de marzo, abril y mayo del 2012, como se puede observar en la Figura 12.

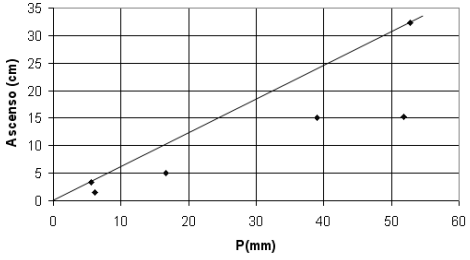


Figura 12. Ascensos nivel freático–precipitación

De la inversa de la pendiente de la recta envolvente se obtiene un coeficiente de almacenamiento específico (Sy) de 0.16.

Con los valores de los ascensos totalizados de los meses de marzo, abril y mayo se determinó que un 67 % de la precipitación de esos meses recarga el acuífero mediante la obra existente.

Eventos de lluvia y los niveles freaticos dentro y fuera de la obra de recarga

Los freatígrafos se encuentran a una distancia de 383 m. De modo que el regional no se encuentra afectado por la obra de recarga.

Las Figuras 13 y 14 presentan las respuestas de los freatigrafos dentro y fuera de la obra ante un evento de precipitación de 52.8 mm correspondiente al 18-5-2012. Esta lluvia de una duración de 4 horas cuando en nivel freático en la zona de recarga se encontraba a 5.41 metros bajo boca de pozo. Permite observar que el freatígrafo alejado de la obra no presenta ningún ascenso de nivel, mientras que el que se encuentra dentro de la planta de recarga registra un ascenso máximo de 32.4 cm.

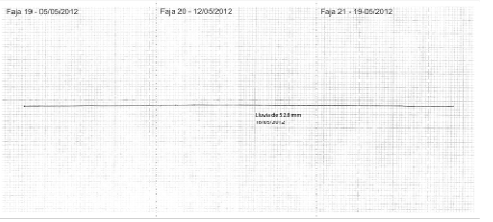


Figura 13 Respuesta de los niveles fuera de la planta de recarga

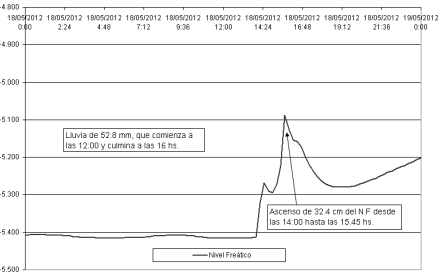


Figura 14. Respuesta de la lluvia dentro de la planta de recarga

Otro evento a destacar es el ocurrido el 4 diciembre de 2012 con una precipitación de 135 mm que se presentó con una humedad antecedente dentro del perfil del suelo ya que el 29 noviembre de 2012 se había registrado una precipitación de 52 mm. Donde en la misma grafica se vuelcan valores de niveles freatimetricos de ambos registradores. Figura 15.

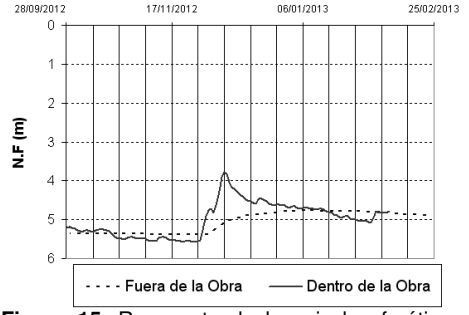


Figura 15. Respuesta de los niveles freáticos dentro y fuera de la obra.

En la tabla 1 se muestran los niveles maximos alcanzados y el ascenso total

Tabla 1. Profundidad del nivel freático en la obra y fuera de la obra

	N.F INICIAL	N.F MÁXIMO	Ascenso de N.F
Fuera de obra	5.39	4.79	0.6
En obra de recarga	5.53	3.78	1.75

Esto permite observar la eficacia de la obra en la recarga.

Mezcla de agua

Simultáneamente al monitoreo de los niveles freáticos se monitoreo la evolución de la calidad físico química del agua,. En el grafico de SCHOELLER-BERKALOF, Figura 16 se observa la calidad de cada uno de los pozos por separado y la calidad de la mezcla en líneas de punto.

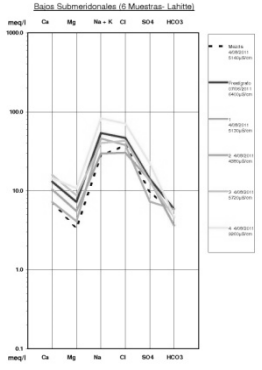


Figura. 16 . Diagrama de Schoeller Berkaloff

Conclusiones

El sistema responde de manera satisfactoria a la recarga artificial ingresando agua al sistema subterráneo aun en situaciones donde el nivel regional no acusa ascensos.

La sistematización del escurrimiento superficial, mediante canales aporta aguas al sistema de recarga en lugares de escasa pendiente superficial.

Una ventaja fundamental del sistema es que la recarga se realiza por gravedad, sin gasto de energía y su extracción por medio de molinos con “el sistema patas de araña”.se adapta a un acuífero con bajo rendimiento de caudal de extracción.

Los costos de las obras son razonables y permiten disponer del agua para la producción en períodos de escasas precipitaciones y recargar el acuífero con importantes porcentajes de agua.

Con la información disponible y mediante el método de Healy Cook, se calculo un 67 % de recarga, valor que deberá validarse y corroborarse con mayor información en el tiempo.

El contenido salino de las aguas mejora por dilución con el aporte de las aguas de lluvia y la mezcla se produce dentro del acuífero manteniendo una temperatura más homogénea aun en el verano.

Se concluye que la experiencia ha resultado exitosa a nivel experimental y puede ser transferida a otras explotaciones con condiciones similares de restricciones de la calidad del agua subterránea, así resulta interesante su aplicación a otros ambientes de paleocauces del chaco-santafesino donde actuaron sistemas fluviales como del Paraná y Bermejo.

Referencias

Consejo Federal de Inversiones (CFI); INA.2011 “Comportamiento de las aguas subterráneas en el noroeste de la provincia de santa fe. Producción ganadera”. Informe inédito.

Custodio E., Llamas M. R 1976 “Hidrologia Subterránea”. Ediciones Omega SA.

Fundación Vida Silvestre Argentina-FVSA-Fundapaz. Zonificación de los Bajos Submeridionales del Norte Santafesino. Una Herramienta para la planificación del desarrollo productivo y la conservación de la biodiversidad del humedal. Buenos Aires.

Healy,R.; Cook,P. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal. 10:91-109.

INTA;2012."Informe técnico inédito de la comisión efectuada al establecimiento "la Güella" en Tostado, 1ro de Julio".

Lewis, J.P; Pire, EF; 1981.Reseña sobre el chaco-santafesino. INTA Serie fitogeográfica. 18:1-48.

Sosa,D, 2012 "El agua, excesos y déficits en la producción agrícola de secano y pecuaria dentro de la cuenca inferior del río Salado. Tesis Doctoral Universidad de la Coruña-España

Sosa, D.; Díaz E. , Castro, S., Genesio 2011. "Sistemas hidrogeológicos no típicos en la llanura chaqueña y las obras de recarga"-Seminario hispano americano de aguas subterránea Salta Argentina.

Sosa, D. 2011."Recarga artficial de agua". Revista Hydria Nº38: 16-19. ISSN 1669-5119

Sosa D., Genesio M. Y E. Veizaga. 2008. "Prospección Geoeléctrica en establecimientos ganaderos del norte santafesino. Departamento 9 de Julio". Informes técnicos del Instituto Nacional del Agua (CRL) inédito. Entregas N° 1, N° 2 y N° 3. Convenio Especifico N° 3 (MASPyMA).

Veizaga E.; Sosa, D.; Genesio, M., 2009. "Diagnóstico y estrategias para la utilización de agua subterránea para uso ganadero en Bajos Submeridionales provincia de Santa Fe". Actas del VI Congreso de Hidrogeología y IV Seminario Hispanolatinoamericano de temas actuales de la Hidrogeología. La Pampa, Argentina. ISBN 978-987-1082-38-4. Páginas 13-21

Venencio, M.V.; García N.; Sgroi, L. 2002. Informe Final "Análisis de la variabilidad del clima y su impacto en el acuífero libre con fines de riego en la Provincia de Santa Fe". Convenio INA-FICH. Diciembre,pp:55

Estimación de la recarga al acuífero del Azul: 1. Análisis de las características climáticas

Marcelo Varni[1] y Emilio Custodio[2]

[1] Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul), República de Italia 780, (B7300) Azul, Buenos Aires, Argentina.
[2] Dept. Ingeniería del Terreno / Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España.
Mail de contacto: marcelovarni@gmail.com

RESUMEN

En la cuenca del Arroyo de Azul, en la Provincia de Buenos Aires, se están realizando estudios para caracterizar la recarga al acuífero freático. Se trata de comparar los resultados del balance hídrico en el suelo con el balance de la deposición de cloruro atmosférico. En esta primera parte se analiza la homogeneidad de la precipitación para valorar los resultados de la calibración del balance en el suelo en varios lugares con las fluctuaciones freáticas en puntos distintos en los en que se mide la precipitación diaria. Se trata de una cuenca abierta de escaso relieve, pero a pesar de ello se producen lluvias de carácter e intensidad que no tienen el mismo reflejo en todos los puntos considerados. Eso hace que al realizar la comparación entre recarga calculada y evolución de niveles freáticos medidos en otras localidaddes se presenten desviaciones, que se pueden explicar. Aquí se consideran esas heterogeneidades en la lluvia y las variaciones espaciales en la evapotranspiración.
Palabras clave: recarga de acuíferos, características climáticas, precipitación, evapotranspiración.

ABSTRACT

In the Azul River basin, located in Buenos Aires Province, studies to characterize groundwater recharge are in progress. Soil water budget results and the atmospheric chloride deposition budgets are compared. In this first part the homogeneity of the precipitation is analyzed to evaluate the results of the soil water budget calibration in several places with the water table fluctuations at points different from those in which the daily precipitation is measured. The study area is an open basin with low relief but, despite this, rainfalls of amount and intensity that have not the same value in all the considered points occur. As a result, when calculated recharge and groundwater levels evolution are compared, deviations occur, which can be explained. Here rain heterogeneities and the spatial variations in reference evapotranspiration are considered.
Keywords: groundwater recharge, climatic characteristics, precipitation, evapotranspiration.

Introducción

La recarga a los acuíferos es una de las magnitudes hidrológicas más difíciles de definir y cuantificar y siempre tiene asociada una importante incertidumbre, en especial a escala de cuenca. Esta incertidumbre debe ser evaluada y asumida en la planificación y gestión integrada de los recursos de agua y actuar consecuentemente en cuanto a flexibilidad y acotación de las acciones y regulaciones. Los resultados varían con la escala espacial y temporal, lo que debe ser tenido en cuenta adecuadamente. Para reducir y acotar la incertidumbre las estimaciones deben realizarse aplicando el mayor número de métodos posible, mejor cuanto más independientes sean entre sí. En los trabajos en curso dentro del proyecto REDESAC (CGL2009-12910), llevados a cabo conjuntamente por el Instituto de Hidrología de Llanuras de Azul (IHLLA), la Universidad Politécnica de Cartagena y la Universidad Politécnica de Cataluña, se compara el balance en el suelo calibrado con fluctuaciones freáticas con el balance de la deposición de cloruro atmosférico. La metodología aplicada es la clásica, como se expone en Alcalá y Custodio (2012) y en Custodio (2010) y en las referencias contenidas en estos trabajos.

El área de estudio se ubica en la Pampa Húmeda argentina, a una altitud entre 240 y 70 m snm. Se trata de una zona de gran importancia desde el punto de vista económico debido a las características de su clima y sus suelos, con una excelente aptitud para el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas. La actividad agrícola se basa en los cultivos de trigo, maíz, soja, cebada, centeno, lino y girasol,

así como la papa. También se desarrollan en la región actividades pecuarias de cría de ganado (bovino y ovino), así como la lechería.

El área concreta es la cuenca del arroyo de Azul (Figura 1). Este nace en cercanías de la localidad de Chillar y desarrolla su curso hacia el norte, hasta perderse en la llanura antes de alcanzar el río Salado. El curso bajo, a unos 80 km al norte de la ciudad de Azul, es interceptado y drenado parcialmente por un canal artificial, el cual se adopta en este trabajo como límite norte (final) del área de estudio. La cuenca está integrada por una gran planicie y un área más pequeña de suaves serranías, y ambas están conectadas a través del piedemonte. Estos tres sectores podrían considerarse como subcuencas: alta (serranías), intermedia (piedemonte) y baja (llanura). La pendiente media del terreno es del 5% en la zona alta, entre 0,5 y 0,8% en la intermedia y 0,2% en la baja. El comportamiento global de la región es el de una llanura (Sala et al., 1987).

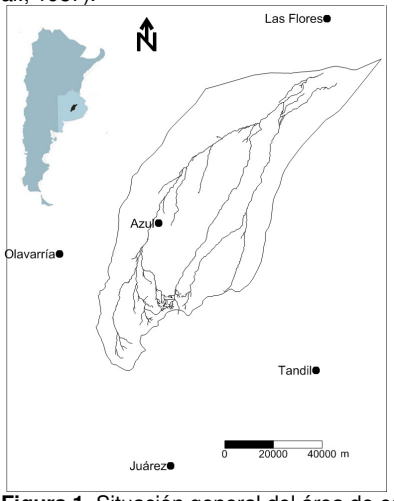


Figura 1. Situación general del área de estudio.

En las serranías ubicadas al sur existen afloramientos rocosos compuestos por rocas metamórficas, tonalitas, migmatitas y cuarcitas (González Bonorino et al., 1956). Dichas rocas se profundizan hacia el norte, constituyendo la base del sistema hidrológico, y alcanzan una profundidad cercana a los 800 m al noreste del área de estudio. En la ciudad de Azul (altitud de 140 m snm) dicho basamento se ha detectado a unos 120 m de profundidad. Encima del basamento cristalino yacen sedimentos de tipo loéssico (con una componente eólica importante) que contienen el acuífero freático Pampeano (Sala et al., 1983), que está constituido por arenas limosas y limos arcillosos con mayor o menor presencia de arcillas. Estos sedimentos muestran cierta heterogeneidad vertical y poca continuidad espacial. La Formación Post-Pampeano (Fidalgo et al., 1975) se ubica por encima del Pampeano, y a efectos prácticos se pueden reunir en una sola unidad hidrogeológica.

En las cuencas alta e intermedia la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas presenta valores menores a 750 µS/cm, aunque pueden observarse leves incrementos en algunos sectores aledaños a los cursos de agua, donde se produce la descarga parcial de aguas subterráneas más profundas, de mayor recorrido y tiempo de renovación. En la cuenca baja existe un aumento gradual hasta valores de 3000 µS/cm. Desde el punto de vista químico las aguas son preponderantemente bicarbonatadas, con predominio cálcico en cabeceras, pasando a dominar las sódicas al norte, al final de la cuenca.

La estación con registros climáticos más prolongados en la cuenca es la estación Azul Aero, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional. En ella la precipitación (P) media anual es de 907,5 mm (1901-2011) y la temperatura media anual es 14,4°C (1966-2011). De acuerdo con la clasificación de Thornthwaite, el clima de la región es subhúmedo-húmedo, mesotermal, con pequeño a nulo déficit de agua.

Para estimar la recarga al acuífero freático en varios puntos de la cuenca por medio de un balance de agua en el suelo se cuenta con registros freatimétricos a lo largo de 4 años, entre el 1/10/2006 y el 30/09/2011. Estos pozos pertenecen a la red de monitoreo del IHLLA en la cuenca.

Precipitación

Las estaciones con información disponible para el período en el que se realiza el balance de agua en el suelo son: Azul Aero (AZUL), Olavarría (OLA), El Palenque (PAL), Trapenses (TRAP), La Baguala (BAG), Patalagoity (PATA) y Las Flores (LF) (Figura 2). Las estaciones AZUL y OLA están operadas por el Servivio Meteorológico Nacional, mientras que las demás corresponden a establecimientos rurales. El registro de Patalagoity tiene una interrupción desde enero de 2011, período que se completó con información de La Baguala, y se refiere aquí como PATA/BAG.

En la Figura 3 se muestran los valores totales de precipitación en cada una de las

estaciones a lo largo de los cinco años de registro. Las estaciones están alineadas de SO a NE, que es el sentido del gradiente de precipitaciones según las isohietas medias, con un aumento de las precipitaciones en la dirección de este gradiente, aunque se observa un déficit en la estación PATA/BAG.

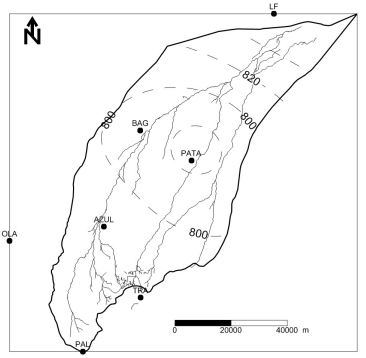


Figura 2. Ubicación de la estaciones de registro de precipitaciones en el área de estudio.

Variabilidad de la precipitación

Se han realizado análisis de comparación de las estaciones que están en una misma zona (cuenca alta, intermedia y baja), tomando las estaciones a pares. En principio se esperaría un comportamiento similar y coherente en los registros de cada par de estaciones dada su relativa proximidad.

Un primer análisis es el de la diferencia de las lluvias registradas en cada par de estaciones. Se comenzó realizando este análisis diariamente, pero se verificó que era frecuente que un mismo evento de precipitación se registrase en días diferentes en cada estación. Como resultado de ello se obtiene una diferencia de un cierto signo en un día y una diferencia similar pero de signo contrario al día siguiente. Por esta razón se decidió trabajar con las diferencias entre las lluvias acumuladas de varios días, en este caso de cinco días, aplicadas al día central. Después se acumulan las diferencias a lo largo del periodo de registro para resaltar los cambios. Dado que la pluviometría es similar en las distintas estaciones, la representación no se ha normalizado para representar valores relativos. En las Figuras 4 a 7, para cada par de estaciones se representan las curvas de dobles masas, las desviaciones en grupos de 5 días y las desviaciones acumuladas.

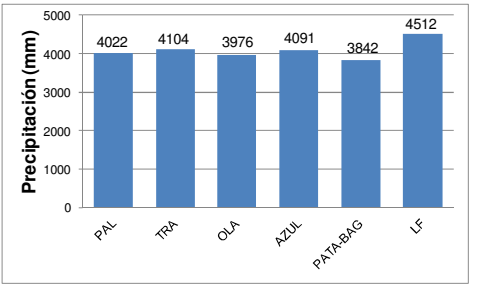


Figura 3. Precipitaciones totales registradas en las estaciones en el período 1 de octubre de 2006 – 30 de setiembre de 2011.

Resultados

Para cada par de estaciones se presenta una figura que contiene un gráfico de 4 pares (figuras 4, 5, 6 y 7). Los resultados sintéticos son:

Cuenca media: par OLA-AZUL
Buena correlación
Sin diferencias cíclicas
Diferencias de hasta ~60 mm en 5 días
4 singularidades mayores: – inicio 2008;
+ inicio 2009; – segundo tercio 2009;
+ inicio 2011

Cuenca alta: par PAL-TRAP
Correlación con escalones
Fluctuación cíclica anual de las diferencias
acumula junio-octubre
desacumula octubre-abril
Diferencias de hasta ~150 mm en 5 días
2 singularidades mayores: – inicio 2008;
– inicio 2011

Cuenca baja: par PATA/BAG-LF
Correlación algo escalonada
Sin claras diferencias cíclicas
Diferencias de hasta ~150 mm en 5 días
3 singularidades mayores: (–) inicio 2008;
+ segundo tercio 2009; – inicio 2008

Cuenca alta-media: par TRAP-AZUL
Buena correlación
Tendencia a la ciclicidad anual de las diferencias:
acumula junio-octubre
desacumula octubre-abril
Diferencias de hasta ~100 mm en 5 días
No hay claras singularidades, pero hay notables diferencias temporales locales breves

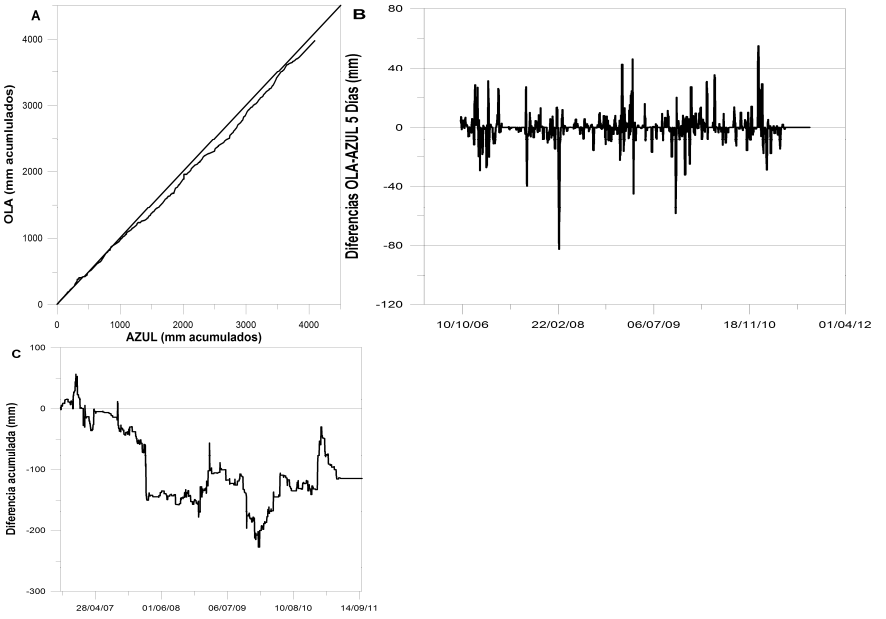


Figura 4.– Análisis de las precipitaciones en las estciones OLA y AZUL. A.– Gráfico de dobles masas (mm acumulados). B.– Diferencia de precipitaciones (mm) en periodos de 5 días (OLA menos AZUL). C.– Diferencias acumuladas (mm acumulados).

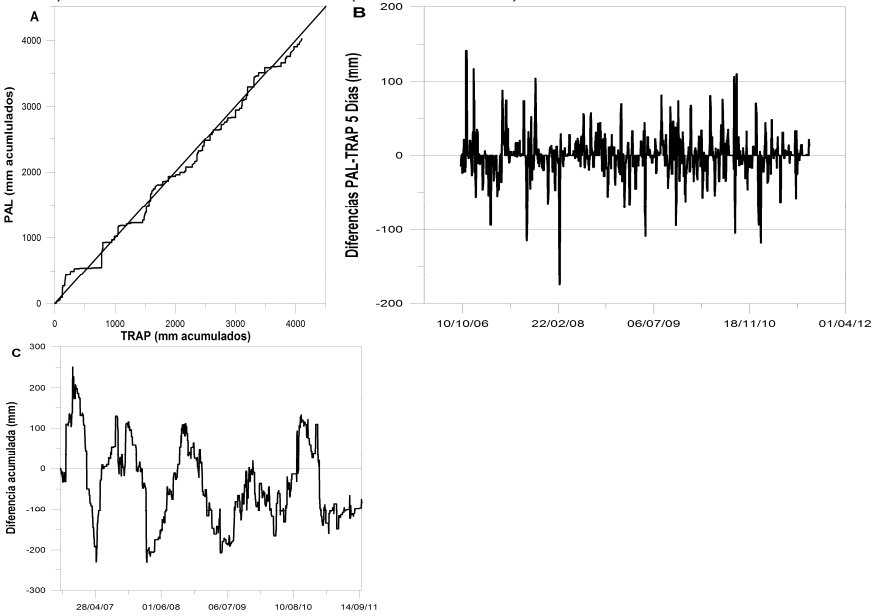


Figura 5.– Análisis de las precipitaciones en las estciones PAL y TRAP. A.– Gráfico de dobles masas (mm acumulados). B.– Diferencia de precipitaciones (mm) en periodos de 5 días (PAL menos TRAP). C.– Diferencias acumuladas (mm acumulados).

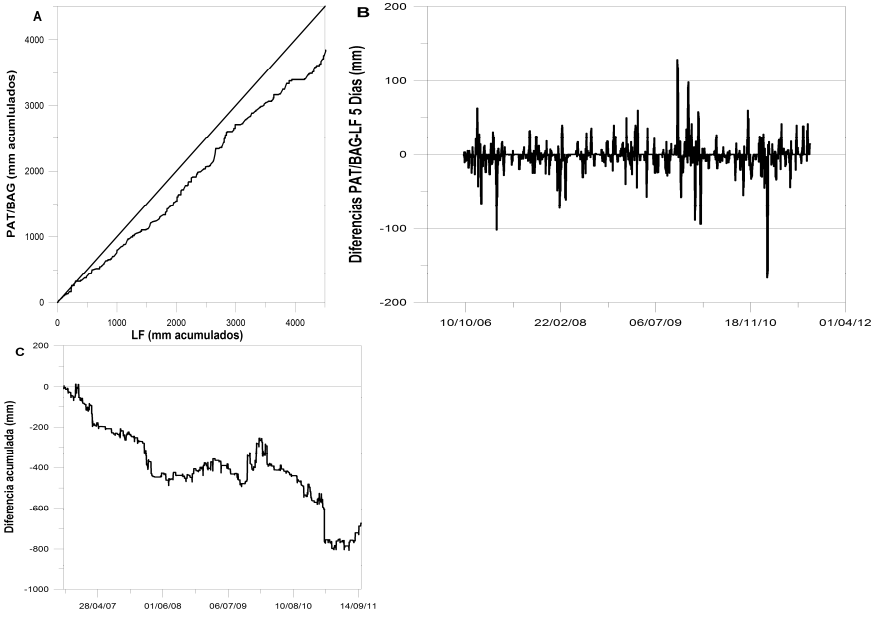


Figura 6.– Análisis de las precipitaciones en las estaciones PATA/BAG y LF. A.– Gráfico de dobles masas (mm acumulados). B.– Diferencia de precipitaciones (mm) en periodos de 5 días (PATA/BAG menos LF). C.– Diferencias acumuladas (mm acumulados).

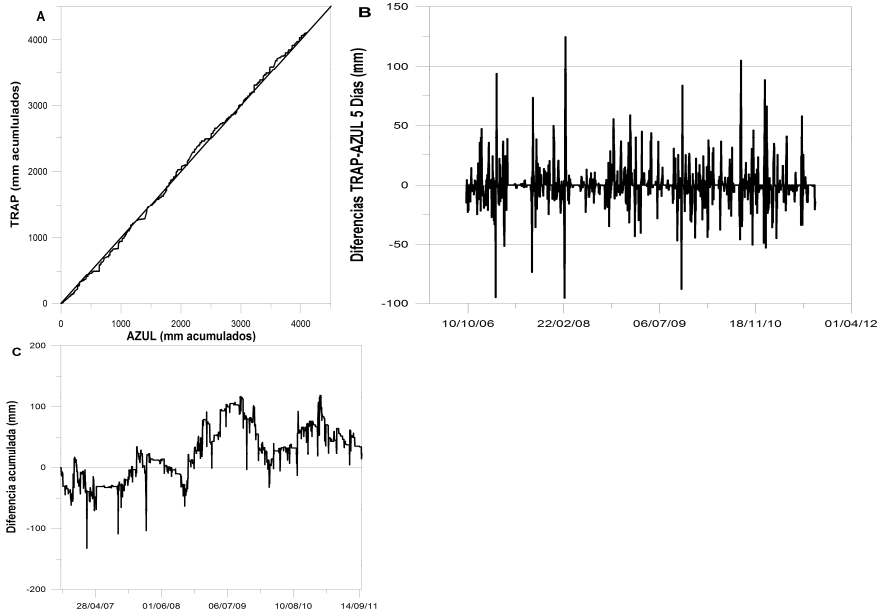


Figura 7.– Análisis de las precipitaciones en las estciones TRAP y AZUL. A.– Gráfico de dobles masas (mm acumulados). B.– Diferencia de precipitaciones (mm) en periodos de 5 días (TRAP menos AZUL). C.– Diferencias acumuladas (mm acumulados).

Discusión de la variabilidad de la precipitación

Del análisis realizado se deduce:
a) hay una influencia estacional entre la precipitación en la cuenca alta y la intermedia-baja que se traduce en mayor precipitación relativa en el invierno austral en las zonas altas, mayor en PAL que en TRA, y que ya desaparece en AZUL.
b) en el inicio de cada año pueden producirse precipitaciones singulares en la cuenca alta y periferia que no se reflejan claramente en el resto del área, y que se presentan de forma más irregular con respecto a la periferia.
c) se pueden acumular diferencias de hasta 150 mm en pocos días entre dos estaciones cuando una es de la cuenca alta de la periferia, y no tanto si es del área (posible efecto de mayor proximidad). Estas diferencias afectan a la recarga que se puede producir. Son mayores hacia la parte serrana (alta).

Temperatura y datos para la estimación de la evapotranspiración

Rivas y Caselles (2004) han analizado la información meteorológica de cuatro estaciones ubicadas en el área: Azul, Olavarría, Tandil y Benito Juárez (Figura 1). La estación Azul tiene coordenadas geográficas coincidentes con la estación de registro de precipitaciones AZUL y Olavarría con OLA. Las variables analizadas fueron temperaturas diarias máxima y mínima (°C), humedades relativas diarias máxima y mínima (%), velocidad diaria media del viento (m s^{-1}), y radiación solar incidente (MJ m^{-2} día-1) y, de ellas, obtuvieron los valores medios para cada mes. Ellos utilizan estos parámetros para calcular los coeficientes de una ecuación para estimar la evapotranspiración de referencia. Concluyen que los parámetros son lo suficientemente homogéneos a escala espacial como para utilizar valores uniformes de estos coeficientes en toda la región. Luego Rivas y Caselles (2005) hicieron un análisis análogo al anterior, pero incorporando la estación Las Flores (coincidente geográficamente con LF), llegando a las mismas conclusiones.
Estos dos trabajos, que analizan las variables con incidencia en el cálculo de la evapotranspiración de referencia, muestran claramente que su variación espacial es pequeña y, por lo tanto, también la evapotranspiración potencial varía de forma poco significativa en la región de estudio. Por ello, se considera que no se comete un error significativo utilizando una evapotranspiración potencial uniforme en todo el área.

Características del período de estudio

La precipitación media anual medida en la estación Azul Aero (1901-2011) es de 907,5 mm. Los balances del agua en el suelo en la parte 2 de este trabajo se realizan en períodos anuales, pero en ciclos que comienzan el 1 de octubre y finalizan el 30 de setiembre, por considerar que es un período válido para ser tomado como año hidrológico. Las precipitaciones medias anuales caídas en los años analizados se muestran en la Tabla 1. El valor medio de dichas precipitaciones es de 818,2 mm, valor que está claramente por debajo (90%) de los 907,5 mm de precipitación media a largo plazo. Solamente en 2 de los 5 años se supera el registro de la precipitación media, mientras que en los restantes la precipitación está por debajo de la media, y en dos casos bastante por debajo. Es de destacar que el período bianual 2007/2009, con precipitaciones muy por debajo de las normales, constituye un período seco de importancia.
En cuanto a las variables que definen la evapotranspiración, no existen estudios específicos realizados en este período, pero al menos la radiación solar, que define en gran medida la evapotranspiración de referencia, se mantuvo dentro de los rangos normales (R. Rivas, comunicación personal).

Tabla 1. Precipitaciones medias anuales (mm) en el lapso analizado en la estación de AZUL AERO. Periodo de 01-10 a 30-09.

Período	P (mm)	Carácter
2006/2007	981,0	húmedo
2007/2008	648,1	muy seco
2008/2009	716,4	muy seco
2009/2010	925,1	medio
2010/2011	820,2	seco

Conclusiones

Se analizaron los registros de 7 estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del arroyo del Azul y alrededores para el periodo 2006-2011. Se han realizado análisis de comparación de las estaciones que están en una misma zona (cuenca alta, intermedia y baja), tomando las estaciones a pares. El análisis se realizó

mediante gráficos de dobles masas (mm acumulados), la diferencia de precipitaciones (mm) en periodos de 5 días y las diferencias acumuladas (mm acumulados).
Estos análisis permiten concluir que:
a) hay una influencia estacional entre la precipitación en la cuenca alta y la intermedia-baja que se traduce en mayor precipitación relativa en el invierno austral en las zonas altas, mayor en PAL que en TRA, y que ya desaparece en AZUL.
b) en el inicio de cada año pueden producirse precipitaciones singulares en la cuenca alta y periferia que no se reflejan claramente en el resto del área, y que se presentan de forma más irregular con respecto a la periferia.
c) se pueden acumular diferencias de hasta 150 mm en pocos días entre dos estaciones cuando una es de la cuenca alta de la periferia, y no tanto si es del área (posible efecto de mayor proximidad). Estas diferencias afectan a la recarga que se puede producir. Son mayores hacia la parte serrana (alta).
Con base en dos trabajos antecedentes que analizan las variables con incidencia en el cálculo de la evapotranspiración de referencia, se muestra claramente que su variación espacial es pequeña y por lo tanto también la evapotranspiración potencial varía de forma poco significativa en la región de estudio.
Estos trabajos se realizan en paralelo con otros similares, dentro del mismo proyecto, en el Baix Ebre, 200 km al sur de Barcelona, en un ambiente mucho más agreste, para comparar. Se obtienen condicionantes similares (Espinosa el al. 2013).

Agradecimientos

El trabajo se ha realizado en el marco del proyecto MICIN (actualmente MINECO) CGL2009-2910-CO3 REDESAC, financiado por el Gobierno Español y cuyo objetivo es el estudio de procesos de recarga y descarga a acuíferos mediante trazadores naturales.

Referencias

Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2012. Spatial average recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.9556.

Custodio, E. 2010. Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance. *Contributions to Science,* 6 (1): 81-97

Espinosa, S., Custodio, E., Alcalá F.J. y Lambán L.J. 2012. Estimación de la recarga en el Baix Ebre (Cataluña, España) mediante el método de balance de la deposición total de cloruro atmosférico. *7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia-San Sebastian*

Fidalgo, F., Pascual, R. y De Francesco, F. 1975. Geología superficial de la llanura Bonaerense (Argentina). En: *Actas VI Congreso Geológico Argentino*. 103–138

González Bonorino, F., Zardini, R., Figueroa, M. y Limousin, T. 1956. Estudio geológico de las Sierras de Olavarría y Azul (Provincia de Buenos Aires). *LEMIT*, Series 2, 63 :5–23

Rivas, R. y Caselles, V. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing–based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment* 93: 68-76

Rivas, R. y Caselles, V. 2005. Reference evapotranspiration in a pasture of Argentina. En: *Recent Research Developments in Thermal Remote Sensing*, (Chapter 6), Research Signpost TC 37/661(2), Fort PO, Trivandrum-695 023, Kerala, India,119-134

Sala, J. M., González, N. y Kruse, E. 1983. Generalización Hidrológica de la Provincia de Bs.As. *Coloquio Internacional Sobre Hidrología de Grandes Llanuras. Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional, Olavarría, Argentina.*

Sala, J.M., Kruse, E., y Aguglino, R. 1987. *Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo del Azul, Provincia de Buenos Aires*. CIC, Informe 37.

Estimación de la recarga al acuífero del Azul: 2. Balances de agua en el suelo y de deposición atmosférica de cloruro

Marcelo Varni[1] y Emilio Custodio[2]

[1] Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul), República de Italia 780, (B7300) Azul, Buenos Aires, Argentina.
[2] Dept. Ingeniería del Terreno / Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España.
Mail de contacto: marcelovarni@gmail.com

RESUMEN

En la cuenca del Arroyo de Azul, en la Provincia de Buenos Aires, se están realizando estudios para caracterizar la recarga al acuífero freático. Se trata de comparar los resultados del balance hídrico en el suelo con el balance de la deposición de cloruro atmosférico. En esta segunda parte se analizan los ajustes obtenidos mediante el balance de agua en el suelo en 7 perforaciones instrumentadas con freatígrafos para determinar la recarga. Los valores obtenidos se comparan con los de recarga obtenidos mediante el balance de la aportación de cloruro. El balance de agua en el suelo proporciona valores medios de la recarga total por la lluvia, relativamente homogéneos en el área, de 217± 20 mm/a, o sea de 26±4% de la precipitación media de alrededor de 820 mm/a para el periodo 2006–2011. El balance del cloruro de deposición atmosférica proporciona a valores netos de la recarga media, es decir la recarga por la lluvia menos la evaporación freática. Donde esa evaporación freática es despreciable, ambos métodos coinciden razonablemente, pero difieren notablemente en las otras áreas donde puede producirse esa evaporación.
Palabras clave: recarga de acuíferos, balance de agua en el suelo, deposición atmosférica de cloruros.

ABSTRACT

In the Azul River basin, located in Buenos Aires Province, studies for characterize the groundwater recharge are in progress. In this work, soil water budget results with the atmospheric chloride deposition budget are compared. In this second part the fits obtained in 7 wells with phreatigraphic logs are analyzed for recharge determination. The obtained values are compared with the recharge obtained by the chloride deposition budget. The soil water budget yield mean values of the total recharge by precipitation, relatively homogeneous in the area, of 217±20 mm/y, or 26±4% of the mean precipitation of about 820 mm/y for the 2006-2011 period. The atmospheric chloride deposition budget give values of mean net recharge, this is, the recharge by precipitation less the water table evaporation. Where the water-table evaporation is negligible, both methods reasonably agree, but differ significantly in other areas where this evaporation occurs.
Keywords: groundwater recharge, soil water budget, atmospheric chloride deposition.

Introducción

En la parte 1 de este trabajo se aportan los comentarios sobre la estimación de la recarga a los acuíferos y se resalta la importancia de contrastar los resultados de varias metodologías. Este es objetivo de este trabajo, que se enmarca dentro del proyecto REDESAC (CGL2009–12910), llevado a cabo el Instituto de Hidrología de Llanuras de Azul (IHLLA) como participante del proyecto del que son titulares la Universidad Politécnica de Cartagena, la Universidad de las Palmas de Gran Canaria y la Universidad Politécnica de Cataluña. Se compara el balance en el suelo calibrado con fluctuaciones freáticas con el balance de la deposición de cloruro atmosférico. La metodología aplicada es la clásica, como se expone en Custodio (2010) y Alcalá y Custodio (2012) y en las referencias contenidas en esos trabajos. En el proyecto se aplica el método en ambientes muy diferentes en España, como el norte de la isla volcánica de Gran Canaria, la llanura arenosa litoral de Doñana (sudeste), el área de montaña y piedemonte del Baix Ebre (Plana de la Galera y Ports de Bsseit en el noreste) y en Argentina en la llanura preampeana continental del Arroyo de Azul (Buenos Aires), en ambientes desde subhúmedos a semiáridos. Primeros resultados han sido ya publicados (Varni et al., 2010 y 2011; Weinzettel et al., 2002).

Funcionamiento hidrogeológico en la cuenca del arroyo del Azul

El área de la cuenca del Arroyo de Azul está descrita en la parte I y se desarrolla principalmente de Sur a Norte, desde una suave serranía hasta un área muy llana. En detalle, la parte superior del terreno no es homogénea y hay áreas más arcillosas y otras formaciones alargadas NO–SE más arenosas de origen eólico, muy arrasadas, que pueden ser áreas preferentes de recarga por su naturaleza y ligera mayor elevación.

Cabe distinguir dos sistemas extremos de flujo de agua subterránea. Uno es poco profundo, recargado localmente por la precipitación, que descarga en parte hacia los arroyos y zonas deprimidas cuando hay condiciones para ello, y hacia el final de cuenca, al norte, con una renovación rápida, posiblemente decadal. El otro es profundo y de carácter regional y transfiere la recarga en la parte sur hacia las áreas de descarga en la parte sur o más allá de la misma, con una lenta renovación, probablemente secular. Este sistema profundo parece haber contenido inicialmente agua salina marina en parte del mismo, que estaría siendo desplazada por la recarga actual. De ese modo las partes más altas del norte estarían ya total o parcialmente lixiviadas, pero cabe que en las del sur persistan aguas salinas relictas que estarían descargándose lentamente hacia el río Salado, posiblemente diluidas por las de recarga moderna, si es que no están totalmente lixiviadas, como lo parecen indicar los estudios en curso (Zabala et al., 2010).

El modelo conceptual aquí utilizado supone en que las zonas bajas del norte los niveles freáticos son poco profundos, al menos en una parte importante del territorio, donde es posible la evapotranspiración freática, actual o en épocas pasadas, por la vegetación primitiva o la evaporación freática donde la vegetación sea o haya sido escasa. No se dispone de cartografía adecuada para conocer estos detalles.

Aunque no hay suficientes datos para soportar en detalle el modelo conceptual expuesto, parece confirmarse con lo observado aquí y en otros lugares pampeanos. Esto es importante para la aplicación del cálculo de la recarga a partir de la deposición atmosférica del cloruro. Los estudios hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales están aún en curso.

Fundamentos del cálculo de la recarga

El balance del agua en el suelo determina la recarga por diferencia entre la infiltración de la precipitación y las salidas por evapotranspiración y escorrentía subsuperficial, considerando las variaciones de la humedad en la zona freática (Custodio et al., 1997).

Los balances de agua en el suelo se han realizado con el programa Visual Balan (Samper et al., 1999). Este programa realiza balances de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero, utilizando un entorno interactivo de entrada de datos y post-proceso de resultados. Los términos fundamentales del balance son las entradas por precipitación, las salidas por escorrentía superficial, evapotranspiración, interceptación, flujo hipodérmico y flujo subterráneo, y la variación del contenido de humedad del suelo y de la zona no saturada y del nivel de agua en el acuífero. La evapotranspiración potencial diaria ha sido aportada externamente al programa y también ha sido calculada mediante el método de Penman–Monteith (Allen et al., 1998), ya que los datos disponibles lo permiten. Los balances se han calibrado intentando ajustar los niveles freáticos simulados con los medidos, con especial atención a las recesiones.

Suponiendo ausencia de riego y de encharcamiento por aportes exteriores, y que no hay salida lateral por eventuales niveles colgados, el balance de masa de cloruro de deposición atmosférica en un intervalo de tiempo Δt es (Custodio et al., 1997), en minúsculas para referirse a ese Δt:

$$a_P \equiv p \cdot c_P = es \cdot c_{ES} + r \cdot c_R + \Delta m \quad (1)$$

donde:

p = precipitación

a_P = deposición total de cloruro atmosférico

es = escorrentía saliente

r = recarga en tránsito (flujo bajo el plano de flujo nulo o la base de las raíces de las plantas)

c_x = concentración de cloruro en el agua para cada una de las variables (para c_P es en muestras que incorporen la deposición seca, o aporte total)

Δm = variación de masa de cloruro entre la superficie del terreno y un nivel algo por encima del nivel freático en el intervalo Δt y por unidad de superficie.

Los flujos se obtienen sumando a lo largo del tiempo (se expresan en mayúsculas), y una vez promediados se miden en volumen por unidad de tiempo (por ejemplo, mm/año) y las concentraciones en mg/l, por ejemplo. Se considera aquí que la recarga en tránsito poco por encima del nivel freático será similar a la recarga real y con poco retraso. Para una tasa de recarga de 200 mm/a, una profundidad del nivel freático de 2 m y una humedad media

volumétrica de 0,15, el tiempo medio de transferencia física es de 1,5 m y la respuesta hidráulica de pocos días.
La Ec. (1) puede escribirse en términos de flujo másico que llega al nivel freático

$$A_P = A_{ES} + A_R + \Delta M$$

En un sistema estacionario (sin tendencias de cambios climáticos o de uso de la tierra), si el tiempo de balance acumulado es grande, ΔM tiende a ser despreciable y se puede trabajar con valores medios

$$\overline{A_P} = \overline{A_{ES}} + \overline{A_R}$$

En muchas circunstancias prácticas es una aproximación suficiente, considerando que los otros términos son de un orden de magnitud inferior. Entonces, considerando que $\overline{A_R} = \overline{R} \cdot \overline{C_R}$:

$$\overline{R} = \overline{A_P} / \overline{C_R}$$

En el caso que aquí se considera parece ser que ES y A_{ES} puede que no sean despreciables, pero ante la falta de datos observacionales se toman como nulos en primera aproximación.

Información y observaciones disponibles

Datos freatigráficos

En el área de estudio existen 7 perforaciones someras, de alrededor de 6 m de profundidad, que penetran entre 2 y 3 m, aproximadamente en el acuífero freático. En dichas perforaciones se han instalado limnígrafos digitales con sensor piezoresistivo (marca Genica) para el registro del nivel freático. En la Figura 1 puede verse la ubicación de estas perforaciones en el área de estudio. Se cuenta con registros freatimétricos a lo largo de 4 años, entre el 1/10/2006 y el 30/09/2011. Estos pozos pertenecen a la red de monitoreo del IHLLA en la cuenca.

Datos pluviométricos

Los datos pluviométricos diarios disponibles se exponen la parte I de este trabajo. Se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de las estaciones pluviométricas utilizadas. El periodo 2006–2011 es el de estudio

	Precipitación media				Sondeos en los
Estación	Periodo	mm/a	Periodo	mm/a	que se utiliza
TRAP	1969-2011	917,0	2006–11	820,8	VIV, ED
AZUL	1901–2011	907,5	2006–11	818,2	SJ
LB	1984–2011	974,1	2006–11	881,7	LP, LB, LM
LF	1959-2011	962,2	2006–11	889,8	RV

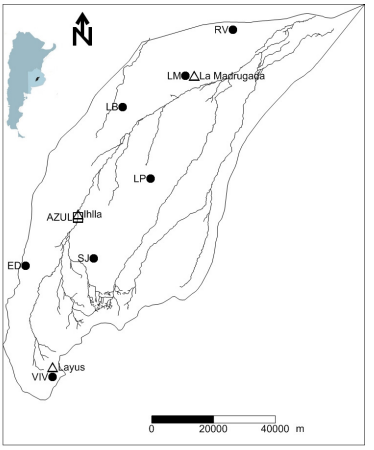


Figura 1. Ubicación de la ciudad de Azul, estaciones pluviométricas (círculos llenos) y de muestreo de cloruro en lluvia (triángulos).

Deposición atmosférica de cloruro

La lluvia se muestreó en 3 estaciones abiertas ubicadas aproximadamente según el eje de la cuenca: Layus al sur, en una ubicación asimilable a VIV, Ihlla, en la periferia de la ciudad de Azul, y La Madrugada al norte (Figura 1). La recolección de muestras se inició en marzo de 2010 y se completaron 6 muestreos, los 3 primeros cuatrimestrales y los 3 últimos semestrales, con un total de 30 meses, o sea 2,5 años. Se muestrea la deposición total, o sea la aportada por la lluvia más la de la deposición seca, y así se tiene en cuenta la posible recirculación por efecto eólico.

La deposición media anual de cloruro atmosférico de cada estación se calcula como

$$A^* = \sum_i C_i * P_i / \sum_i \Delta t_i$$

en la que para cada periodo de muestras Δt_i, C_i y P_i son respectivamente la concentración en cloruros de cada muestreo y la precipitación acumulada. La concentración equivalente media de cloruro (incluyendo la incorporación de la deposición seca) es $C = \sum_i C_i * P_i / \sum_i P_i$.

Los resultados están en la Tabla 2. Se ha decidido descartar el dato de la estación Ihlla debido a su notable diferencia con las otras dos. Posiblemente es debido al efecto local de aporte adicional de deposición seca a las muestras por incorporación de polvillo generado por la circulación de vehículos por terreno no vegetado en el predio del Campus Universitario donde se ubica el muestreador. La cuenca se ha dividido

en 2 sectores, sur y norte, y se asigna un valor de deposición total atmosférica de Cl de 1,2 g/m^2/a en el sur y 1,6 g/m^2/a en el norte.

Tabla 2. Deposición atmosférica de cloruro y concentración media total en el agua de lluvia (incluyendo el aporte contenido en la deposición seca) en el periodo de muestreo (abril 2010 a mayo 2012).

Muestreador	Layus	Ihlla	La Madrugada
Deposición g/m^2/a	1,2	2,4	1,6
Concentración total mg/L	1,3	2,6	1,6

Cloruro en las aguas subterráneas

En los pozos en los que se registraron los niveles freáticos se realizaron muestreos periódicos de agua para la realización de análisis de los iones mayoritarios. En la Tabla 3 se muestran las concentraciones de Cl en mg/l obtenidas desde Abril de 2010 a Mayo de 2012, completando un total de 8 muestreos, aunque en varias de las perforaciones no se hayan realizado todos. Aparentemente existe estabilidad química ya que no hay valores discordantes en las series de datos en ninguno de los pozos.

Considerando que los pozos son someros, penetrando en el acuífero freático como máximo 3 m, en principio puede suponerse que representan al agua de recarga local. Por lo tanto, con los promedios de Cl en los pozos y en la precipitación se pueden estimar las recargas medias mediante el método de balance de masas de cloruro de deposición atmosférica para contrastar sus resultados con el balance de agua en el suelo, calibrado con las fluctuaciones de nivel en los mismos pozos.

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones anómalas observadas en algunos puntos no son ocasionales sino sistemáticas. Se trata de valores altos en RV, LP y LB, todos ellos en la cuenca baja, aunque el LM, también en la cuenca baja, tiene valores pequeños. La explicación está pendiente de un estudio hidrogeoquímico de detalle. Se puede hipotetizar que en unos sondeos, como el LM, no habría afectación salina por ser una zona de recarga preferente en pequeñas sobreelevaciones arenosas del terreno (Zárate y Mehl, 2010), mientras que en otros, en especial en el LB, las aguas freáticas podrían estar afectadas por fuerte evaporación o evapotranspiración freática de aguas actuales o pasadas o de evaporación en encharcamientos de escorrentía de la cuenca. Localmente podría suceder que se trate de una ubicación inadecuada cercana a actividades antrópicas que aporten salinidad, aunque la estabilidad de los valores de las concentraciones a lo largo del tiempo no apuntan a ello. El pequeño coeficiente de variación del cloruro para las aguas más salinas indica menor influencia de la recarga, que se mezcla con una mayor masa de agua subterránea.

En la Tabla 4 se dan las características químicas básicas de los pozos muestreados. No se aprecian rasgos marinos y se manifiesta una importante incorporación litológica por meteorización, como lo muestra el alto contenido de HCO_3 (alta presión parcial de CO_2 en el suelo por elevada actividad biológica), un exceso de Na sobre Cl y un alto contenido en iones alcalinotérreos, además de un elevado contenido en F atribuible a la meteorización de intercalaciones de cenizas volcánicas de procedencia andina contenidos en los sedimentos acumulados.

No es de esperar que el proceso de meteorización añada Cl al agua, ni parece que haya un efecto antrópico importante ya que el contenido en NO_3 es moderado y los fertilizantes en general tienen una baja relación Cl/N y no hay un efecto visible de exceso de K aportado como KCl. La relación Cl/Br corresponde a la esperable en aguas continentales (Alcalá y Custodio, 2008). Excepto para LB, la relación SO4/Cl es muy superior a la marina (0,8 en meq/L) lo que indica aporte atmosférico en un ambiente sulfatado (polvo ambiental con arrastre yesoso de áreas secas), excepto para LM y RV en que parece dominar un efecto litológico añadido que se manifiesta al final de la cuenca.

Estas consideraciones hidrogeoquímicas son importantes para decidir si los valores de Cl observados en los pozos de control representan la recarga local.

Sin un estudio hidrogeoquímico e isotópico más completo y detallado, que en parte está en curso, no es posible discernir si existen aportes de Cl no atmosférico. Sin embargo, cabe interpretar en primera aproximación que las muestras de los pozos de observación ED, VIV, SJ y LM (este último en un área arenosa algo más elevada en la parte sur) pueden representar al agua de recarga, y los otros podrían ser el resultado de evaporación o evapotranspiración freática actual (aunque la profundidad freática parece ser algo elevada) o en momentos pasados, y posiblemente con

Tabla 3. Concentraciones de Cl (mg/l) en los muestreos de agua subterránea utilizados para obtener el contenido medio de Cl en el agua del pozo.

	VIV	ED	SJ	LP	LB	LM	RV
Abr–10	5,0	6,7		51,5	549		47,5
Ago–10	4,5	7,1		47,3	603		42,2
Dic–10	6,8	7,8		49,5	744	7,5	
Mar–11	4,9	8,1		40,2	595	7,3	
Jun–11	4,7	8,1	19,3	42,1	579		
Sep–11	6,0	8,5	21,3	37,4	576	9,2	45,1
Ene–12	6,3	7,2	18,1	35,4	599		
May–12		7,8	18,8		588	8,8	44,2
Promedio	5,4±0,8	7,7±0,5	19,4±0,3	43,3±6	604±20	8,2±0,6	44,8±0,5
Coef. Variac.	0,15	0,06	0,02	0,14	0,03	0,07	0,01

Tabla 4. Iones mayoritarios y F (ambos en mg/l), conductividad eléctrica (µS/cm) y pH de las aguas de los pozos estudiados. Estos valores son un promedio de todas las determinaciones realizadas de 2010 a 2012 en los pozos de observación.

	Área	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO_3	SO_4	HCO_3	F	CE	pH	rCl/rBr	rSO_4/rCl
VIV	S	46	34	61	20	5,4	2	6	459	1,15	671	7,5	255	0,8
ED	S	64	26	40	21	7,5	29	9	397	0,67	645	7,4	214	0,9
SJ	S	38	21	90	18	19,3	15	11	425	0,93	717	7,6	384	0,4
LP	C	47	29	202	26	42,3	27	54	649	1,23	1209	7,5	393	0,9
LB	CN	78	67	743	27	584	22	619	702	1,26	3627	7,5	748	0,8
RV	N	39	368	293	34	43,8	6	131	860	1,07	1539	7,7	382	2,2
LM	N	50	22	86	27	8,2	4	32	456	0,68	734	7,5	277	3,0

lixiviación de sales yesosas depositadas en los sedimentos en épocas más áridas.

Resultados

Balance de agua en el suelo

En la Figura 2 se muestran los ajustes obtenidos en VIV, SJ y ED, en la Figura 3 los realizados en LP, LM y LB y en la 4 los en RV. Los resultados se resumen en la Tabla 5. En general se trata de ajustes razonables, pero con algunas anomalías en cuanto a cómo reaccionan los niveles freáticos a la precipitación. Este efecto parece debido a las variaciones espaciales de la precipitación, que son objeto de la parte I de este trabajo, ya que las estaciones no están al mismo lugar que los puntos de medidas freáticas. La tendencia general y amplitud de las fluctuaciones simuladas son similares a las observadas. Resultan recargas en el periodo de estudio, que es de pluviometría algo menor que la media, entre 191 y 263 mm/a, expresable por 217±20 mm/a, o sea del 21% al 30% de la precipitación, expresable por 26±4%.

Balance del cloruro de deposición atmosférica

Se han adoptado los 2 valores regionales de concentración equivalente de cloruro para la lluvia antes indicados, uno para la zona norte y otro para el sur. Las estaciones de muestreo de lluvia se ubican en LM, en la zona norte, y otra muy próxima a VIV, al sur (Figura 1). Los resultados se reúnen en la Tabla 6.

Tabla 5. Resumen de los resultados de los ajustes de los balances del agua en suelo. Aclaraciones: S = sur; C = centro; CN = centro–norte; N = norte
ECM = error cuadrático médio, EM = error medio
$\overline{R}$ = recarga media calculada en el periodo; P = precipitación media

Punto	Área	$\overline{R}/P$	$\overline{R}$(mm/a)	ECM(m)	EM(m)	Ajuste	Anomalías
VIV	S	24,4	200	0,41	0,003	Bueno	2008
ED	S	23,6	194	0,36	–0,049	Medio	2008, 2010
SJ	S	28,9	236	0,23	–0,048	Medio	en 2ª mitad periodo
LP	C	23,3	205	0,32	–0,015	Bien	en 2ª mitad periodo
LB	CN	23,4	206	0,38	0,047	Bien	2010
LM	N	21,7	191	0,44	0,057	Medio	sin registro intermedio
RV	N	29,6	263	0,30	0,031	Pobre	ascensos bien reproducidos

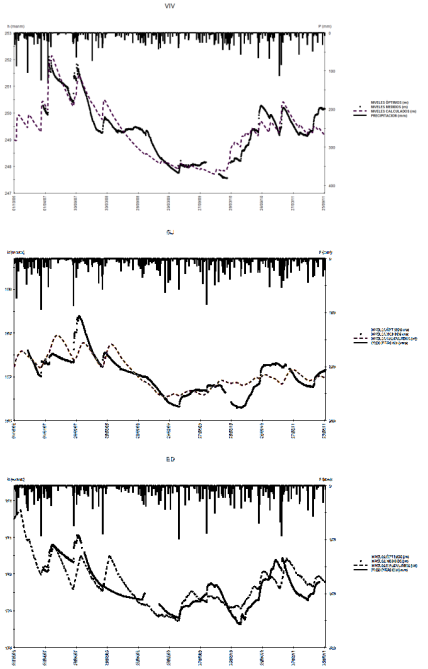


Figura 2. Niveles simulados (puntos negros) y medidos (línea a trazos), y precipitaciones diarias (barras) en VIV, SJ y ED. Los niveles están en m y las precipitaciones en mm. El borde superior de cada gráfico coincide con el nivel del terreno; las fechas varían entre 01–11–06 y 25–09–11.

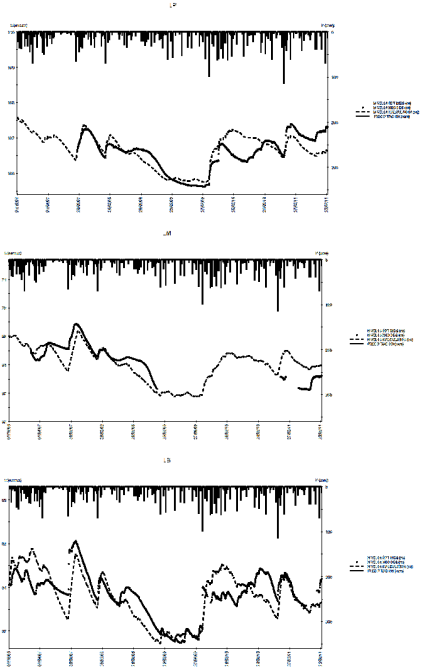


Figura 3. Niveles simulados (puntos negros) y medidos (línea a trazos), y precipitaciones diarias (barras) en LP, LM y LB. Los niveles están en m y las precipitaciones en mm. El borde superior de cada gráfico coincide con el nivel del terreno; las fechas varían entre 01–11–06 y 25–09–11.

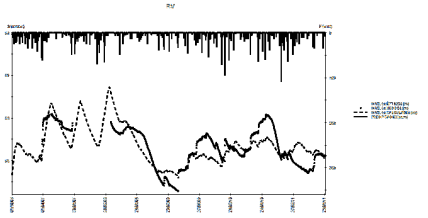


Figura 4. Niveles simulados (puntos negros) y medidos (línea a trazos), y precipitaciones diarias (barras) en RV. Los niveles están en m y las precipitaciones en mm. El borde superior de cada gráfico coincide con el nivel del terreno; las fechas varían entre 01–11–06 y 25–09–11.

Discusión

El balance del agua en el suelo proporciona resultados de la recarga media que son homogéneos sobre el área, con una variación espacial de 26±4% de la precipitación.

Comparando los resultados de los dos métodos, el del balance del agua en suelo y el del balance de la deposición atmosférica de cloruro, se tienen resultados comparables aunque algo menores para los puntos VIV y ED en la zona alta (sur) y LM en una franja NO–SE más arenosa del norte. En cambio en los otros lugares el método del cloruro proporciona valores notablemente menores, o incluso despreciables para el punto LB, al final de la cuenca. Caben dos interpretaciones, 1) que el Cl del agua subterránea tenga aportes no atmosféricos, lo que parece poco probable hidrogeoquímicamente, y 2) que se trate de áreas de notable evaporación freática en las que el agua subterránea se concentra, y lo hace de forma muy notable en el punto LB. En este segundo caso el balance de cloruros indicaría una recarga neta, es decir la producida por la lluvia menos la evaporación/evapotranspiración freática, mientras que el método de balance en el suelo calcula la recarga total por la lluvia.

En la aplicación del método del balance de cloruro de aportación atmosférica se ha considerado que el término de escorrentía superficial es despreciable frente al de aporte atmosférico y el de recarga. Esta hipótesis es débil y no se tiene datos para valorarla. La escorrentía superficial directa y subsuperficial parece que en efecto es pequeña según el conocimiento del área, pero no son nulas y no se conoce el flujo de Cl que pueden evacuar. Si las concentraciones son similares a la de la lluvia el error cometido es pequeño pero si en momentos de lluvia hay disolución de sales almacenadas temporalmente sobre el suelo y una descarga generalizada de agua subterránea por elevación de niveles hasta cerca de la superficie, ese término puede ser significativo, en cuyo caso el valor de R calculado sería menor. No parece que sea este el caso dada la similitud de resultados en los puntos VIV, ED y LM.

Los cálculos realizados tienen una notable incertidumbre asociada, que aún no se ha evaluado. Es una tarea a realizar próximamente, así como un estudio hidrogequímico e isotópico ambiental –en parte en curso– para determinar si hay aportes no atmosféricos de Cl y verificar la plausibilidad de la hipótesis de concentración por evaporación / evapotranspiración freática.

Conclusiones

Los métodos del balance de agua y el suelo y del balance del cloruro de deposición atmosférica proporcionan resultados similares, algo menos para el segundo, cuando no se produce evaporación o evapotranspiración freática. Pero cuando esta evaporación o evapotranspiración freática es notable los resultados difieren ya que el primer método proporciona la recarga total por la lluvia y el segundo la recarga neta, es decir descontando la salida freática hacia la atmósfera.

Tabla 6. Para cada pozo se dan los valores de la concentración de cloruro en el acuífero, representado al de recarga (Cl_P) y la equivalente en la precipitación (Cl_P), y de R/P, y se añaden los resultados del balance de agua en el suelo (S = sur; C = centro; CN = centro–norte; N = norte).

		Balance de cloruro atmosférico				Balance en el suelo	
Lugar	Área	Cl_R (mg/L)	A_P g/m^2/a	R mm/a	R/P %	Rmm/a	R/P %
VIV	S	5,4	1,2	222	24,1	200	24,4
ED	S	19,4	1,2	62	6,7	194	28,9
SJ	S	7,7	1,2	166	16,9	236	23,6
LP	C	43,3	1,6	37	3,7	205	23,6
LB	CN	8,2	1,6	195	19,5	206	21,7
LM	N	44,7	1,6	36	3,6	191	23,4
RV	N	605	1,6	3	0,3	263	29,6

La recarga media por la lluvia relativa la precipitación es relativamente homogénea en el área y vale 217±20 mm/a, o sea 26±4% de la precipitación para el periodo estudiado (2006–2011).
En el área baja de la cuenca, en el sur, la evaporación o evapotranspiración freática tienen importancia, salvo en franjas medanosas arrasadas.
Estos resultados han de filtrarse a través de una mejora del modelo hidrogeológico mediante estudios hidrogeoquímicos e isótopos ambientales más avanzados y contextualizarse al estimar que error tienen asociados.

Agradecimientos

El trabajo se ha realizado en el marco del proyecto MICIN (actualmente MINECO) CGL2009–2910 REDESAC, financiado por el Gobierno Español y cuyo objetivo es el estudio de procesos de recarga y descarga a acuíferos mediante trazadores naturales.

Referencias

Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2008. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology* 359: 189–207.

Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2012. Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.9556.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requeriments.* Irrigation and Drainage Paper N° 56. FAO. Rome, Italy, 300 pp.

Custodio, E. 2010. Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance. *Contributions to Science*, 6(1): 81–97.

Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. (eds.) 1997. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Instituto Tecnológico Geo–Minero. Madrid.

Samper, J., Huguet, Ll. y García Vera, M.A. 1999. *Manual de usuario del programa Visual Balan v. 1.0*. Publicación Técnica 05/99, ENRESA, Madrid, 124 p.

Varni, M., Comas, R., Weinzettel, P. y Dietrich, S. 2010. Análisis de 18 años de registros diarios de nivel freático en la zona central de la cuenca del arroyo de Azul, Buenos Aires, Argentina. En: Varni, M., Entraigas, I. y Vives, L. (Eds.), *Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura*. Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul: 209-215.

Varni, M., Comas, R., Weinzettel, P. y Dietrich, S. 2011. Análisis preliminar de registros freatigráficos en la Cuenca del arroyo de Azul, Provincia de Buenos Aires. En: *VII Congreso de Hidrogeología*. Salta: 190–197.

Weinzettel, P., Usunoff, E. y Vives, L. 2002. Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. En: *XXXII IAH & VI ALHSUD Congress*. Mar del Plata.

Zabala, M.E., Manzano, M. y Vives, L.S. 2010. Estudio preliminar del origen del fondo químico natural de las aguas subterráneas en la cuenca del arroyo de Azul. En: Varni, M., Entraigas, I. y Vives, L. (Eds.)*, Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura.* Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul: 249-256.

Zárate, M. y Mehl, A. 2010. Geología y geomorfología de la cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina. En: M. Varni, I. Entraigas y L. Vives (eds.*), Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura.* Instituto de Hidrología de Llanuras,Azul:65-78.

Aproximación de volúmenes de agua subterránea disponibles para riego en las cuencas de los ríos Areco y Arrecifes (Buenos Aires)

Mario A. Hernández[(1)], Nilda González[(1)], Pablo Romanazzi[(2)] M. Marta Trovatto[(1)], Claudia Solero[(1)], J. Horacio Ceci[(3)] y M. del P. Alvarez[(4)]

[1] Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) Av. 60 y 122 La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina.
[2] Facultad de Ingeniería (UNLP). Calle 47 y 116. La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina.
[3] Hidroar SA. 67 No 1747 La Plata (1900).Buenos Aires. Argentina
[4] Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) Av. 60 y 122 La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina. CONICET.

Mail de contacto: mario_h@sinectis.com.ar

RESUMEN

Son presentados resultados de un estudio hidrogeológico aplicado a evaluar agua subterránea para riego, en dos importantes cuencas del Noreste bonaerense (Areco y Arrecifes, 15400 km^2), donde se practica agricultura extensiva. La metodología recurrió a tres criterios coalescentes: resolución de un balance hídrico para aproximar la infiltración potencial probable, cálculo de reservas y fijación de un caudal de explotación sustentable. Para el primero se utilizaron datos de las estaciones climatológicas Pergamino, Junín, Rosario y Buenos Aires, con suficiente garantía, representatividad y extensión, estimándose una recarga potencial máxima de 1324 hm^3. El cálculo de reservas se realizó para los acuíferos Pampeano y Puelche, con empleo de mapas isopáquicos, isopiécicos, de altura potenciométrica sobre techo del Puelche y coeficientes de porosidad efectiva y almacenamiento. Se calculó un total de 82036 hm^3 para el Pampeano (8116 hm^3 sustentables) y 48695 hm^3 y 5452 hm^3 para el Puelche, respectivamente.
Palabras clave: Agua subterránea – Riego – Evaluación – Noreste bonaerense

ABSTRACT

This paper presents the results of a hydrogeological survey to evaluate groundwater for irrigation in two important basins of northeastern Buenos Aires Province (Areco and Arrecifes, 15400 km^2) where extensive agriculture is conducted. Three converging criteria were applied: resolution of a water balance to estimate probable potential infiltration, calculation of reserves and determination of sustainable exploitation yield. The balance was made based on data from the climatological stations Pergamino, Junín, Rosario and Buenos Aires, which have sufficient guarantee, representativeness and extension. The maximum potential recharge was estimated at 1324 hm^3. Reserves of the Pampeano and Puelche aquifers were calculated using groundwater isopach, isopiestic and potentiometric head maps at the top of the Puelche aquifer, as well as coefficients of effective porosity and storage. Total and sustainable reserves calculated were 82036 and 8116 hm^3 for the Pampean aquifer and 48695 and 5516 hm^3 for the Puelche aquifer, respectively.
Key words: Groundwater – Irrigation – Evaluation – Northwest of Buenos Aires province

Introducción

Las cuencas de los ríos Areco y Arrecifes, tributarias del río Paraná en su tramo inferior ocupan, en conjunto con algunos arroyos menores, un área del orden de los 15400 km^2. Están localizadas en el sector Noreste de la provincia de Buenos Aires y un reducido sector del sur santafecino (Figura 1).

Bajo un clima de tipo sub-húmedo húmedo, estas cuencas se desarrollan con un patrón de drenaje dendrítico (Figura 2), en un paisaje suavemente ondulado donde afloran en general sedimentos cuaternarios, fundamentalmente limos loessoides conocidos genéricamente como “limos pampeanos”.

Figura 1. Localización del área de estudio

La población supera los 500.000 habitantes y la actividad socioeconómica fundamental es agrícolo-ganadera, seguida de una creciente industrial, radicada a la vera del río Paraná.

Todos los usos del agua son satisfechos a expensas de la subterránea, recurso que atiende exclusivamente al servicio público, riego y mayoritariamente a la industria.

Esta alta dependencia origina conflictos potenciales entre las diferentes aplicaciones, más evidentes entre el empleo para uso doméstico y la irrigación.

Esta última actividad se halla en neto crecimiento en el ámbito de la agricultura extensiva (maíz, sorgo, trigo, girasol, soja), lo cual motivó un Convenio entre PROSAP (Programa de Ser-vicios Agrícolas Provinciales) y la Universidad Nacional de La Plata, para una investigación que incluyó en parte el tema aquí abordado.

El resultado alcanzado fue el dimensionamiento de las disponibilidades del recurso hídrico subterráneo, con miras a evaluar la posibilidad que ofrece para soportar los distintos requerimientos, todos ellos en franco desarrollo, sin introducir conflictos de importancia.

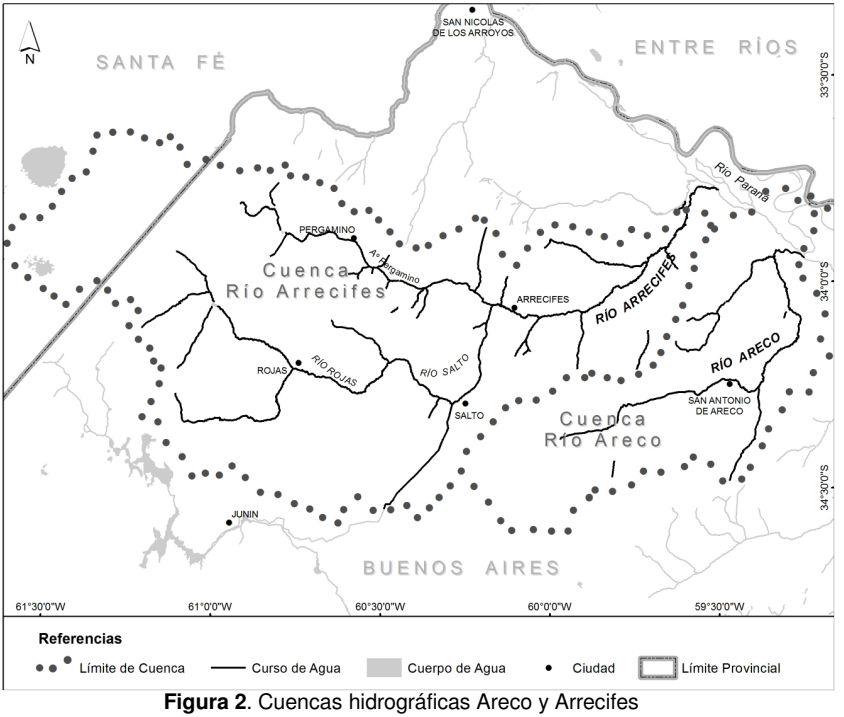


Figura 2. Cuencas hidrográficas Areco y Arrecifes

Metodología

Una vez localizada, calificada y transferida la información básica necesaria, procedente de diversas fuentes, se procedió a su elaboración e interpretación para poder componer el modelo conceptual del sistema geohidrológico local, basado en antecedentes conocidos (EASNE, 1972; González, 1973 (a, b); Auge y Hernández, 1983; Auge et al., 2002).

Para llegar a establecer las reservas explotables, se optó por partir de tres criterios concurrentes al objetivo: la aproximación de la infiltración potencial, el cálculo de las correspondientes a los acuíferos componentes del sistema geohidrológico identificado (subsistema activo) y por último la estimación dentro de éstas, de las consideradas de explotación sustentable.

En la determinación de la recarga potencial al sistema, fue utilizada la expresión del balance hidrológico para régimen permanente:

$$I = P - Evtr - Ef$$

donde,

I : Infiltración
P : Precipitación
Evtr: Evapotraspiración real
Ef : Escurrimiento fluvial

Del total de estaciones climatológicas y pluviométricas disponibles, fueron seleccionadas por su representatividad, garantía y extensión las pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) Rosario, Pergamino, Junín y Buenos Aires (record 1941-2010).

Para la estimación de la Evapotraspiración (potencial y real) se recurrió a la fórmula de Thornthwaite-Mather (1957) y en el caso del Escurrimiento fluvial a coeficientes basados en información antecedente sobre la región, del orden de 0,12 (EASNE, 1972).

Se tuvieron en cuenta para calcular las reservas de agua subterránea los acuíferos denominados Pampeano (freático + semilibre) y Puelche (semiconfinado), ambos utilizados actualmente para todos los destinos más arriba mencionados.

Por razones de una elemental prudencia en los cálculos y sobre la base del Principio de Parsimonia, se adjudicó al acuífero Pampeano el carácter de libre y al Puelche el de confinado, no computándose los ingresos por filtración vertical descendente en este último.

Se acudió entonces a las ya conocidas formulaciones (Custodio y Llamas, 2001):

Acuífero Pampeano:

$$RR = A\Theta\Delta h$$

$$RG = A\Theta e_m$$

$$RT = RR + RG$$

Acuífero Puelche:

$$RBC = ASH$$

$$RG = A\Theta e$$

$$RT = RBC + RG$$

donde,

RR : Reservas reguladoras
RG : Reservas geológicas
RT : Reservas totales
RBC : Reservas bajo confinamiento
A : Área de las cuencas
Θ : Porosidad efectiva
Δh : Diferencia entre nivel potenciométrico máximo y mínimo (históricos)
e_m : Espesor saturado (mínimo histórico)
S : Coeficiente de Almacenamiento
H : Diferencia entre el nivel piezométrico y el techo del acuífero
e : Espesor geológico

Los valores de coeficiente de almacenamiento y de porosidad efectiva se tomaron de algunos trabajos antecedentes, como los oportunamente mencionados en el ítem Introducción.

Fue obtenida la información de variación de niveles freáticos, alturas piezométricas, espesores saturados y geológicos, de mapas equipotenciales, de isovariación e isopáquicos (Figura 3), construidos con datos facilitados por entes prestadores del servicio público de provisión de agua. También por productores regantes, empresas perforistas locales, autoridades de control municipales, y profesionales que actúan en la zona, además de los procedentes de la propia base de datos.

Los criterios para fijar las reservas de explotación sustentable resultan diferentes, según el acuífero del que se trate. Para el caso del Pampeano y dado que el monto de las reservas reguladoras excedía francamente al de la recarga potencial, se creyó prudente utilizar un plus de explotación pequeño, en este caso de 1 m de afectación del espesor saturado mínimo utilizado para dimensionar las reservas geológicas.

Para el acuífero Puelche asumido como confinado como más arriba se dijese, se optó por adicionar al volumen de reservas bajo confinamiento, solamente un 10% de las geológicas.

Finalmente, se consideran desde el punto de vista metodológico ciertas características propias del tipo y frecuencia del riego en agricultura extensiva de la región, para valorar la incidencia en posibles conflictos entre usos.

Resultados

La elaboración de toda la información lograda según se refiriese, permitió en el caso de la estimación de recarga potencial al sistema adoptar un valor medio anual del orden de 1324 hm^3, entre extremos de 554 hm^3 y 2587 hm^3 máximos posibles por ser infiltración bruta.

Tabla 1. Síntesis del balance (en mm)

	P	Evtr	Ef	I
Rosario	998	842	120	36
Pergamino	963	796	116	51
Junín	993	786	119	88
Buenos Aires	1144	838	137	169
Regional	1025	816	123	86

Con referencia a las reservas del acuífero Pampeano, se calculó un volumen de 6576 hm^3 correspondiente a las reguladoras y 75460 hm^3 a las geológicas, lo cual hace un total de 82036 hm^3.

Para el Puelche fueron estimados a su vez 647 hm^3 de reservas bajo confinamiento, 48048 hm^3 de geológicas, ascendiendo las totales a 48695 hm^3.

Las sustentables fueron valoradas según los criterios eminentemente conservativos expuestos en el acápite anterior, obteniéndose cifras de 8116 hm^3 y 5452 hm^3, en el caso de los acuíferos Pampeano y Puelche respectivamente, totalizando un volumen de 13568 hm^3.

Como es posible advertir, se trata de cantidades verdaderamente importantes, no obstante lo cual resulta necesario abrir ciertas consideraciones acerca de la probable ocurrencia de conflictos entre usos, ya anticipados por algunos de los autores (González, 1998; González y Hernández, 1997, 1998; González et al., 2008).

En la Tabla 1 son consigna

La calidad del agua de ambos acuíferos muestra un bajo tenor de sales (TSD 400 a 1800 mg/l), ligeramente alcalinas y composición iónica bicarbonatada sódica a calcosódica). La presencia de oligoelementos como As y F no es significativa y la de nitratos, de carácter puntual.

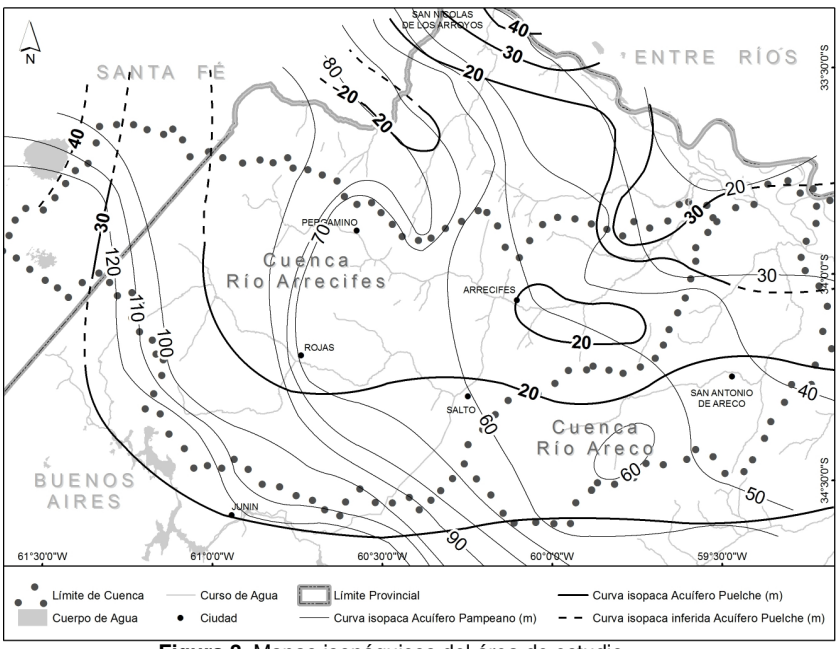


Figura 3. Mapas isopáquicos del área de estudio

Conflictos entre usos

Como es conocido, la actividad agrícola es la principal consumidora de agua en el mundo (Garduño, 1994), hecho que no escapa a la región aquí tratada.

Los conflictos son circunstancias normalmente no deseadas, que a veces sobrevienen por desconocerlos, no advertirlos, no enfrentarlos oportunamente, o sencillamente minimizar su posible envergadura (Entelman, 2002).

Son potencialmente más factibles los que podrían ocurrir con el uso público, evidentemente prioritario y más distribuido en la comarca, aunque no homogéneamente. El industrial en cambio está mucho más localizado, próximo al eje fabril-fluvial Rosario-La Plata e incluso parcialmente satisfecho con agua superficial y más sujeto a los vaivenes del mercado.

De todas maneras, el aspecto más preocupante sería el cualitativo, ya que a diferencia de otras comarcas pampeanas bajo clima semiárido o escasamente húmedo (González, 1998; González y Hernández, 1997, 1998), los excesos hídricos son importantes.

Acuden también a minimizar los posibles conflictos en la región otros factores como:

a) estacionalidad del riego, a lo sumo sesenta días/año con radicación estival, a diferencia de los destinos público e industrial, mucho más continuos (González et al., 2012).

b) su carácter complementario, que supedita la aplicación a la cantidad de lluvias que soportan el cultivo de secano, y por ende los volúmenes a utilizar en cada temporada.

c) retorno al subsuelo de buena parte de los caudales utilizados, pese a la continua mejora en la eficiencia. El problema principal estriba en la calidad del agua de reingreso, función de la racionalidad en el uso de agroquímicos.

Independientemente de que los impactos negativos de la práctica susceptibles de provocar conflictos, no parecerían por el momento de gran magnitud ni temporalmente próximos, se hace necesario adoptar una serie de precauciones que hacen al buen orden ambiental.

La más perentoria sería retomar la ejecución de estudios de evaluación cuali-cuantitativa de aguas subterráneas de alcance regional y suficiente continuidad, ya que los últimos (producidos por los ex-entes EASNE, CIAS y DYMAS) datan de 1975.

Para que los resultados de las investigaciones se traduzcan en acciones concretas, se hace necesario introducir cambios y actualizaciones en la Ley 12257 (Código de aguas de la Provincia de Buenos Aires), para instituir ciertas figuras como los perímetros de protección, sumamente eficaces para salvaguarda de los recursos hídricos subterráneos y prevención de conflictos entre aplicaciones a las distintas actividades socio-económicas.

Lógicamente, la necesidad mayor que engloba a las acciones que aquí se propugnan, es la adopción de verdaderas políticas de Estado respecto al uso y conservación de los recursos hídricos, con sus correlatos íntimamente relacionados de salud y educación, carentes también de dichas políticas directrices.

Conclusiones

En el ámbito de las cuencas de los ríos Areco y Arrecifes se está produciendo un acelerado incremento en la agricultura extensiva bajo riego de cereales y oleaginosas (Indec 2010), con perspectivas de futura competencia con los usos doméstico y agrícola.

Con el objeto de dimensionar la disponibilidad de agua, fueron estimadas tanto la recarga potencial máxima, como las reservas totales de los dos principales acuíferos de la región (Pampeano y Puelche) y las de explotación sustentable.

Para una aproximación a la recarga potencial, se utilizó el valor de infiltración del balance hídrico según la metodología de Thornthwaite-Mather, descontando a los excesos el escurrimiento fluvial. Fueron empleadas las estaciones climatológicas Junín, Rosario, Pergamino y Buenos Aires, de suficiente extensión, garantía y representatividad. El valor resultante fue de 1324 hm^3/año, considerando que la infiltración estimada por el balance es un monto bruto.

Las reservas acuíferas han sido estimadas como las de una capa libre para el Pampeano y de un confinado en el caso del Puelche, siguiendo el Principio de Parsimonia. Fueron las totales de 82036 hm^3 en el primer caso y 48695 hm^3 para el segundo.

Las reservas de explotación sustentable, dimensionadas con criterio conservativo, alcanzaron a 8116 hm^3 y 5516 hm^3, respectivamente.

Las hipótesis de conflictos de la aplicación agrícola de aguas subterráneas con otros usos, aparecen actualmente como potenciales y relativamente distantes.

Sin embargo, se producen aquí advertencias/recomendaciones sobre la imperiosa necesidad de estudios de evaluación cuali-cuantitativa de recursos hídricos

subterráneos con continuidad, y de introducción de figuras como las Áreas de Protección en el Código de Aguas provincial.

Agradecimientos

Al PROSAP por haber promovido los estudios de los cuales el tema abordado formó parte.

A la Asociación de Semilleros Argentinos (ASA) por el aporte de información específica.

Al Servicio Meteorológico Nacional, por brindar la información climatológica básica.

A la Lic. María Gabriela Calvetty por la expresión gráfica y el armado y operación de Sistema de Información Geográfica en el cual estuvo soportado el trabajo.

Referencias

Auge, M. P. y Hernández, M. A. 1983. Características Geohidrológicas de un acuífero semiconfinado (Puelche) en la llanura bonaerense. Su implicancia en el ciclo hidrológico de llanuras dilatadas. *Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras*.UNESCO, II: 1019-1042. Buenos Aires.

Auge, M.P., Hernández, M.A. y Hernández, L. 2002. Actualización del conocimiento del Acuífero semiconfinado Puelche en la Provincia de Buenos Aires - Argentina. *XXXII International Hydrogeology Congress. Proceedings*, 624-633. Mar del Plata.

Custodio, E. y Llamas, M. R. 2001. *Hidrología Subterránea*. Omega. Barcelona (2a Ed. corregida).

EASNE. 1972. Contribución al estudio geohidrológico del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. *CFI, Serie Técnica* No 24, La Plata.

Entelman, R. F. 2002. *Teoría de conflictos. Hacia un nuevo paradigma*. Gedisa. Barcelona.

Garduño, H. 1994. Uso Eficiente del Agua: Un enfoque multidimensional. En: H. Garduño y F. Arreguin-Cortes (eds.) *Uso eficiente del agua*. 15-24. IMTA. PHI-UNESCO-ORCYT. UNESCO.15-24.Montevideo.

González, N. 1973a. Evaluación preliminar de los recursos de aguas subterráneas de la cuenca del río Arrecifes. Provincia de Buenos Aires. Cátedra de Hidrogeología Fac. de Cs. Naturales y Museo UNLP-INCYTH. La Plata (ined.).

González, N. 1973b. Evaluación preliminar de los recursos de aguas subterráneas de las cuencas de arroyos del NE de la provincia de Buenos Aires. Cátedra de Hidrogeología Fac. de Cs. Naturales y Museo UNLP-INCYTH. La Plata (inédito).

González, N. 1998. La sustentablidad en el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos y las prácticas de riego. En: A. Fernández Cirelli (comp.) *Agua "Problemática regional"*. EUDEBA, 173-175. Buenos Aires.

González, N. y Hernández, M. A. 1997 La práctica del riego y el desarrollo sustentable en los acuíferos del Noroeste Bonaerense. *Congreso Internac. sobre Aguas.* UBA-AUGM-UNESCO, Resúmenes, I:55.Buenos Aires.

González, N. y Hernández, M. A. 1998. Impactos previsibles de la práctica del riego sobre los sistemas geohidrológicos. *Anales XVII Congreso Nac. del Agua. II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*, 3:64-70. Santa Fe.

González, N., L. Hernández, L. y Hernández, M. A. 2008. Conflicto entre las actividades usuarias de aguas subterráneas doméstica y agrícola en un sector de la llanura pampeana, Argentina. *IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea ALHSUD*. Ed. CD Rom y Libro de Resúmenes .Memorias, 51.Quito.

González, N., Trovatto, M.M., Alvarez, M. P. y Hernández, M. A. 2012. Empleo de aguas subterráneas para riego extensivo en la llanura bonaerense, Argentina. Competencia entre usos. *XI Congreso Latinoamericano de Hidrogeología ALHSUD*. Ed. CD Rom y Libro de Resúmenes .Memorias, 83.Cartagena de Indias.

INDEC. 2010. *Censo Nacional Agropecuario* 2008. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Buenos Aires. www.indec.gov.ar.

Thornthwaite, C. W., y Mather, J. R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. Publ. Climatol. 3 (10):183-311.

Tipificación de la dinámica del nivel freático en áreas medanosas del noreste de La Pampa, Argentina

Eduardo E. Mariño

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales- Universidad Nacional de La Pampa. Av. Uruguay 151, (6300) Santa Rosa, La Pampa, R. Argentina

Mail de contacto: emarinio@exactas.unlpam.edu.ar

RESUMEN

El trabajo aborda la tipificación de la dinámica del nivel freático en los acuíferos denominados "General Pico-Dorila" y "Speluzzi", a partir de la discriminación de patrones de fluctuación y su relación con índices pluviométricos. Se recopilaron registros freatimétricos, correspondientes a redes de medición ubicadas en la zona de recarga de ambos acuíferos, y se graficaron para intervalos entre junio de un año y mayo del siguiente, para el período 1978-2001, descartando los que no contaban con un mínimo de seis mediciones y al menos una en cada estación climática. De acuerdo la tendencia observada, cada intervalo se asignó a unos de los siguientes tipos: A (ascendente), D (descendente) y A1/D1 (ascendente o descendente con recuperación). El análisis concluyó en la identificación y sistematización de un conjunto de índices pluviométricos que configuran un criterio de tipificación. Este análisis permite explicar el comportamiento freatimétrico observado en 17 de los casos analizados.

Palabras clave: dinámica del nivel freático – tipificación- índices pluviométricos

ABSTRACT

Present paper focused on the analysis of the water-table dynamics in two aquifers called "General Pico-Dorila" y "Speluzzi", in the province of La Pampa. The characterization is based on the identification of patterns of fluctuations and their relationship with pluviometric indexes.

Measures of water-table deep from both aquifers were plotted for intervals from June to May for the period 1978-2001. According to observed tendency, the intervals were classified in the following types: A (ascending); D (descending) and A1/D1 (ascending or descending with seasonal recovery). Finally, a set of criteria was developed taking annual and seasonal pluviometric indexes as discriminant variables.This proposal is adequate to explain the piezometric behavior in 17 of the analyzed cases and it represent an attempt to generate a tool that improves the interpretation of data and provide relevant information for aquifers management.

Keywords: water-table fluctuations – characterization criteria – pluviometric indexes

Introducción

La gestión del acuífero que abastece a la ciudad de General Pico se ve comprometida por la necesidad de atender una demanda gradualmente creciente, con el agravante que durante la temporada estival se registran consumos excesivos que a veces llegan a provocar colapsos temporarios del sistema de provisión de agua potable (Mariño y Dalmaso, 2003). Esta explotación intensiva tiene consecuencias sobre el estado cuantitativo y cualitativo del recurso, como surge de los trabajos de Medus et al. (2005) y Abt et al. (2010 y 2011).

En ese marco, resultan importantes los controles periódicos que realizan la Administración Provincial del Agua y el concesionario del servicio, consistentes en la medición de la profundidad del nivel freático en una red de piezómetros y la colección y análisis de muestras de agua de los pozos de abastecimiento. Estas tareas generan valiosas series de datos que no siempre son adecuadamente aprovechadas para la toma de decisiones.

En tal sentido, este trabajo propone una tipificación de la dinámica del nivel freático en los acuíferos denominados "General Pico-Dorila" y "Speluzzi", a partir de la discriminación de patrones de fluctuación, y establece su relación con índices pluviométricos. De esta manera se pretende aportar una herramienta de análisis que brinde información relevante para la gestión del recurso.

Caracterización del área de estudio

El área de estudio está situada en el noreste de la provincia de La Pampa, donde se asienta General Pico que, por su número de habitantes, es la segunda ciudad de la provincia. Al SE y NO de ésta, se sitúan, respectivamente, las pequeñas localidades de Dorila y Speluzzi (Figura 1). El agua subterránea es la fuente exclusiva de abastecimiento para consumo humano de las poblaciones radicadas en el área y también para uso rural e industrial. En el caso de General Pico, de acuerdo con datos del año 2009, las conexiones ascendían a 22.200, con un consumo medio de 12.800 m^3/d (Abt et al., 2011).

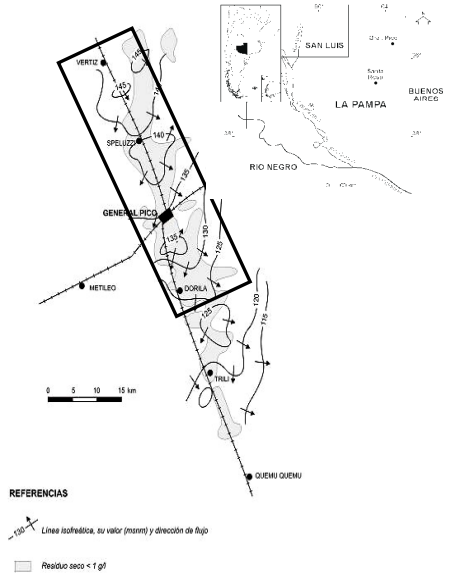


Figura 1. Ubicación y delimitación del área de estudio (modificado de Giai y Tullio, 1998)

Desde el punto de vista climático, el área está comprendida en la denominada "Región Hídrica Subhúmeda Seca" (Cano et al., 1980). De acuerdo con datos de General Pico, suministrados por la Administración Provincial del Agua, la precipitación media anual para el período 1921-2011 es de 729,4 mm (Fuente: www.apa.lapampa.gov.ar). La distribución mensual determina que la mayor pluviosidad estacional corresponde al verano, que acumula el 36% del total anual, mientras que el invierno es la estación menos lluviosa, con sólo el 8%. El 56% restante se distribuye equitativamente entre la primavera y el otoño.

Las características geomorfológicas de la zona permiten incluirla en la "Llanura Pampeana de Modelado Eólico Superimpuesto" (Calmels, 1996), cuyas geoformas resultaron de la acción de un proceso eólico, que depositó y modeló una cubierta arenosa de espesor variable. El relieve ondulado está dado por la alternancia de planicies arenosas y depresiones suaves, donde se destacan dos geoformas medanosas que se desarrollan hacia el NNO y SSE de General Pico.

Los aspectos geológicos del área de estudio fueron sintetizados por Giai y Gatto Cáceres (1996), en base a datos de perforaciones profundas realizadas por obras Sanitarias de la Nación. La secuencia sedimentaría está conformada por areniscas cuarzosas triásicas (265 a 235 mbbp) y continúa con unos 100 metros de arcillas verdes y grises oscuras atribuibles al Mioceno. Luego siguen 135 metros de limolitas y areniscas, con intercalaciones de arcilitas en los estratos basales, que hacia el techo presentan calcretes (Visconti et al., 2010). Esta sucesión se atribuye a la Formación Cerro Azul (Linares et al., 1980) de edad Mioceno Superior (Goin et al., 2000). En superficie, se encuentra una capa arenosa de espesor variable, de unos 10 metros en los cordones medanosos, constituida por arenas gruesas a medianas que hacia arriba pasan a arenas más finas con abundante vidrio volcánico (Malán, 1983).

Desde el punto de vista hidrogeológico, las areniscas triásicas se comportan como acuíferas y las arcilitas miocenas son acuicludas (Giai y Gatto Cáceres, 1996). Los sedimentos loéssicos de la Formación Cerro Azul y las arenas eólicas superiores constituyen un acuífero de tipo multicapa, que puede caracterizarse como libre con drenaje diferido. Según los ensayos de bombeo realizados en la zona por Malán (1980), para el acuífero alojado en el nivel arenoso superior la permeabilidad promedio es de 20 m/día, el rendimiento específico va de 0,11 a 0,17 y el espesor saturado oscila entre los 3 y 6,50 metros. En tanto que el acuitardo desarrollado en los sedimentos loéssicos posee una permeabilidad promedio de 2 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 2×10^{-3}.

El área de recarga preferencial coincide con los sectores medanosos, donde una divisoria de aguas subterráneas determina dos direcciones principales de flujo, E-SE y W-SW. La estimación de la recarga fue abordada en varios trabajos que la calcularon por diferentes metodologías y los resultados medios anuales

obtenidos variaron entre 60,8 y 138,5 mm (Mariño y Dalmaso, 2003).

Dentro del área descripta, Malán (1983) y Miglianelli (1984) delimitaron sectores donde las características hidroquímicas (principalmente residuo seco y concentraciones de fluoruro y arsénico) determinan la presencia de agua subterránea aceptable para consumo humano, hasta 25 m de profundidad. Estas "lentes" (Figura 1), asociadas a las geoformas medanosas, componen el acuífero denominado "Speluzzi - General Pico – Dorila - Trilí" (Giai y Tullio, 1998).

Metodología

Se recopilaron los registros piezométricos correspondientes a redes de medición ubicadas en la zona de recarga de ambos acuíferos, construidas y operadas por la Administración Provincial del Agua de La Pampa. Se seleccionaron intervalos entre junio de un año y mayo del siguiente, que contaran con un mínimo de seis mediciones y al menos una en cada estación climática.

En el acuífero "General Pico-Dorila" se analizaron 7 intervalos del período 1978-85, previo al comienzo de la explotación, mientras que en el acuífero "Speluzzi", que no está sometido a bombeos intensivos, se consideraron 11 intervalos del período 1985-2001 y se descartaron 5 por insuficiencia de datos. En ambos casos, se seleccionó el registro de uno de los pozos, atendiendo que no estuviera afectado por extracciones y resultara representativo del comportamiento del intervalo.

Las mediciones de la profundidad del nivel freático correspondientes a cada intervalo se representaron gráficamente y se probó su ajuste a una tendencia lineal. Los casos que pudieron ajustarse a una función creciente o decreciente, con un valor de R^2 mayor a 0,70, se clasificaron como A (ascendente) o D (descendente), respectivamente. Los intervalos que no logaron dicho ajuste se asignaron al tipo A1/D1 (ascendente o descendente con recuperación). Este último tipo representa intervalos que muestran una tendencia inicial descendente o fluctuante seguida de una recuperación, generalmente en otoño, que según su magnitud puede dar lugar a un ascenso (Tipo A1) o a un descenso neto (Tipo D1).

Para cada intervalo se calcularon un índice pluviométrico total (IPT) y los respectivos índices pluviométricos estacionales (IPE), tomando como referencia la serie 1921/2011 y se probó si operaban como discriminantes del comportamiento identificado gráficamente. Estos índices tienen la siguiente formulación:

$$IPTz = PTz / PM$$

donde:

IPTz es el índice pluviométrico total del intervalo z

PTz es la precipitación total del intervalo z (mm)

PM es la precipitación media de la serie considerada (mm)

$$IPExz = Pxz / PMx$$

Donde:

IPEx: es el índice pluviométrico estacional x en el intervalo z

Px es la precipitación de la estación x en el intervalo z (mm)

PMx es la precipitación media de la estación x en la serie considerada (mm)

Siendo x igual a:

i (invierno): comprende los meses de junio, julio y agosto

p (primavera): comprende los meses de septiembre, octubre y noviembre

v (verano): comprende los meses de diciembre, enero y febrero

o (otoño): comprende los meses de marzo abril y mayo

Resultados y discusión

En la tabla 1 se detalla el tipo correspondiente a cada intervalo según la tendencia de variación de la profundidad del nivel freático, identificada gráficamente (Figura 2). La distribución resultante para los 18 intervalos analizados es la siguiente: 2 son de tipo A; 6 son de tipo A1, 2 son de tipo D1 y los 8 restantes son de tipo D.

Si se analiza la relación entre el tipo asignado y los índices pluviométricos calculados, surge que:

a) El índice invernal no operaría como discriminante del comportamiento del nivel freático, ya que se registran intervalos con valores elevados de IPi que resultan tanto ascendentes (1985-86) como descendente (1979-80).

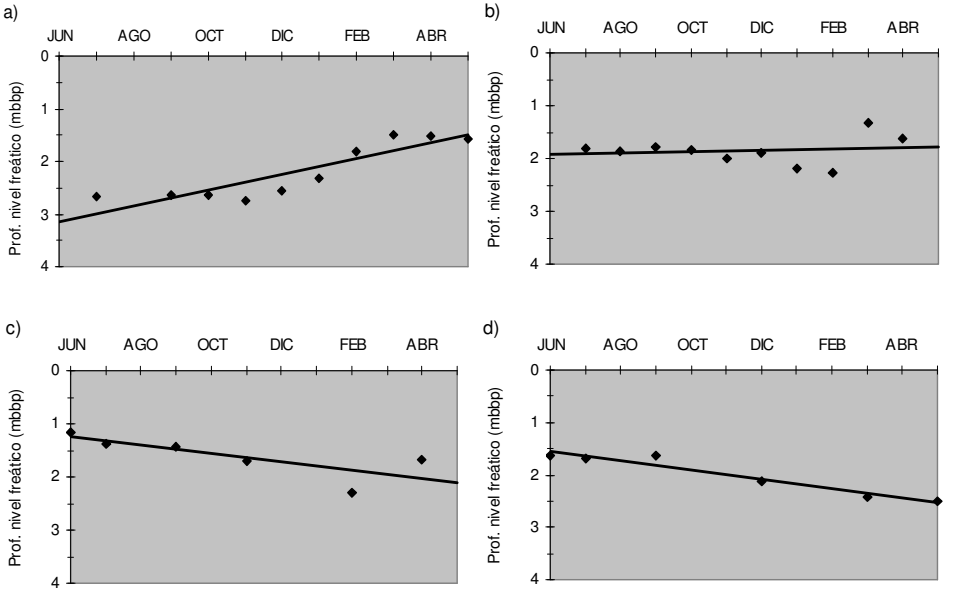


Figura 2. Intervalos representativos de los 4 tipos asignados: a) tipo A (1983/84), b) Tipo A1 (1986/87), c) tipo D1 (2000/01) y d) tipo D (1984/85)

Tabla 1. Tipificación de los intervalos de análisis y su relación con el índice pluviométrico anual y los respectivos índices estacionales. Δh es la fluctuación neta del nivel freático (m) y P es la precipitación total (mm)

Sitio	Intervalo	Tipo	Δh	P	IPT	IPEi	IPEp	IPEv	IPEo
General Pico	1978-79	A1	0,26	793,0	1,1	0,5	1,3	1,1	1,0
	1979-80	D	-0,49	783,7	1,1	1,9	0,8	1,1	1,1
	1980-81	A1	0,55	782,8	1,1	0,3	1,0	1,1	1,3
	1981-82	A1	0,26	902,7	1,2	0,5	1,2	1,0	1,8
	1982-83	D1	-0,35	766,3	1,1	0,6	1,0	1,2	0,9
	1983-84	A	1,11	937,2	1,3	1,4	0,9	2,3	0,4
	1984-85	D	-0,89	728,7	1,0	0,7	1,4	1,0	0,6
Speluzzi	1985-86	A	0,80	1290,1	1,8	3,0	1,7	1,8	1,5
	1986-87	A1	0,19	929,8	1,3	0,9	1,3	1,1	1,6
	1987-88	D	-0,55	782,1	1,1	1,6	1,1	1,0	1,0
	1988-89	D	-0,46	691,4	0,9	0,4	1,1	0,5	1,5
	1989-90	A1	0,31	816,0	1,1	1,8	0,5	0,8	2,0
	1990-91	D	-0,30	603,0	0,8	0,3	1,2	0,8	0,7
	1993-94	D	-0,84	739,5	1,0	0,6	1,5	1,0	0,7
	1994-95	D	-0,31	715,6	1,0	1,7	0,5	0,9	1,4
	1995-96	D	-0,42	736,3	1,0	0,2	0,7	1,2	1,3
	1998-99	A1	0,73	1090,2	1,5	0,7	1,3	1,3	2,2
	2000-01	D1	-0,53	914,5	1,3	0,6	1,3	0,6	2,3

b) Los intervalos con IPT menor o igual a 1, resultan descendentes mientras que son ascendentes si el valor supera 1,3. Sin embargo, este último valor umbral podría ser menor cuando el verano es muy lluvioso (IPv mayor o igual a 1,50), como ocurre en el intervalo 1983-84, cuando se registra el mayor ascenso neto de la serie (1,11 m).

c) Los intervalos con veranos secos respecto al promedio histórico (IPV menor o igual a 1,1) son descendentes, excepto cuando se registran otoños y/o primaveras con precipitaciones superiores, en más del 20%, a la media histórica estacional (IPp y/o IPo mayor o igual a 1,2), en cuyo caso resultan de tipo A1/D1.

d) Los intervalos con una condición estival intermedia entre los escenarios anteriores (IPv entre 1,1 y 1,5) son de tipo A cuando IPp y/o IPo son mayores o iguales a 1,2. En caso contrario corresponden al tipo A1/D1.

Los criterios anteriores, que se sistematizan en la tabla 2, permiten explicar, en 17 de los casos analizados, el tipo de comportamiento determinado gráficamente. El intervalo 1998-99 constituye la excepción, ya que la tendencia observada es de tipo A1, aunque registra índices pluviométricos propios del tipo A (IPT=1,5).

Tabla 2. Criterios para la tipificación de intervalos según su comportamiento freatimétrico.

IPT> 1,3			Tipo A
1,0< IPT ≤1,3	IPv≥1,5		Tipo A
	1,1<IPv <1,5	IPp y/o IPo≥1,20	Tipo A
		IPp y IPo<1,20	Tipo A1/ D1
	IPv≤1,1	IPp y/o IPo≥1,20	Tipo A1/D1
		IPp y IPo<1,20	Tipo D
IPT ≤1,0			Tipo D

Dado que el análisis se apoya en un razonamiento inductivo, su validez quedaría restringida al período y sitio de proveniencia de los datos utilizados. Sin embargo, podría llegar a extrapolarse a un área más extensa, ya que Giambelli et al. (2008) concluyeron que para el sector NE de la provincia de La Pampa se verifica una conducta regional en las fluctuaciones del nivel freático

Los valores extremos del IPT se aproximan a los umbrales de precipitación propuestos por Mariño y Dalmaso (2003) para construir tres escenarios de comportamiento del nivel freático, aunque en este trabajo se logra una mejor resolución para los intervalos con una situación intermedia.

Conclusiones

Se identificó y sistematizó un conjunto de índices pluviométricos que configuran un criterio para la tipificación de intervalos según su comportamiento freatimétrico. De esta manera, se pretende aportar una herramienta de análisis que suministre información relevante para la gestión de acuíferos.

Agradecimientos

El autor expresa su reconocimiento a la Administración Provincial del Aguas de La Pampa por la valiosa información suministrada para la elaboración de este trabajo.

Referencias

Abt, J.; Mariño E. E. y Mecca, J. C. 2010. Formulación de un indicador del estado de un sistema hidrogeológico. Su aplicación al acuífero de General Pico, La Pampa, Argentina. En Varni, M., I. Entraigas y L. Vives (Eds): *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura*. II: 695-699.

Abt, J.; Mariño E. E. y Mecca, J. C. 2011. Determinación de la variación del almacenamiento en el acuífero de General Pico, La Pampa, Argentina. *VII Congreso Argentino de Hidrogeología. Taller Hidrogeología Regional y Exploración Hidrogeológica*, 143-150, Salta.

Cano, E., Casagrande, G., Conti, H. A., Fernández, B., Hevia, R., Lea Plaza, J. C., Maldonado Pinedo, D., Martínez, H., Montes, M. A. y Peña Zubiate, C.A. 1980. *Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa-Clima, geomorfología, suelo y vegetación*. INTA-Gobierno de La Pampa-UNLPam, 493 p.

Calmels, A. P, 1996. *Bosquejo geomorfológico de la provincia de La Pampa*. Universidad Nacional de La Pampa, 110 p, Santa Rosa.

Giambelli, G., Mariño, E. E.y Martín, M. C. 2008. Dinámica del nivel freático en el noreste de La Pampa, Argentina. *IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. Quito, Ecuador.

Giai, S. B. y Gatto Cáceres**,** R. O. 1996. Ajuste de un modelo para registros freatimétricos mensuales en General Pico-La Pampa. *IV*

Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Actas 2: 221-227, La Plata.

Giai, S. B. y Tullio**,** J. O. 1998**.** Características de los principales acuíferos de la provincia de La Pampa. *Revista de la Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 12:51-68.

Goin, F., Montalvo, C. I. y Visconti, G. 2000. Los marsupiales (Mammalia) del Mioceno Superior de la Formación Cerro Azul (provincia de La Pampa, Argentina). *Estudios Geológicos*, 56(1-2): 101-126.

Linares, E., Llambías, E. J. y Latorre, C. O. 1980. Geología de la Provincia de La Pampa, República Argentina y geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas, *Revista de la Asociación Geológica. Argentina*, 35(1): 87-146.

Malán, J. M. 1980. Resumen sobre los principales aspectos geohidrológicos en el área Pico-Dorila y sus adyacencias, con determinación de las posibilidades de explotación de sus acuíferos para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de General Pico. Administración Provincial del Agua, Santa Rosa (inédito).

Malán, J. M. 1983. Estudio hidrogeológico para el abastecimiento de agua potable a la localidad de General Pico, departamento Maracó, provincia de La Pampa. Informe preliminar. *Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras*, Actas III: 1449-1457, Olavarría.

Mariño, E. E. y Dalmaso, M. G. 2003. Análisis de la información básica para la gestión del acuífero que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina. *Memorias del III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en Hidrología Subterránea*, Tomo 1: 209-218, Rosario.

Medus, M., Mariño E. E. y Schulz, C. J. 2005. Variación temporal de los contenidos de arsénico en la batería de pozos que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina. *Taller sobre arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento*, Actas: 73-81. Río Cuarto.

Miglianelli, C. H. 1984. Estudio hidrogeológico especial para la localidad de Speluzzi. Administración Provincial del Agua, 19 p., Santa Rosa (inédito).

Visconti, G., Melchor, R. N., Montalvo, C. I., Umazano, A. M. y de Elorriaga**,** E. E. 2010**.** Análisis litoestratigráfico de la Formación Cerro Azul (Mioceno Superior) en la provincia de La Pampa. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 67(2):257-265.

Funcionamiento del sistema hidrogeológico en el área del Sector Industrial Planificado de la localidad de Tornquist (Buenos Aires, Argentina)

Claudio Lexow[1,2], René Albouy[2], Jorge Carrica[2] y Daniela Lafont[2]

[1] PAID Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), Provincia de Buenos Aires, Argentina.
[2] Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur. San Juan 670, 8000 Bahía Blanca, Argentina.

Mail de contacto: lexow@uns.edu.ar

RESUMEN

Próximo a la localidad de Tornquist, se proyecta instalar un Sector Industrial Planificado (Ley N° 13744). Hidrológicamente se localiza en la cuenca superior del río Sauce Chico. La zona no saturada (ZNS) del área de estudio está caracterizada por sedimentos loéssicos y una capa de tosca prácticamente impermeable y discontinua en su techo. El acuífero freático se encuentra contenido en los Sedimentos Pampeanos. A fin de determinar la potencialidad de que un evento de contaminación afecte el subsuelo y el acuífero se evaluó, en primera instancia, la recarga en tránsito (Balshort V.3). Con el programa HYDRUS 2D/3D se consideró dicho vector de flujo para evaluar el transporte de solutos no reactivos y reactivos en la ZNS. Se definieron tiempos de tránsito lo suficientemente prolongados como para garantizar la degradación de las sustancias contaminantes. El sistema hidrogeológico presenta características físicas que admiten el desarrollo de ciertas actividades industriales en el sector.

Palabras clave: balance hidrológico, flujo no saturado, vulnerabilidad.

ABSTRACT

A Planned Industrial Sector (Law 13744) is projected to be installed near Tornquist city. Hydrologically is located in the Sauce Chico river basin. The vadose zone (VZ) of the studied area is characterized by loessic sediments and an impermeable and discontinuous layer of calcareous sediments at the upper portion. The phreatic aquifer is contained in the Sedimentos Pampeanos. To determine the potentially of a contamination event affecting the subsoil and the aquifer, the transit recharging was evaluated by Balshort V.3 program. To evaluate the transport of non-reactive and reactive solutes in the VZ, with HYDRUS 2D/3D program, the transit recharging was considered. Enough long transit times to warrant the pollutant degradation were defined. The physical characteristics of the hydrogeological system support the development of certain industrial activities in the studied area.

Keywords: water balance, unsaturated flow, vulnerability.

Introducción

La futura implantación de un parque industrial en proximidades de la localidad de Tornquist dentro del marco de la Ley 13.744, que establece el régimen de creación y funcionamiento de Agrupamientos Industriales en todo el territorio de la provincia de Buenos Aires, trajo aparejado el desarrollo de un proyecto de investigación. El mismo tiene por objetivos incrementar el conocimiento científico para la preservación del recurso hídrico subterráneo en el área, tomando como base la evaluación del riesgo de contaminación del acuífero por actividad industrial y determinar los potenciales focos de contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanas.

Estudios previos han permitido alcanzar un conocimiento fehaciente del comportamiento hidrológico e hidrogeológico a nivel de cuenca (Albouy, 1994 y 1997), como así también de otros aspectos hidrogeológicos (recarga, zona no saturada, suelos, etc.) que pueden ser extrapolables para toda la región pedemontana sudoccidental de las sierras Australes (Carrica, 1998; Lexow, 2002 y 2010).

El desarrollo actual de modernos y cada vez más complejos programas de computación para el cálculo de flujo y transporte de solutos en el medio no saturado, como es el caso del HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) entre otros, permite, a partir de un modelo conceptual hidrogeológico fidedigno, su implementación

como herramienta interpretativa. Utilizado de esta manera permite estudiar la dinámica del sistema, organizar datos de campo recavados y planificar futuras medidas a implementar tendientes a la preservación del recurso. El objetivo del presente trabajo es evaluar la potencialidad de contaminación del subsuelo y del acuífero en el sector del Parque Industrial Proyectado en proximidades a la localidad de Tornquist.

Características generales del área de estudio

El área de estudio (Figura 1) se ubica aproximadamente a unos 3 Km al NO de la localidad de Tornquist (Provincia de Buenos Aires, Argentina). El clima de la zona es subhúmedo, transicional a árido y de tipo mesotermal. Según Albouy (1997) presenta una precipitación media anual de 781,5 mm y una temperatura media anual de 14,7°C. Morfológicamente, el área corresponde a una llanura periserrana cuyo desarrollo areal está limitado hacia el N por los afloramientos cuarcíticos de las Sierras Australes. González Uriarte (1984) designa a estas cuarcitas como área de piedemonte. La misma, se eleva unos 300 msnm y presenta una baja pendiente topográfica (<5%). Los Sedimentos Pampeanos (Fidalgo et al., 1975), que se distribuyen en toda la llanura Chaco Pampeana, contienen al acuífero libre de la zona. Están constituidos por limos arenosos compactos con cemento de carbonato de calcio, que culminan con un manto de tosca discontinuo, de 1 a 3 m de espesor. Hidráulicamente conforman una alternancia de niveles acuíferos-acuitardos que se comportan como un sistema único de transmisión de agua. En inmediaciones de las sierras estos sedimentos se apoyan directamente sobre las cuarcitas paleozoicas y en el ambiente de llanura sobre arcillas marinas del Mioceno (Albouy, 1997). La zona de estudio se caracteriza por presentar una zona no saturada potente, de material loéssico que, en el ámbito de la cuenca aumenta progresivamente de espesor hacia el sur. Es frecuente encontrar afloramientos de la capa de tosca o bien soterrada por debajo de los suelos de la zona que conforman una asociación de Haplustoles típicos y petrocálcicos y Argiudoles típicos de textura limo-arcillosa (INTA, 1989). Los suelos Haplustoles petrocálcicos se ubican en las partes más altas donde la tosca subaflora, mientras que los Argiudoles sepultan a la topografía preexistente destacándose en los sectores más bajos.

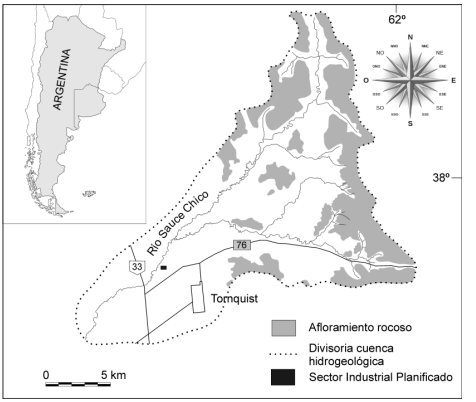


Figura 1. Cuenca superior del río Sauce Chico y ubicación del Sector Industrial Planificado.

Los niveles freáticos más someros (3-10 m) están relacionados a la proximidad de los cauces de la red superficial de agua. La capa acuífera se asemeja a un cuerpo que se acuña y cierra hacia sus bordes de cabecera y aumenta progresivamente de espesor en dirección a la llanura hasta alcanzar máximos de 200 m. En el sector de estudio la profundidad del nivel freático se encuentra entre 10 y 15m. La recarga (R) del acuífero freático se produce en forma preferencial en los sedimentos permeables modernos del piedemonte, pero también se verifica en toda la superficie de la cuenca, por infiltración directa del agua de lluvia. Representa en término medio una recarga del 15% de las precipitaciones (Albouy, 1997). El sentido general de circulación del flujo subterráneo es NE-SO convergiendo hacia el curso principal del río Sauce Chico y tributarios, lugar donde se produce la descarga natural del flujo local del acuífero.

Metodología

En primera instancia se elaboró el balance hidrológico diario del suelo para un período de 16 años por medio del programa Balshort V.3. (modificado de Carrica, 1993) a fin de determinar la recarga en tránsito, factor fundamental como condición del transporte de las substancias potencialmente contaminantes. Posteriormente con el programa HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) se consideró dicho vector de flujo para evaluar el transporte de solutos para la totalidad de la zona no saturada. El tratamiento más proteccionista, en cuanto a la toma de decisiones futuras en el control, fue considerar el transporte advectivo. También fueron evaluadas condiciones con carga hidráulica constante, que emulan pérdidas de

tanques o depósitos con diversos coeficientes de distribución o retardo. Se definieron tiempos de tránsito que fueron contrastados con las valoraciones de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (Albouy et al., 2012) previamente determinada para el sector.

Balance de agua en el suelo

El balance hidrológico, tanto a nivel regional o de cuenca como del suelo, sigue siendo el método más difundido y utilizado para el cálculo de recarga. El balance hidrológico del suelo en zonas áridas y semiáridas solo puede emplearse si se realiza a paso diario, puesto que, cuando la precipitación diaria (P) supera el valor de evapotranspiración diaria (ETR), da lugar a un exceso de agua factible de constituirse en recarga (Carrica, 2009; Healy, 2010). Además, en estas zonas las lluvias, si bien son ocasionales, suelen ser de corta duración e intensas, lo cual favorece la situación antes mencionada.

Para el cálculo del balance hidrológico diario del suelo se aplicó el programa Balshort V.3. (Carrica, 1993) que utiliza datos diarios de P y calcula la ETR diaria en función de la evapotranspiración potencial diaria (ETP), la humedad del suelo y la textura del suelo. Dispone de tres funciones básicas que relacionan la ETR/ETP con la humedad antecedente y la textura de los suelos, resaltando la importancia de la retención de agua en función de ésta. El programa también estima la interceptación vegetal (Iv) basándose en el método de Horton para cuatro cultivos básicos. Limita el valor de Iv a 5 mm diarios, sobre la base conceptual que la interceptación alcanza un valor final constante que depende de la capacidad de almacenamiento del dosel vegetal y es independiente de la cantidad de lluvia caída (Linsley et al., 1982; López Rodríguez y Giraldez Cervera, 1997). En el presente estudio se asumió una cobertura vegetal (pastos) de 30 cm de altura.

Los valores de infiltración básica obtenidos en estos suelos fueron de 16 y 22 mm/hora (Carrica, 1998). Burgos y Forte Lay (1978) determinaron capacidades de campo entre 152 y 169 mm en un Haplustol petrocálcico de 60 cm de profundidad y textura franca en los alrededores de Tornquist. Carrica (1998) estimó una capacidad de almacenaje media de éstos suelos en 160 mm para la vecina cuenca superior del Aº Napostá Grande, valor que se utilizó como parámetro para el cálculo de los excesos de agua del suelo estudiado.

Los balances diarios se plantearon para un período de 16 años (1997-2012) durante el cual existen registros pluviométricos continuos de la localidad de Tornquist. La evapotranspiración potencial (ETP) mensual se calculó con la fórmula de Penman - Monteith (FAO, 1993) a partir de los datos recolectados de una estación meteorológica propia instalada en la cuenca del Aº del Aguila, ubicada a unos 20 Km al SE de Tornquist (Carrica y Lexow, 2004).

Modelo de simulación HYDRUS 2D/3D

El flujo de agua y transporte de solutos en la ZNS se simuló mediante la aplicación del código HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) que es ejecutable en ambiente Windows. Es un modelo de elementos finitos que resuelve numéricamente, en dos dimensiones, las ecuaciones de Richards para el flujo de agua en el medio no saturado - saturado y las ecuaciones de Fick (advección – dispersión) para el transporte de calor y solutos. La ecuación de flujo incluye un término sumidero que hace referencia a la extracción de agua por parte de las raíces de las plantas. Para la aplicación del método de elementos finitos para resolver las ecuaciones de flujo y transporte se emplea el método Galerkin a partir de las condiciones iniciales y de contorno definidas por el usuario.

Se construyó un dominio geométrico de 800 cm de ancho y de 800 cm de altura (Figura 2). La malla de elementos finitos consistió en 435 nodos y 804 elementos triangulares de un tamaño medio específico de 50 cm. Se distinguieron dos materiales cuyos espesores se han señalado precedentemente y sus propiedades físicas y químicas se asumen uniformes dentro de cada uno. Los valores de los parámetros hidráulicos (humedad residual θ_r, humedad en saturación θ_s, α y n parámetros empíricos condicionantes de la forma de la curva de retención y K_s permeabilidad saturada) calculados por medio de la función de pedotransferencia *Rosetta*, suministrada por el mismo programa se presentan en la Tabla 1. Dichas estimaciones fueron comparadas con datos de campo en terrenos de características similares (Lexow y Bonorino, 2003; Lexow, 2010).

Tabla 1. Parámetros hidráulicos.

Capa	θ_r	θ_s	α (cm^{-1})	n	K_s (cm/d)
1	0,072	0,50	0,0075	1,56	101,2
2	0,078	0,43	0,036	1,56	24,9

De manera tal que se represente conceptualmente la realidad del sector, se

demarcó arbitrariamente la capa de tosca de características irregulares en su forma y discontinua en su expresión lateral, entre los 1 y 2,5 m de profundidad (Figura 2). La permeabilidad nula, que obedece a la fuerte cementación de carbonato, se aplicó por medio de la valoración en cero de las componentes primera y segunda de anisotropía local de los respectivos elementos finitos.

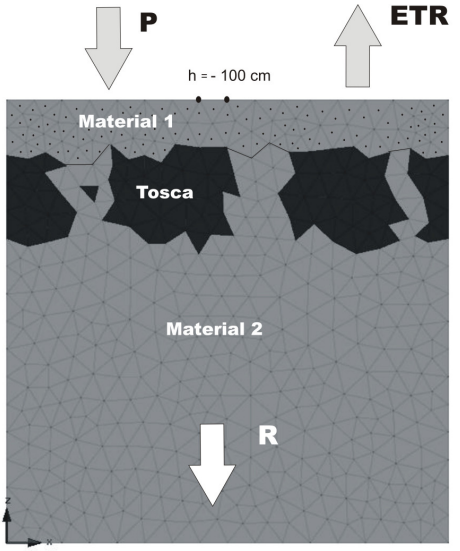


Figura 2.Representación del modelo conceptual del sistema subsuperficial.

El período de simulación consistió en 5844 días. La discretización del tiempo fue la siguiente: paso de tiempo inicial de 0,0001 (día), paso mínimo $1e^{-005}$ (día) y máximo 1 (día) (brindados por defecto por el programa).

Las funciones hidráulicas del suelo fueron estimadas según el modelo de van Genuchten-Mualem, una de las alternativas que brinda el programa, sin considerar el fenómeno de histéresis.

Las condiciones de contorno para el flujo de agua se establecieron con el límite superior del modelo, superficie del suelo, dependiente de las condiciones atmosféricas, variable en el tiempo, dominado por las precipitaciones diarias medidas y la evapotranspiración potencial de referencia estimada. Solo para las simulaciones de transporte de solutos se seleccionaron dos nodos (7 y 8) que actúan como un sitio de carga constante, humedad entre saturación y capacidad de campo (h = -100 cm) (Figura 2) que representa la pérdida o filtración de algún depósito en superficie.

A partir de las observaciones de campo se estableció la existencia de vegetación herbácea con una profundidad máxima de raíz de 30 cm, a partir de las observaciones de campo, y para el cálculo de la extracción de agua, término sumidero, se aplicó el modelo de Feddes et al. (1978, en Simunek et al., 2006) que es una de las opciones que proporciona el mismo programa.

Los límites laterales son nodos con ausencia de flujo, mientras que la superficie inferior (z = 0) se estableció como un límite de drenaje libre a fin de poder ajustar con precisión la valoración de la recarga en tránsito.

En función de estudios previos (Lexow, 2010) y dado que el programa HYDRUS 2D/3D no considera la interceptación vegetal, se ajustó un porcentaje de cobertura vegetal del 57%, de manera tal que los resultados de ETR calculados sean compatibles con la ETR más la intercepción vegetal considerada en el programa Balshort V.3.

Para el cálculo del flujo advectivo se consideró el transporte de partículas que es un método que calcula el movimiento sin dispersión de las partículas de agua a través de un sistema de flujo subterráneo simulado. El modelo de transporte de partículas calcula la posición de una partícula en la zona no saturada después de algún periodo de tiempo, usando la distribución del campo de velocidades del flujo subterráneo, determinada por el modelo de flujo. Las líneas de la trayectoria de las partículas imaginarias que se mueven a través del sistema de flujo simulado son denominadas líneas de flujo.

El coeficiente de distribución (K_d) no es constante y depende fundamentalmente del tipo de suelo, sobre todo del contenido de materia orgánica y de arcillas, y de la velocidad de flujo. Es de suma importancia en el transporte reactivo, representando el término fuente sumidero, y explica la diferencia de desplazamiento entre dichos elementos o sustancias con respecto a la velocidad del agua. Para simular el transporte de sustancias con comportamiento advectivo y reactivo se consideraron valores de $K_d = 0$ y $K_d = 2$, respectivamente. Este último coeficiente se seleccionó como representativo, a partir de diversas publicaciones, tanto de metales (Hostetler y Erikson, 1993; Ambrose, 1999) como de sustancias orgánicas (Vrba y Romijn, 1986; Beltrán et al., 1995; Montgomery, 1996). Aunque estudios en terrenos similares han definido para ciertos elementos valores mucho

más elevados, por ejemplo Zn, K_d = 19,5 (Mascioli et al., 2005) y glifosato, K_d = 43 (Lexow et al., 2005).

A los nodos 7 y 8 del borde superior (Figura 2) se les asignó una carga hidráulica constante (h = -100 cm) y un aporte (pulso) constante de 1 mmol/cm^3 durante todo el período de simulación (t = 365 d). Las condiciones de borde para el transporte de soluto son del tercer tipo, indicadas para estos casos por el programa, pues representan condiciones físicamente más reales y preservan la masa del soluto en el sistema simulado (Simunek et al., 2006). Durante el año de simulación del transporte de soluto el resto de los nodos del borde superior se establecieron dependientes de las condiciones atmosféricas.

Resultados

Balance de agua en el suelo

Los resultados del balance hidrológico diario y seriado del suelo en valores anualizados promedio son: P = 723,9 mm; Interceptación vegetal = 42,9 mm; ETR = 673,0 mm; R = 51,9 mm (7,2 % de la lluvia); Variación de la reserva ~ 0. Los años con los valores de R extremos de la serie resultaron ser el 2001 con P = 1186 mm y un valor de R = 209,9 mm (18% de P) y en el año 2005 con P = 495 mm y R = 0 mm (0% de la P).

Flujo en la zona no saturada

En esta etapa el objetivo fue ajustar el valor de la R en tránsito para definir al mismo como vector de flujo condicionante de la movilidad de solutos en la ZNS bajo condiciones sin carga hidráulica adicional. El resultado hidrológico de la interacción de los parámetros impuestos al sistema, las condiciones de borde y, fundamentalmente las entradas (P) y salidas de agua (ETR) por el condicionamiento atmosférico se encuentra representado en la Figura 3. El total de lluvia acumulada es de 11.589 mm mientras que la R alcanza, para todo el período, 682 mm, que representando un 5,8% de la P. Equivale a un flujo anual promedio que atraviesa el límite inferior (drenaje libre) de aproximadamente 0,043 m^3/m^2.

El flujo no saturado advectivo se calculó a partir de la incorporación de dos partículas de flujo en los nodos 155 (x: 254 cm, z: 760 cm) y 265 (x: 481 cm, z: 761 cm), prácticamente a 40 cm de profundidad, algo por debajo del límite de la franja de acción radicular. Las posiciones (x) fueron arbitrarias, una de ellas por sobre una porción impermeable de la capa de tosca, y la otra sobre uno de los sectores donde la tosca está ausente.

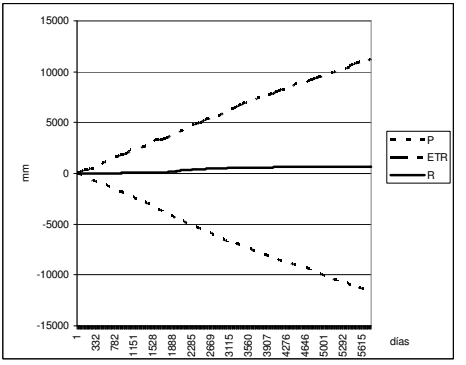


Figura 3. Flujos acumulados de entrada (Precipitación) y salidas (Evapotranspiración real y Recarga) del sistema.

Para la totalidad del período de simulación (t = 5844 días) la primera de las partículas se desplazó sobre el eje vertical 185 cm, aunque gran parte del tiempo se movilizó por sobre la capa de tosca. La velocidad media de la partícula, con respecto de z, fue de v = 0,03 cm/d. La segunda partícula recorrió prácticamente todo el trayecto en sentido vertical y alcanzó a transitar una distancia de 550 cm, lo que representa una velocidad media v = 0,09 cm/d. Asumiendo un espesor aproximado de 15 m de la ZNS del sector, el tiempo de tránsito, si se considera solo el flujo advectivo, sería de 45,6 años.

Transporte de solutos en la zona no saturada

Puesto que el tipo de industrias que se pretenden radicar en el parque industrial corresponden a un amplio espectro de actividades (alimenticia, construcción, textil y maderera) y de bajo impacto (fábricas de embutidos y chacinados, cemento y hormigón, ropa blanca, muebles, etc.), la evaluación de basó sobre el supuesto de pérdidas a partir de cañerías o depósitos superficiales de sustancias probablemente asociadas a las mismas. Con el propósito de cubrir el amplio espectro de posibilidades se simuló el transporte de sustancias no reactivas o conservativas (cloruros, nitratos) así como también de sustancias reactivas disueltas en agua (solventes, combustibles, metales, etc.).

Transporte de sustancias no reactivas

En el caso del transporte de una sustancia no reactiva o conservativa, es decir que no se ve afectada por el proceso de adsorción sobre las partículas sólidas (K_d = 0), se podría considerar como ejemplo el del ión nitrato en un ambiente oxidante. Físicamente, se planteó una pérdida o filtración de un depósito en superficie que, a partir de los nodos seleccionados, generaría una porción de terreno donde el contenido de humedad es constante, entre la saturación y capacidad de campo (h = -100 cm), mientras que el resto de la superficie está bajo las condiciones atmosféricas variables. Para la simulación (t = 365 d) se utilizó, por defecto, para ambos sedimentos de la ZNS, una dispersividad longitudinal y transversal igual a 0,5 y 0,1 cm respectivamente.

El desarrollo alcanzado por la pluma de soluto en la ZNS para el tiempo de simulación t = 139 d se muestra en la Figura 4. Se observa que el soluto se desplazó parcialmente sobre la capa de tosca y comenzó a moverse hacia abajo conformando dos plumas o frentes condicionados por las "ventanas" definidas en la tosca. Debido al proceso de dispersión la llegada de las primeras manifestaciones del soluto alcanzan los 8 m de profundidad a los 139 días.

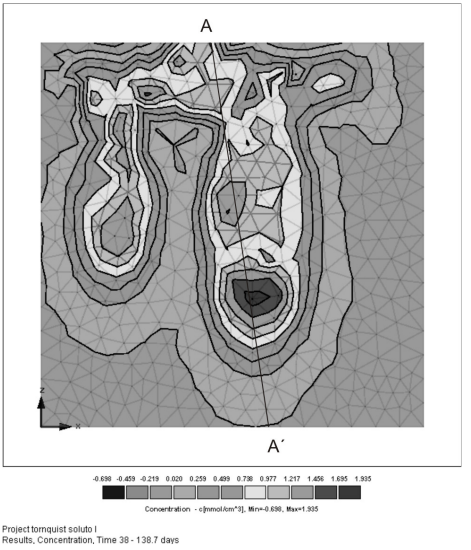


Figura 4. Distribución del soluto no reactivo en el entorno simulado (t = 139 d).

Un perfil vertical A-A´ indicado en la Figura 5 denota la expresión longitudinal y permite visualizar la distribución de concentración c(z) desde el punto de aplicación (1 mmol/cm^3) hasta el límite inferior del entorno simulado para ese tiempo (Figura 4).

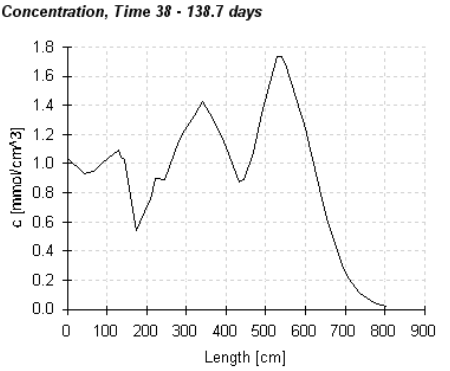


Figura 5. Perfil A-A´ de concentración del soluto (t = 139 d).

El pico máximo de concentración alcanzó la profundidad de 8 m para t = 222 días (Figura 6).

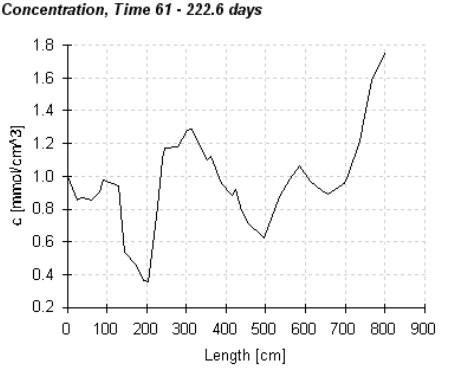


Figura 6. Perfil A-A´ de concentración del soluto (t = 222 d).

Transporte de sustancias reactivas

Para esta circunstancia y al igual que el caso anterior se consideró una condición de carga constante (h = -100 cm) en los nodos 7 y 8, mientras que el resto de los nodos continúan bajo condiciones atmosféricas. Para la simulación ($t_{máx}$ = 365 d) se utilizaron para ambos tipos de sedimentos los mismos parámetros de dispersividad longitudinal y transversal pero un coeficiente de partición K_d = 2, correspondiente a una sustancia que es

afectada por el proceso de adsorción-desorción y de naturaleza variable.

La simulación muestra (Figura 7) como al cabo de los 365 días el soluto alcanza, debido al proceso de dispersión, una profundidad de 3,5 m (Figura 7). El pico de máxima concentración se presenta alrededor de los 2 m de profundidad. Esta movilidad se observa en la zona donde la tosca está ausente, por el contrario hacia el sector izquierdo de la figura, la masa de soluto aún permanece por sobre la capa de menor permeabilidad.

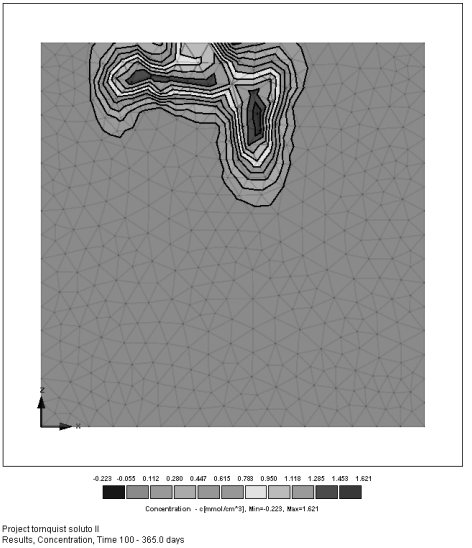


Figura 7. Distribución del soluto reactivo en el entorno simulado (t = 365 d).

Las determinaciones de los índices de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación realizadas en el área, señalan para el sector una valoración moderada según el método GOD (Albouy et al., 2012). Considerando el concepto de Foster et al. (2002) con respecto a la determinación del peligro de contaminación de un acuífero a la contaminación, cabe mencionar, que el mismo será cuantificado metodológicamente una vez definidas las actividades industriales específicas a implementar en el sitio.

Es importante destacar que pueden tener lugar cambios marcados en el comportamiento de algunos contaminantes, si la actividad genera suficiente carga orgánica o condiciones ácidas para producir una variación significativa en el Eh o pH del sector. También es significativo resaltar que, para el caso de contaminantes persistentes y móviles, la ZNS provocará un retardo significativo en su llegada al acuífero freático, pero sin ninguna atenuación beneficiosa.

Conclusiones

Los parámetros físicos, hidrológicos, hidráulicos y coeficientes empíricos utilizados en los programas Balshort V.3. (fase atmosférica del ciclo hidrológico) e HYDRUS 2D/3D para la simulación del flujo en la ZNS, ponen en evidencia la baja probabilidad que un contaminante, aún conservativo, alcance el acuífero freático subyacente.

La importancia ambiental de garantizar la implantación de un sector industrial planificado radica no solo en la potencialidad de crecimiento socioeconómico implícito, sino además, en la protección del acuífero freático, eventual fuente de abastecimiento de agua.

Referencias

Albouy, R., 1994. Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. *Tesis Doctoral.* UNS. Bahía Blanca. 140 p. y anexos. (Inédita).

Albouy, R., 1997. Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 52 (1): 81-92.

Albouy, R., D. Lafont y G. Bonorino, 2012. Protección del recurso hídrico subterráneo: evaluación preliminar en el área de Tornquist (Argentina). XI Congreso Hidrogeológico Latinoamericano. Cartagena de Indias, Colombia. Memorias/Resúmenes Extendidos en CD.

Ambrose, R.B., 1999. Partition coefficients for metals in surface waters, soil and waste. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. Hydrogeologic Inc., 74 p.

Beltrán, J., Morell I. y Hernández, F., 1995. Estudios de adsorción de plaguicidas en suelos mediante experiencias de adsorción en columnas. En: *Avances en la Investigación de la Zona No Saturada*. Ed. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 269-279 pp.

Burgos J. y Forte Lay, J., 1978. Capacidad de almacenaje de agua en los suelos de la región pampeana. *Taller argentino - estadounidense sobre sequías*. CONICET. Mar del Plata. Ed. J. Burgos, 122-143 pp.

Carrica J., 1993. Balshort: Un programa de balance hidrológico diario del suelo aplicado a la región sudoccidental pampeana. XII

Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas Tomo VI: 243-248.

Carrica, J., 1998. Hidrogeología de la cuenca del Arroyo Napostá Grande, Provincia de Buenos Aires. *Tesis Doctoral.* UNS. Bahía Blanca. 215 p. y anexos. (Inédita).

Carrica J., 2009. Cálculo de la recarga en zonas áridas y semiáridas. *Recarga de Acuíferos. Aspectos generales y particularidades en regiones áridas*. Carrica, J., Hernández, M. y Mariño, E. (Eds). AIH-Fac. Exactas y Naturales UNLPam. 71-80.

Carrica, J.C. y Lexow, C., 2004. Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del Arroyo Napostá Grande, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 59 (2): 281-290.

F.A.O., 1993. CropWat. Riego y Drenaje Nro. 46. 215 p.

Fidalgo, F., De Franceso, F. y Pascual, R., 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense. VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires: 103-108. Buenos Aires.

Foster, S., Hirata, R., Gómez, D., D´Elia, M. y Paris, M., 2002. Groundwater quality protection. A guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. GW.MATE. 25071. The World Bank Washington, D.C. 103 pp.

González Uriarte, M., 1984. Características geomorfológicas de la porción continental que rodea a la Bahía Blanca. IX Congreso Geológico Argentino (III): 556-576. San Carlos de Bariloche, Argentina.

Healy, R.W., 2010. Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press. United Kingdom. 245 p.

Hostetler, Ch.J. y Erikson, R.L., 1993. Coupling of speciation and transport models. *Metals in Groundwater* (Allen, Perdue, Brown, Eds.) Lewis Publishers, 173-208 pp.

INTA, 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Edipubli S.A. Talleres Gráficos. Buenos Aires. 525 pp.

Lexow, C., 2002. Hidrodinámica de la zona no saturada aplicada al estudio del balance hidrológico y de contaminantes de los recursos hídricos subterráneos (Cuenca del Aº del Águila). *Tesis Doctoral.* UNS. Bahía Blanca. 174 p. y anexos. (Inédita).

Lexow, C., 2010. Distribución del agua en un suelo Hapludol: manejo del código Hydrus 2D/3D en la modelación del flujo no saturado. *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras.* (Eds. M. Varni, I. Extraigas, L. Vives) Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. E. Usunoff (1): 279-286.

Lexow, C. y Bonorino, A.G., 2003. Análisis del flujo no saturado en la zona no saturada loéssica por medio de un trazador conservativo. *GEOACTA*, Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, 28:1-7.

Lexow, C., Morell, I. y Bonorino, A.G., 2005. Glyphosate mobility in piedmont soils of the austral ranges in the south of the Buenos Aires province. *Groundwater and Human Development* (E. Bocanegra, M. Hernández, E. Usunoff, Eds.). International Association of Hydrogeologist Selected Papers. BALKEMA Publishers, The Netherlands (6), Chapter 16: 199-206.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L., 1982. Hydrology for Engineers (3ed Ed.). Ed McGraw Hill, New York. 508 p.

López Rodríguez, J.J. y Giráldez Cervera, J.V., 1997. Evaluación de la modificación de la recarga por cambios en la cobertura vegetal. En: *La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. AIH-GE, Las Palmas de Gran Canaria, 209-227 pp.

Mascioli, S., Martínez, D. y Bocanegra, E., 2005. Determinación del coeficiente de partición de Zn en sedimentos loessicos y su utilización en la simulación de transporte reactivo. IV Congreso Argentino de Hidrogeología, Actas I: 221-230.

Montgomery, J.H., 1996. Groundwater Chemicals desk reference. Lewis Publishers, Second editions. 1345 p.

Simunek, J., van Genuchten, M. Th. and Sejna, M., 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Technical Manual, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, pp. 241.

Vrba, J. y Romijn, E., 1986. Impact of agricultural activities on groundwater. International Association of Hydrogeologist – Hannover: Heise. (Castany, Groba, Romijn Eds). Vol. 5, 332 p.

Dinámica freática de la llanura aluvial en los alrededores de la ciudad de Neuquén, Argentina

Patricia Laurencena [1,2], Eduardo Kruse [1,3] y Marta Deluchi [1,2]

1. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. 64 N°3 La Plata (1900) Argentina
2. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.
3. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

Mail de contacto: plaurencena@hotmail.com

RESUMEN

El área de estudio, que comprende un sector del valle inferior del Río Limay, está caracterizada por un importante desarrollo socioeconómico basado en el cultivo de frutales, lo cual se sustenta en el riego a través de canales. El objetivo del trabajo fue evaluar las características de las curvas de agotamiento de los hidrogramas de los niveles freáticos en una zona llana de clima árido-semiárido. Se analizaron las variaciones freáticas mensuales del período 2003 – 2005. En mayo cesa el riego y no existen aportes al acuífero produciéndose una rápida profundización de los niveles freáticos hasta agosto. La disminución de las reservas en el acuífero freático es de 0.98 hm^3 en los meses de mayo y junio y de 0.53 hm^3 para julio. El conocimiento de las particularidades de la curva de agotamiento contribuye a caracterizar la dinámica del agua subterránea en este tipo de ambientes bajo riego, lo cual permitirá lograr a futuro mayor eficiencia en el manejo de los recursos hídricos de la región

Palabras clave: Rio Limay, variaciones freáticas, descarga subterránea.

ABSTRACT

The present work involves the lower valley of the Limay River in Neuquen Province, known by a well developed fruit agricultural economy based on intense irrigation through a channel network. The general objective of the present study is to evaluate the characteristics of the phreatic depletion hydrogram curves in a flat area under irrigation in a arid/semiarid climate. The monthly phreatic variations were analysed within the period 2003-2005. As the irrigation ceases in May and no external influxes to the aquifer exist, the phreatic levels deepen rapidly through August. The phreatic aquifer reserves decline is of 0.98 hm^3 in May and June and 0.53 hm^3 in July. The knowledge of the signatures of depletion curves helps to characterize the groundwater dynamics in arid climates under irrigation and contributes to optimize the hydric resources in the future.

Keywords: aquifer depletion, Limay River, phreatic variations, groundwater discharge.

Introducción

El objetivo de este trabajo fue reconocer la dinámica freática y caracterizar las curvas de agotamiento de los hidrogramas de los niveles freáticos en una zona llana sometida a riego bajo un clima árido-semiárido.

La dinámica del acuífero se encuentra relacionada con las particularidades que presenta el riego, ya que constituye el componente principal de la recarga. (Galeazzi et al, 2007).

En la cuenca inferior del río Limay, entre las localidades de Neuquén y Plottier, el río y su amplia planicie de inundación constituyen el rasgo geomórfico preponderante en el paisaje.

Desde principios del siglo XX existe en la zona una red extensa de canales de riego, con agua derivada del Río Limay, que excepto en los meses de invierno se encuentran en permanente funcionamiento. Su finalidad es la provisión de agua necesaria para la importante explotación frutihortícola que se desarrolla en el área. El régimen hidrológico del río se encuentra modificado por obras de regulación que aseguran la disponibilidad de agua para riego y abastecimiento de agua potable. En la zona de cultivos se puede apreciar la influencia del riego en las fluctuaciones de los niveles freáticos. El aporte por precipitaciones es escaso dadas las características áridas del clima en la región.

El conocimiento de la variaciones de los niveles freáticos permite la utilización de métodos para el cálculo de la recarga y descarga de acuíferos. La rapidez en la que descienden los niveles es directamente

proporcional al gradiente hídrico inicial y a la conductividad hidráulica del medio e inversamente proporcional a la porosidad efectiva y a la extensión del acuífero. (Custodio, 1983)

El caudal de descarga de un acuífero es definido por la conductividad hidráulica (k) y por el gradiente hídrico. Si el área y k son constantes, cuanto mayor sea el gradiente, mayor será el caudal drenado. Al no existir recarga, dicho caudal disminuirá progresivamente en función de la disminución del gradiente hídrico.

Características generales del área

El área de estudio ocupa una superficie de aproximadamente 55 km^2 en la planicie aluvial del sector inferior del Río Limay. Se encuentra limitada al norte por una planicie suavemente ondulada y sobreelevada denominada localmente barda, y hacia el sur por el valle del Rio Limay. En la llanura aluvial se desarrollan cultivos y las áreas urbanas de Neuquén y Plottier que constituyen los límites este y oeste de la zona analizada (Fig. 1)

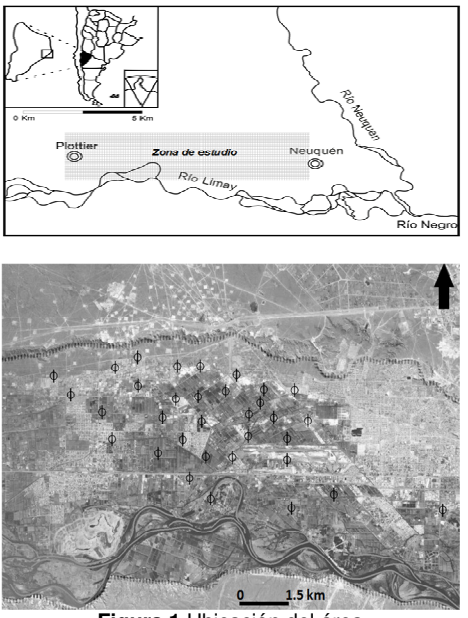


Figura 1 Ubicación del área

El clima es árido y según la clasificación de Thornthwaite presenta un carácter mesotermal con nulo exceso de agua. La temperatura media anual es de 14,5ºC. La precipitación media en Neuquén en el período 1900 - 2008 es de 207 mm/año, registrándose fuertes variaciones anuales desde un máximo de 358 mm/año hasta un mínimo de 65mm/año".

Materiales y métodos

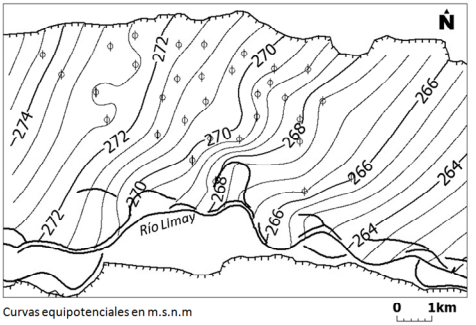
Se han analizado las variaciones mensuales de los niveles freáticos medidos en una red de monitoreo de 50 pozos, en el período 2003 – 2005. El año hidrológico se desarrolla a partir de agosto en que se registran las mínimas alturas equipotenciales, que alcanzan su máximo valor en octubre. Se ha considerado el periodo de descarga del sistema acuífero, a partir de la suspensión del riego (abril), incluyendo los meses de mayo, junio, julio y agosto. Se realizaron los mapas equipotenciales para cada mes y se calculó el caudal unitario en función de la ley de Darcy. Se realizaron mapas de isovariación y se calcularon los volúmenes de descarga.

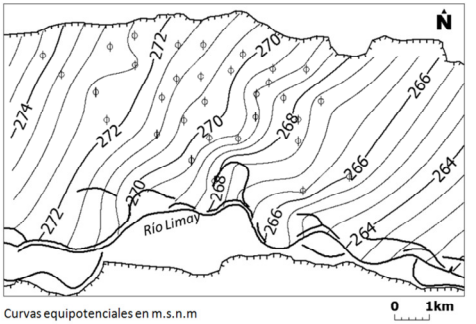
Hidrogeología

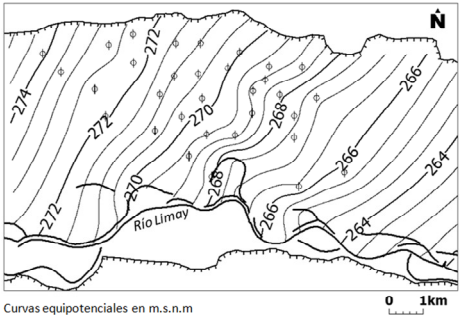
El acuífero freático se desarrolla en el manto aluvial de gravas, que presenta un espesor medio que varía entre 10 y 12 m. Los límites de este nivel acuífero tanto en su base como en el borde norte lo constituyen arcilitas rojizas y areniscas correspondientes al Grupo Neuquén y son de características acuícludos – acuitardos con algunos niveles de acuíferos pobres. La planicie aluvial se caracteriza por una alta capacidad de infiltración, que puede superar los 10 cm/hora. (Socic, 1978)

El manto aluvial posee una alta capacidad de almacenamiento y de transmisión de agua de acuerdo a las características litológicas e hidráulicas. La transmisividad media es el orden de 1000 m^2/día, lo cual representa una conductividad hidráulica de aproximadamente 100 m/día. La porosidad efectiva estimada es superior a 12%. (Laurencena et al 2009) El sentido general de escurrimiento es noroeste – sudeste, descargando parte como efluencia subterránea del área y parte en el valle actual del Río Limay. Los gradientes hídricos son homogéneos alcanzando valores medios del orden de $9{,}6\times10^{-4}$, con máximos de 1.0×10^{-3} y mínimos de 5.5×10^{-4}. La recarga del sistema es alóctona indirecta a partir del riego.

La morfología de la superficie potenciométrica es de tipo radial con tendencia a formas planares con filetes subparalelos (Fig 2)







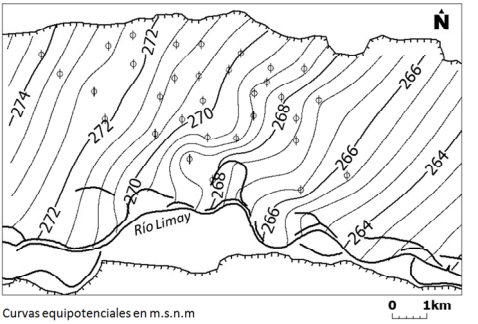


Figura 2 Mapas equipotenciales para los meses mayo, junio, julio y agosto.

En la variación de los niveles freáticos se ha observado que los pozos cercanos al sector de la barda no se ven afectados por el riego. En cambio, los niveles en el sector central evidencian que la recarga es producida por la derivación de los caudales del Río Limay a través de los canales de riego. Un pozo situado en las proximidades del río, si bien responde al aporte del riego se encuentra más afectado por las variaciones del nivel de agua del río. (Laurencena et al 2011). Las características químicas acompañan la dinámica del sistema subterráneo. El sector cercano a la barda contiene aguas predominantemente cloruradas-sulfatadas sódicas y de alto contenido salino. En el área de la planicie aluvial, son de características bicarbonatadas sódicas – cálcicas y aptas para diferentes usos. En el sector de la planicie central se desarrolla una estrecha zona de interfase entre el agua salina del pie de barda y el agua dulce del sector de la planicie aluvial, la cual contiene agua sulfatada-bicarbonatada cálcica. (Laurencena et al.2012)

Resultados

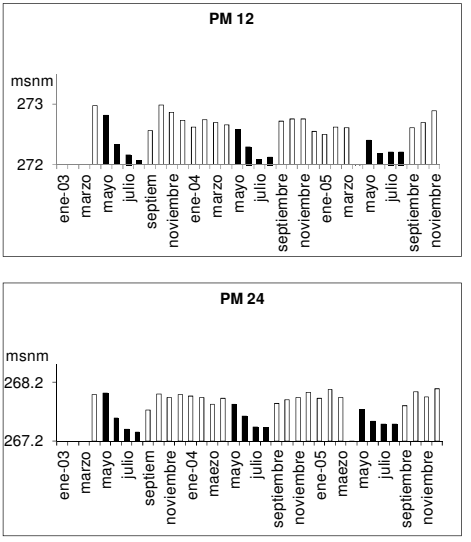
Dinámica freática de la descarga

Las profundidades medias de los niveles freáticos son variables de acuerdo a la ubicación de los pozos. Los más cercanos a la barda varían entre 6 y más de 13 m de profundidad y presentan fluctuaciones a lo largo del año hidrológico del orden de 25 a 30 cm. Los del sector central se sitúan a profundidades entre 1,5 y 3 m con oscilaciones anuales entre

0,60 y 1m. Los niveles de un pozo próximo al río se encuentran a aproximadamente 2 m de profundidad y muestran variaciones cercanas al 1,5 m.

En el análisis de los freatigramas del sector central, se observa la respuesta del acuífero a los momentos específicos de la dinámica que presenta el riego a lo largo del año, Se reconoce un periodo primaveral, en el cual como consecuencia de la aplicación de riego por inundación, los niveles freáticos alcanzan su mayor altura (septiembre-octubre). Posteriormente un periodo de máxima demanda de la evapotranspiración y crecimiento vegetativo de los cultivos con niveles algo menores (noviembre - enero). Luego asociado a la época de cosecha en que disminuye la frecuencia de riegos, se observa un nuevo aumento leve de los niveles (enero- abril).

Finalmente se reconoce una época de escasa agua en que está ausente la práctica del riego (mayo a agosto). En este período existe un predominio de la profundización de los niveles freáticos, relacionados con la descarga subterránea, alcanzando valores mínimos en agosto en cada uno de los puntos de observación. (Fig.3)



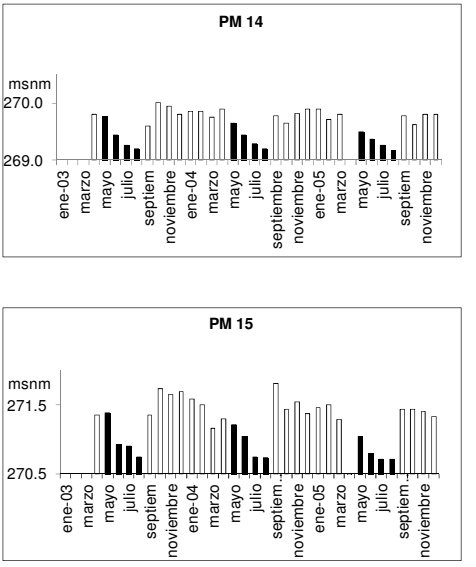


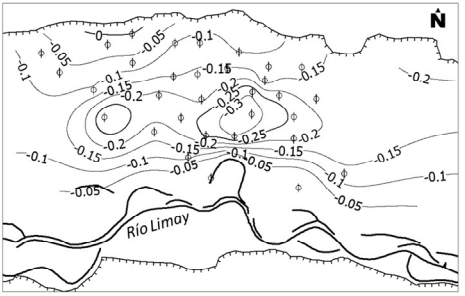
Figura 3 Variaciones de niveles freáticos mensuales (2003-2005)

En mayo comienza el descenso de los niveles freáticos en forma leve y lo cual se hace más marcado durante junio, julio y agosto.

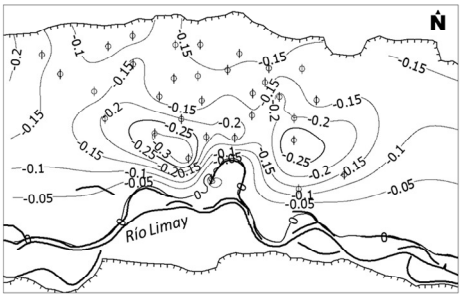
Se calcularon gradientes hídricos medios para cada mes y se obtuvieron valores muy similares en mayo 9,03 × 10^{-4} y junio, julio y agosto en el orden de 1,0 × 10^{-3}.

La afluencia subterránea a través de la sección coincidente con la curva de 270 msnm, mostró caudales de 6148 m^3/día para mayo y 6808 m^3/día para los meses siguientes de descarga. La velocidad efectiva es alta con valores de 75,2 cm/día para el primer mes y de 83,3 cm/día en los restantes. Los bajos gradientes hídricos y las altas velocidades de descarga estimadas en los estadios analizados se pueden relacionar directamente con un medio de alta conductividad hidráulica.

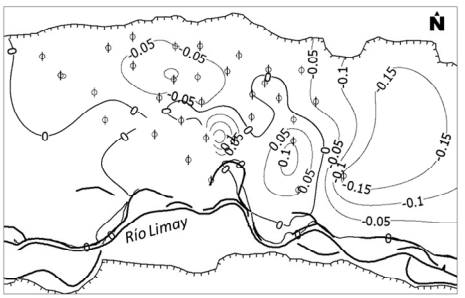
La disminución de las reservas en el acuífero freático, estimada en base a los mapas de isovariación (Fig.4) y considerando porosidad media del 12 % en un área de 55 km^2 para los distintos meses, muestra valores de de 0.98 hm^3 en los meses de mayo y junio y de 0.53 hm^3 para julio.



Periodo mayo-junio. Equid: 0.05 m



Periodo junio-julio. Equid: 0.05 m



Periodo julio-agosto. Equid: 0.05 m

Figura 4 Mapas de isovariación.

Conclusiones

La descarga subterránea, a partir del cese del riego, se produce en forma constante, con gradientes hídricos uniformes y volúmenes de descarga similares. Los bajos gradientes observados en los estadios analizados se pueden relacionar directamente con la alta conductividad hidráulica y la homogeneidad del medio.

El neto predominio de la descarga sin recarga comienza en mayo y se continua en esta situación en los tres meses siguientes. Los valores mínimos en los años analizados son similares en cada uno de los pozos de observación.

Los pozos influenciados directamente por el riego, muestran variaciones homogéneas en los niveles freáticos para las distintas épocas de año. Se reconoce la mayor altura en los niveles en septiembre-octubre, que se profundizan levemente entre noviembre y enero. Un nuevo ascenso se produce entre enero y abril. Entre mayo y agosto se profundizan en forma progresiva los niveles freáticos.

La disminución en las reservas del acuífero freático, para los distintos períodos, muestran valores de 0.98 hm^3 en mayo y junio y 0.53 hm^3 en julio. Ello hace que el descenso en las reservas para el período sin riego (junio – agosto) sea de 2.46 hm^3

El conocimiento del régimen de las aguas subterráneas y las variaciones en las reservas del acuífero freático, es de suma importancia en este tipo de ambientes de clima árido ya que permite optimizar las estrategias para el manejo del recurso hídrico, indispensable para el desarrollo económico de la región.

Referencias

Custodio, E. y Llamas M. R. 1983. Hidrología subterránea. Ed. Omega. Barcelona.

Galeazzi, J., Pesan P. Muñiz J., Signorelli V. J.Quiroga.2007 Reconocimiento de la dinámica freática mediante el monitoreo de un área piloto del Alto Valle de Rio Negro. XXI Congreso Nacional del Agua (CONAGUA 2007) Tucumán

Laurencena, P., Kruse, E. y J. Mas-Pla. 2009. Caracterización hidrogeológica y modelación preliminar del flujo subterráneo en la cuenca baja del Río Limay, Provincia de Neuquén, Argentina. Capítulo del libro: Gestión ambiental Integrada de Áreas Costeras. (Pág. 189.200) .ISBN 978-84-497-0122-1. Primera edición. Rubes Editorial, 2009. España.

Laurencena, P., Kruse, E. y Rodrígues Capítulo, L. 2010. Hidroquímica subterránea de un sector de la llanura aluvial del Rio Limay. Fondo natural en referencia a flúor y arsénico." X Congreso ALHSUD. Aguas Subterráneas y Desarrollo Sustentable de los

Pueblos Latinoamericanos. Ref: 102 -Ar-T1. Caracas, 2010. Venezuela

Laurencena P., Carol E. y Eduardo Kruse "Procesos intervinientes en la calidad química del agua subterránea de un sector de la llanura aluvial del Río Limay." VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. ISBN 978-987-23936-8-7. Pág.260-267. 2011 Salta.

Socic, M. 1978.Recursos Hídricos Subterráneos. En: Geología y Recursos Naturales del Neuquén. Relatorio VII Congreso Geológico Argentino. Neuquén. Pág. 309 – 324.

El rol de la evapotranspiración en la geohidrología del humedal de la Planicie Costera de Ajó (provincia de Buenos Aires)

Eleonora Carol[1], Eduardo Kruse[1], Federica Braga[2] y Luigi Tosi [2]

[1] Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata 64 n°3 La Plata, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
[2] Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Arsenale Tesa 104, Castello 2737/F, 30122 Venezia. Italy.

Mail de contacto: eleocarol@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMEN

La planicie costera de Ajó en la Provincia de Buenos Aires conforma un humedal cuyas características hidrológicas se diferencian según se trate de sectores de marisma influenciados por los flujos mareales o que se encuentren fuera del ciclo mareal. El objetivo del trabajo es evaluar el rol de la evapotranspiración en el funcionamiento geohidrológico del sector del humedal que se sitúa fuera del ciclo mareal. Para tal fin se analizaron imágenes satelitales Landsat visible-infrarrojo cercano (VNIR), datos de precipitaciones, de temperatura y de niveles y química (iones mayoritarios e isótopos) del agua superficial y subterránea entre septiembre de 2005 y marzo de 2006, abarcando un periodo húmedo y uno seco. Los resultados muestran que en la transición del periodo húmedo al seco se produce una disminución del área inundada, un descenso de los niveles freáticos y un aumento en la salinidad y contenido iónico del agua superficial y subterránea. Los balances hídricos y el contenido en cloruros e isótopos muestran la relevancia de la evapotranspiración que se encuentra evidenciada en la dinámica y calidad del agua del humedal.
Palabras clave: balance hídrico, balance de cloruros, isótopos ambientales, evapotranspiración, humedal.

ABSTRACT

The wetland of the Ajó coastal plain in the Province of Buenos Aires shows different hydrological characteristics depending on whether the sector is influenced by the tidal flow or not. The aim of this work is to assess the role of evapotranspiration in the geohydrological behaviour of the sector of the wetland which remains out of the tidal cycle. Landsat visible and infrared (VNIR) satellite images, rainfall, temperature, chemical data (major ions and isotopes) and water level of surface and groundwater were analysed. The study includes a wet and a dry period between September 2005 and March 2006. A decrease in the flooded area, a deepening of the water table and an increase in the salinity of the surface water and groundwater were observed in the transition of the wet period to the dry period. The water budgets and the chloride and isotope contents indicate the relevance of evapotranspiration, which is demonstrated by the hydrodynamic and hydrochemical conditions of the wetland.
Palabras clave: water budget, chloride balance, environmental isotopes, evapotranspiration, wetland.

Introducción

Los humedales son ambientes hidrológicamente sensibles, razón por la cual es vital comprender en ellos las distintas componentes del ciclo del agua. La evapotranspiración, es en los humedales, uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico y representa el consumo de agua de la vegetación, y la evaporación de los espejos de agua y suelos sin vegetación. Su estimación es necesaria para el entendimiento de los procesos hidrológicos y la gestión del agua.

La variabilidad y complejidad hidrológica de los distintos tipos de humedales determinan que no exista un enfoque único y que sea el más apropiado para estimar la evapotranspiración en estos ambientes (Drexler et al., 2004). Por esta razón, es que el estudio a partir de distintas metodologías tales como soluciones empíricas, procesamiento de imágenes satelitales, análisis basados en el tipo de vegetación y sustrato, variaciones de niveles de agua, etc. (p.e. Chen et al., 2002, Acreman et al., 2003, Dabrowska-Zielinska et al., 2010) permiten una mejor

comprensión de las numerosas variables que condicionan a la evapotranspiración en humedales.

El humedal de la planicie costera de Ajó (Violante et al., 2001) se ubica en el litoral de la Bahía de Samborombón como una franja de aproximadamente 500 m de ancho en el sector norte de la bahía y que alcanza en el sector sur su mayor expresión con un ancho de 50 km (Fig. 1).

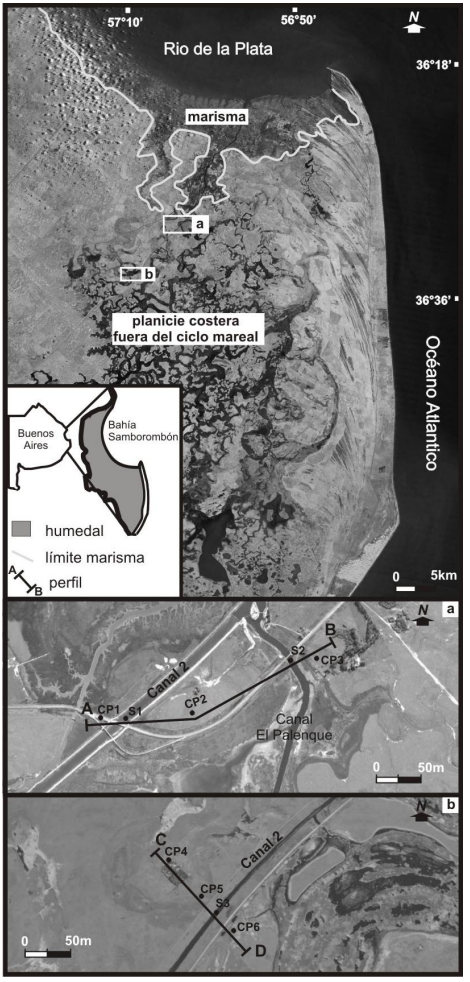


Figura 1. Ubicación del área de estudio. (a) y (b) Detalle del área de perfiles y puntos de medición.

Dentro del humedal se reconocen dos sectores, uno de carácter intermareal y otro actualmente sin conexión con el flujo mareal. El primero se desarrolla sobre la costa donde predomina el ambiente de marisma y la dinámica hidrológica está directamente relacionada con los flujos mareales procedentes del estuario del Río de la Plata (Carol et al., 2011, Carol et al., 2012). El otro sector comprende las áreas más continentales donde la planicie costera está actualmente fuera del ciclo mareal y los antiguos canales de marea forman cañadas y lagunas en donde descarga localmente el agua subterránea somera y se acumulan los excedentes de las precipitaciones (Carol, 2008). El objetivo del trabajo es evaluar el rol de la evapotranspiración en el funcionamiento geohidrológico del sector del humedal que se sitúa fuera del ciclo mareal de acuerdo a las variaciones en la hidrodinámica e hidroquímica del agua superficial y subterránea y su verificación a partir de balances hidrológicos.

Metodología

Con la base del mapa isofreático de la región (Carol, 2008) se realizaron mediciones de niveles de agua superficial (S) y subterránea somera (CP) en dos perfiles que interceptan perpendicularmente al flujo subterráneo y los principales canales. El primer perfil se ubica en la zona adyacente a la marisma mientras que el segundo en la parte central de la planicie costera (Fig. 1). Los puntos de medición de agua subterránea corresponden a freatímetros construidos a 3 m de profundidad y encamisados con caño y filtro de PVC y prefiltro de grava silícea bien seleccionada. En todos los puntos de medición se extrajeron muestras de agua para la determinación del contenido de iones mayoritarios. Los datos corresponden a muestreos realizados en septiembre de 2005 y marzo de 2006. En el segundo muestreo también se determinaron isótopos ambientales ^{18}O y ^{2}H.

Imágenes satelitales Landsat Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR) comprendidas entre agosto de 2005 y mayo de 2006 se utilizaron para valorar los cambios en las áreas cubiertas por agua (canales, cañadas, etc.) y Landsat Térmico Infrarrojo (TIR) para estimar las variaciones en la temperatura de superficie. La estimación del rol de la evapotranspiración se efectuó a partir del factor de evaporación en agua por cloruros y datos isotópicos de ^{18}O y ^{2}H. Los cálculos de evaporación basados en datos químicos se efectuaron con el software NETPATH (Plummer et al., 1991).

Los datos de precipitaciones y temperatura de General Lavalle permitieron verificar las

observaciones realizadas en base a evidencias hidrodinámicas y hidroquímicas acerca del rol de la evapotranspiración en el humedal. Valores anuales (1909 – 2012) y mensuales (2005 – 2006) se utilizaron para la caracterización climática y para la estimación de la evapotranspiración a partir de balances hídricos.

Resultados

El clima es templado húmedo con precipitaciones medias anuales de 970 mm, existiendo una alternancia de periodos secos y húmedos. Los balances hídricos mensuales calculados por el método de Thornthwaite a partir de los datos de precipitaciones y temperaturas medias históricas muestran que la evapotranspiración real es de 759 mm / año, registrándose excesos principalmente en los meses de invierno (entre marzo y octubre) y déficit en los del verano (de noviembre a febrero) (Fig. 2).

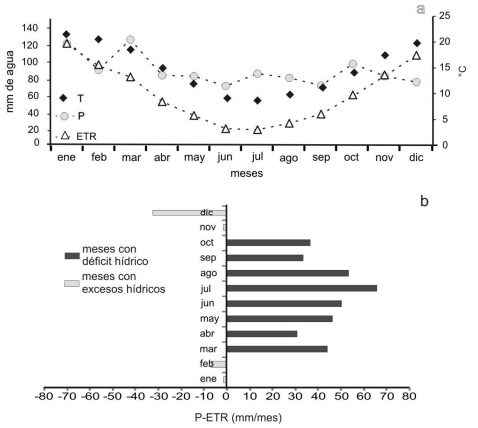


Figura 2. (a) Gráfico de precipitaciones (P), evapotranspiración real (ETR) y temperaturas medias (T) mensuales, (b) gráfico de barras indicando los meses con déficit y excesos hídricos.

El desarrollo de lagunas y cañadas está regulado principalmente por las precipitaciones y la evaporación, esta última favorecida por la gran extensión y escasa profundidad de los cuerpos de agua. En las imágenes satelitales puede apreciarse que a finales de los meses con excesos hídricos (agosto a octubre de 2005) en el humedal predomina la acumulación de agua en superficie (Fig. 3).

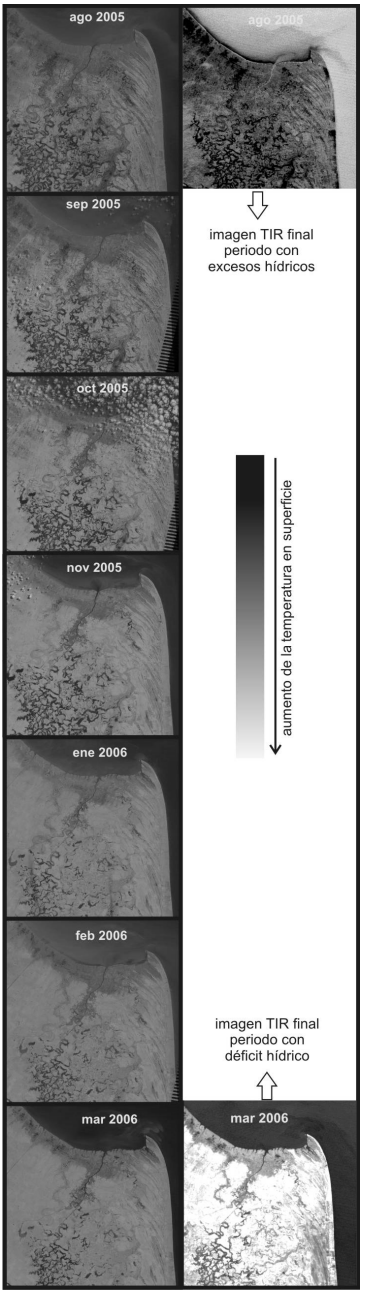


Figura 3. Imágenes Landsat entre agosto de 2005 y marzo de 2006. Las imágenes en escalas de grises corresponden al térmico infrarrojo (TIR).

En la parte central y sur de las imágenes se observan numerosas formas sinuosas de coloración negra que representan a los antiguos canales de marea en donde se acumula en superficie el agua de lluvia. Precipitaciones de 157 mm y 183 mm registradas en los meses de junio y agosto, asociadas a la baja evapotranspiración (Fig. 4) y la baja a media permeabilidad de los sedimentos de la planicie costera favorecen la formación de cañadas y lagunas en las depresiones de los antiguos canales de marea.

Entre agosto de 2005 y marzo de 2006, un aumento en la temperatura superficial se evidencia en las imágenes Landsat TIR (Fig. 3). En agosto de 2005 las imágenes presentan un predominio de tonalidades negras y gris oscuras (indicativas de bajas temperaturas), mientras que tonalidades gris claro a blanquecinas (indicativas de mayor temperatura) dominan en marzo de 2006. En este periodo las precipitaciones tienden a disminuir y la temperatura ambiente es superior a 15 ºC durante los meses con déficit (Fig. 4). Estas características determinan que desde el inicio al final del periodo con déficit hídrico (de noviembre a marzo) ocurra una notoria disminución del área cubierta por el agua registrando en marzo de 2006 solo algunos antiguos canales de marea con agua en superficie en el sector sudoeste (Fig. 3).La relevancia de la evaporación por sobre la precipitación en la dinámica del agua superficial del humedal durante los meses con déficit se evidencia en el mes de enero de 2006 donde a pesar de que las precipitaciones hayan alcanzado los 140 mm (Fig. 4) no se registra un incremento en las áreas inundadas (Fig. 3).

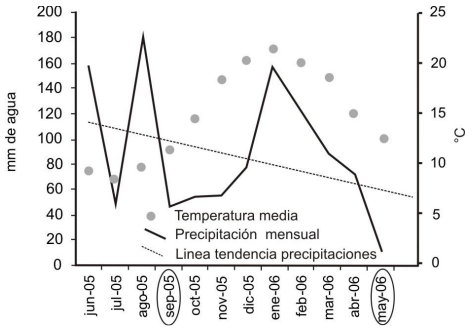


Figura 4. Precipitaciones y temperaturas mensuales para el periodo analizado.

Una profundización en los niveles freáticos y un aumento en el contenido iónico del agua subterránea se registran entre septiembre de 2005 y mayo de 2006. En los dos perfiles hidrogeológicos se observa que en septiembre de 2005 los niveles freáticos se encuentran próximo a la superficie del terreno (puntos indicados con PC) y se profundizan durante la primavera y verano, registrándose en marzo de 2006, un descenso entre 30 y 70 cm (Fig. 5). Esta profundización en los niveles modifica la relación agua superficial – agua subterránea. Para septiembre de 2005 en el perfil A-B el agua subterránea descarga en los canales, mientras que en marzo de 2006 esta relación se invierte. En el perfil C-D si bien tanto en septiembre de 2005 como en marzo de 2006 existe una descarga del flujo subterráneo en el canal, el gradiente hídrico disminuye notoriamente en marzo de 2006 (Fig. 5). Cabe destacar que el descenso en los niveles de agua de los canales es pequeño debido a que su descarga es regulada por compuertas de forma tal de maximizar la acumulación de agua en los mismos.

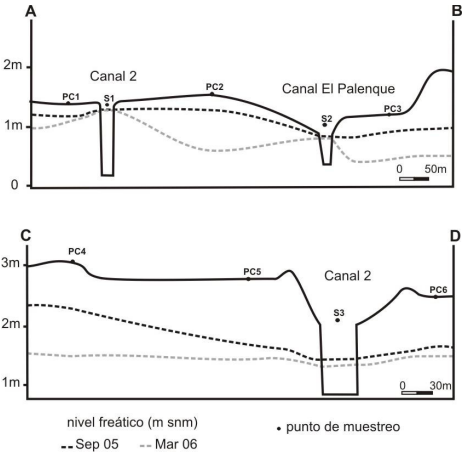


Figura 5. Perfiles topográficos indicando la posición del los niveles de agua. La ubicación de la traza del perfil se indica en la figura 1.

En lo referente a la química del agua, dentro del humedal predomina el agua subterránea de tipo clorurada sódica. En todos los puntos de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas se registra un aumento en la concentración de cloruros entre septiembre de 2005 y marzo de 2006 (Fig. 6). Los factores de evaporación estimados a partir del modelado

hidrogeoquímico varían entre (1,05 y 1,54) en el agua subterránea y entre (1,7 y 2,6) en el agua superficial.

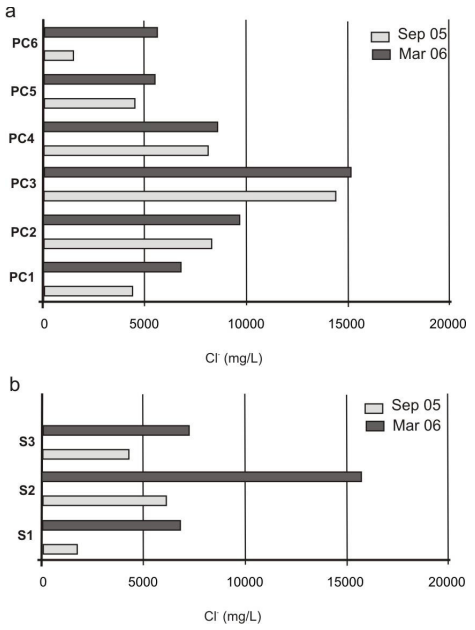


Figura 6. Gráficos de barras mostrando la variación en el contenido en cloruros de las muestras de agua entre fines del periodo húmedo (septiembre de 2005) y fines del seco (marzo de 2006).

El contenido en isótopos ambientales muestra también que el proceso de evaporación condiciona la química tanto del agua superficial como subterránea. En el gráfico de $\delta^{18}O$ en función de $\delta\ ^{2}H$ se observa que las muestras se desvían de la recta meteórica local $\delta^{2}H‰ = 8\ \delta^{18}O‰ + 14$ (Dapeña y Panarello 2004) y se ubican en torno a una recta de evaporación $\delta^{2}H‰ = -4.89\ \delta^{18}O‰ -9.47$ (Fig. 7a). La pendiente de la recta de evaporación se sitúa dentro del rango esperado en zonas con humedad atmosférica cercana al 75% (Gonfiantini, 1986), como es el caso del humedal estudiado. Los contenidos isotópicos al igual que los factores de evaporación muestran que la evaporación es mayor en el agua superficial que en el agua subterránea. Esta característica también se observa en el gráfico de $\delta^{18}O$ en función de la concentración de cloruros (Fig. 7b). Dentro de las muestras de agua superficial, las del canal El Palenque son las que mayor evaporación evidencia. Esto se debe a que dicho canal drena la mayor parte de las cañadas y lagunas poco profundas del humedal, mientras que el canal 2 drena agua de arroyos ubicados al sudoeste del humedal donde la superficie expuesta a evaporación es mucho menor.

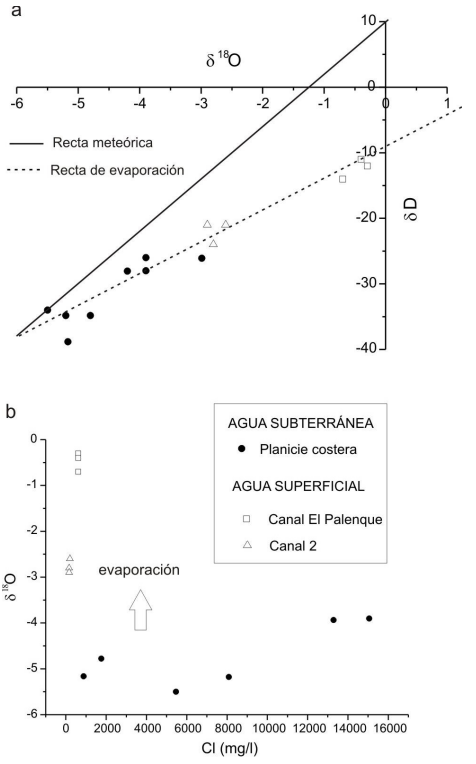


Figura 7. (a) Relación entre el contenido de isótopos ambientales ($\delta\ ^{2}H$ en función de $\delta^{18}O$) y (b) relación entre $\delta^{18}O$ y la concentración de cloruros.

Conclusiones

Las evidencias hidrodinámicas e hidroquímicas indican que la evapotranspiración tiene un rol importante dentro del funcionamiento hidrológico del humedal que se encuentra fuera del ciclo mareal. Estas evidencias quedan verificadas a partir de los balances hidrológicos los cuales indican que anualmente un 75% del agua de lluvia es evapotranspirada y que existen entre marzo y octubre excesos hídricos y entre noviembre y febrero déficits hídricos.

El desarrollo de cañadas y lagunas, la relación agua superficial – agua subterránea, el gradiente hidrológico y la química del agua superficial y subterránea somera están regulados en gran medida por la evapotranpiración.

Los resultados obtenidos permiten caracterizar los efectos de la evapotranspiración sobre las variables hidrológicas del humedal, cuyo entendimiento es vital para la gestión y manejo sustentable de los recursos hídricos de este tipo de ambientes.

Agradacimentos

Este trabajo fue desarrollado en el ámbito del Acuerdo de Cooperación Científica entre el CONICET (Argentina) y el CNR (Italia), dentro del proyecto “Interacción agua dulce – agua salada en regiones costeras de alto interés económico y ambiental: caracterización hidrogeológica actual y previsión de los efectos del cambio climático global”.

Las imágenes satelitales fueron obtenidas del U.S. Geological Survey's, Earth Resources Observation and Science (EROS) Center.

Referencias

Acreman M.C., Harding R.J., Lloyd C.R., McNeil D.D. 2003. Evaporation characteristics of wetlands: experience from a wet grassland and a reedbed using eddy correlation measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7: 11–21.

Carol E. 2008. Procesos hidrológicos en el sector sur de Bahía de Samborombón. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. 235 p.

Carol, E., Dragani, W., Kruse, E., Pousa, J. 2012. Surface water and groundwater characteristics in the wetlands of the Ajó River (Argentina). *Continental Shelf Research*.49: 25-33.

Carol, E., Kruse, E., Pousa, J. 2011. Influence of the geologic and geomorphologic characteristics and of crab burrows on the interrelation between surface water and groundwater in an estuarine coastal wetland. *Journal of Hydrology*, 403: 234 – 241.

Chen, J., Kan, C., Tan, C, Shih, S.F. 2002. Use of spectral information for wetland evapotranspiration assessment. *Agricultural Water Management*, 55, 239–248

Dabrowska-Zielinska, K., Budzynska, M., Kowalik, W., Turlej, K. 2010. Soil moisture and evapotranspiration of wetlands vegetation habitats retrieved from satellite images. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7, 5929-5955.

Dapeña, C., Panarello, H., 2004. Composición isotópica de la lluvia de Buenos Aires. Su importancia para el estudio de los sistemas hidrológicos pampeanos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología* 4, 17–25.

Drexler, J. Z., Snyder, R. L., Spano, D. Paw U, K. T. 2004. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. *Hydrological Processe*s, 18: 2071–2101. doi: 10.1002/hyp.1462

Gonfiantini, R., 1986. Environmental isotopes in lake studies. En: Fritz, P., Fontes, J.C. (Eds.), Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Elsevier, pp. 113– 168.

Plummer L.N., Prestemon E.C., Parkhurst D.L. 1991. An interactive code (NETPATH) for modelling NET geochemical reactions along a flow PATH. US Geol Surv Water Resour Invest 4078.

Violante, R., Parker, G., Cavallotto, J., 2001. Evolución de las llanuras costeras del este bonaerense entre la bahía de Samborombón y la laguna de Mar Chiquita durante el Holoceno. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56, 51–66.

Evaluación del comportamiento del acuífero del Alto Valle de Río Negro para control de heladas en un distrito de riego

Gabriela Polla[1], Javier Pavese[2], Maite Elissalde[1] y Federico Horne[1]

[1] Facultad de Cs. Agrarias (UNComahue), Ruta 151, km 12.5, (8303) Cinco Saltos, Río Negro, Argentina.
[2] Dpto de Matemática. (F.A.E.A.- UNComahue), Buenos Aires 1400, (8300) Neuquén, Neuquén, Argentina.

Mail de contacto: gabipolla@yahoo.com.ar

RESUMEN

El sistema productivo Alto Valle de Río Negro, incluye 50000 ha de cultivos frutícolas de carozo y pepita. Una de las restricciones del sistema son las heladas que afectan a los frutales de floración temprana, con pérdidas económicas que alcanzan porcentajes significativos. Los métodos de protección requieren de agua para riego presurizado con láminas de 3 -5 mm/hora durante 8 horas, que son provistas por bombeo del acuífero. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la factibilidad del control de heladas a través del riego presurizado, en función de las características hidrogeológicas del acuífero, sus condiciones de contorno y la recarga estacional por riego. Para alcanzar este objetivo se utilizó el modelo numérico denominado Modflow, el que fue sometido a diferentes escenarios. Entre las principales conclusiones se puede mencionar que es posible la protección de heladas por riego presurizado en aproximadamente un tercio del área del Distrito.
Palabras clave: heladas tardías, modelo matemático, acuífero.

ABSTRACT

The production system Upper Rio Negro Valley, includes 50000 ha. of fruit crops, mainly apples, pears, peaches, plums and vineyards. One of the constraints of the system is the frost affecting early flowering fruit trees, with economic losses reaching significant proportions. Protection methods required pressurized irrigation water with sheets of 3 -5 mm / hour for 8 hours, which are supplied by pumping from the aquifer. The aim of this study is to evaluate the feasibility of frost control through pressurized irrigation, depending on the hydrogeological characteristics of the aquifer, its boundary conditions and seasonal recharge by irrigation. To achieve this goal we used the numerical model called Modflow, which was subjected to different scenarios.
Among the key findings can be mentioned that it is possible frost protection by pressurized irrigation in about one third of the area of the District.
Keywords: frost protection, mathematical model, aquifer.

Introducción

El Alto Valle de Río Negro es una unidad económico-productiva, compartida entre la Provincia de Neuquén y Río Negro. Se trata de un valle ubicado en el lugar en que la confluencia de los ríos Neuquén y Limay, da origen al río Negro. Sus caudales módulos, de 320 y 650 m^3/s respectivamente, son aprovechados para irrigar todo el valle a través de un dique nivelador sobre el Río Neuquén (ubicado en Barda del Medio) y su red intensiva de canales.

Entre los cultivos destacados, los frutales ocupan los primeros lugares. La manzana, número uno de la actividad regional, a la que ha dado renombre. El cultivo de la pera se asemeja al de la manzana. Su cuantía, sin embargo, es muy inferior, aunque sus porcentajes respecto de la producción total del país y de la exportación, son similares a los de la manzana.

Entre los principales problemas que posee el área se puede mencionar la ocurrencia de heladas primaverales (tardías) en el momento que los árboles frutales comienzan a brotar y florecer, evento que produce importantes pérdidas económicas, al afectar la calidad y la cantidad de la producción frutícola.

Uno de los métodos utilizados para la defensa contra heladas, son los sistemas de riego por aspersión. Ellos permiten la liberación del calor latente del agua al cambiar del estado líquido al sólido. Para aplicar este método es necesario contar con agua suficiente durante el tiempo que dure la helada, recurso que es extraído del acuífero.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la factibilidad del control de heladas a través del riego presurizado, en función de las

características hidrogeológicas del acuífero, sus condiciones de contorno y de la recarga estacional por riego.
Hasta el momento en la zona no se ha aplicado un modelo numérico de agua subterránea para analizar los objetivos presentados en este trabajo.

Materiales y Métodos

El Alto Valle de Río Negro es una extensa zona de agricultura bajo riego ubicado en el extremo oeste de la provincia de Río Negro con una superficie cercana a las 50.000 has.

La actividad frutícola representa el 70 % del producto bruto sectorial, y su desarrollo esta condicionado a la existencia de un sistema de riego que permite satisfacer sus demandas.

El clima de la región es continental, templado y árido con temperatura media anual de 15 ℃, las necesidades de frío invernal de los frutales de hojas caducas son normalmente satisfechas en esta región. La precipitación media anual es 190 mm, con una evapotranspiración media anual de aproximadamente 900 mm, dato estimado a través de la formula de Penmann-Monthei (FAO, 2006)

En particular el trabajo se realizó sobre el Distrito de Cinco Saltos, de aproximadamente 3000 ha de extensión y ubicado en el extremo superior del Alto Valle de Río Negro, área que posee características similares al resto del Valle.

El acuífero esta constituido por dos niveles: uno inferior de material grueso formado por gravas y arenas sin cementar, y uno superior de material más fino que forma el suelo, con un espesor promedio de dos metros que puede estar parcialmente saturado en los períodos de ascenso del nivel freático. Los suelos de la planicie de inundación ocupan los albardones suaves, son suelos profundos, moderadamente bien drenados, franco limoso a franco limo-arcilloso, contienen materia orgánica, buena retención de agua, y conforman los suelos más productivos del valle.

El estrato superior posee una conductividad hidráulica (K) del orden de 0,5 m/día a 4 m/día, varias veces menor que la del horizonte inferior que no semiconfina al acuífero freático. Los valores de la conductividad hidráulica del estrato inferior varían entre 20 a 90 m/día, correspondiendo los valores mayores a la zona cercana al río. Los valores del coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico, oscilan entre 5% a 30 %, lo cual califica al acuífero como libre. (Estudio Integral del Río Negro, 1987)

El acuífero en estudio corresponde al grupo Neuquén (Cretácico Superior). Dentro de la descripción geológica se distinguen dos estratos: el hidroapoyo que constituye un homoclinal subhorizontal con suave inclinación noreste a suroeste, constituido por capas alternantes de areniscas y pelitas de resistencia mecánica diferencial. Esta formación presenta baja permeabilidad, muy inferior a las de las capas superiores. La formación no tiene importantes accidentes de relieve, posee una geomorfología plana con una inclinación que acompaña la pendiente promedio del río. Se contó con información de la variación espacial del espesor del acuífero. (Estudio Integral del Río Negro, 1987)

Para implementar el modelo se dispuso de información de lecturas freatimétricas del Distrito de Cinco Saltos, periodo 2008-2010. Dicha información incluye: nombre del freatímetro, coordenadas, cota terreno, y profundidad de la freática en intervalos semanales, mostrado en la Fig. 1.

Se dispuso de una Imagen SPOT Merge del año 1995 georeferenciada en Gauss Kruger Faja 2 Datum Campo Inchauspe 1969 con una resolución de 10 m. Dicha información fue proporcionada por la Autoridad Interjuridiccional de Cuencas de los Ríos Neuquen, Limay y Negro (AIC).

De trabajos previos de la zona de estudio se obtuvo la siguiente información: dotación de riego anual en promedio 1400 mm/año, distribuida uniformemente a lo largo del año. (Stangaferro S. et. al. 2011)

Tassara en el año 2005, analizó el efecto y características de las heladas producidas en el Alto Valle, como así también las necesidades hídricas para su control mediante métodos de aspersión.

Para el análisis del sistema río-acuífero se utilizó el modelo numérico MODFLOW, uno de los modelos 3-D de flujo de aguas subterráneas más populares del mundo, desarrollado por Michael McDonald y Arlen Harbaugh para el Servicio Geológico de los EE.UU. La versión usada para este trabajo es la 4.5.

Este modelo consiste en una representación virtual del medio físico en un ordenador, que mediante operaciones adecuadas, calculará la evolución de los niveles y el flujo hídrico producido en condiciones especificadas, pudiendo incorporarse bombeos de pozos, inyecciones, recarga distribuida en superficie, evapotranspiración, flujo hacia drenes y flujo a través del lecho de los ríos. Simula el flujo del agua subterránea en tres dimensiones en una cuenca hidrogeológica.

El flujo de agua de densidad constante en tres dimensiones en un medio poroso saturado, heterogéneo y anisótropo que cumple con la ley de Darcy puede ser descripto por la Ecuación 1

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(kxx * h * \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(kyy * h * \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(kzz * h * \frac{\partial h}{\partial z}\right) \pm Q(x,y,z) = S * \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (1)$$

donde *Q(x, y, z, t)* es la entrada neta al sistema (m^3/s); *S* es el coeficiente de almacenamiento; *kxx, kyy, kzz* son las conductividades hidráulicas en cada dirección (m^2/d); *h(x, y, z, t)* es la variable de estado (cota del nivel de agua (m), es una medida de la carga hidráulica (*h*) en cada punto del medio saturado).

En el caso de acuíferos confinados y semiconfinados, *h* representa no sólo la altura real de agua, sino también la altura debida a la presión de alojamiento.

Excepto en casos muy simples no existen soluciones analíticas de esta ecuación. En consecuencia se usan otros métodos numéricos. El programa MODFLOW utiliza el método numérico de diferencias finitas, donde se sustituye el sistema continuo por un conjunto finito y discreto de puntos en el espacio y tiempo, y sustituye las derivadas parciales por diferencias de valores de la función *h* en distintos puntos. Su solución da como resultado el valor de la altura freática en los puntos especificados, lo que constituye una aproximación a la distribución continua que daría una solución analítica de la ecuación diferencial.

Implementación del modelo

Sobre la imagen SPOT georeferenciada del distrito de Cinco Saltos, se determinó una malla con una cuadricula de 50m por 50 m, con el objetivo de poder representar los distintos componentes de un Distrito de Riego (canales, desagües, etc) así como también precisar la ubicación de los pozos de bombeo que se utilizarán para el control de heladas. Se considero para una primera corrida valores de conductividades hidráulicas de Kx = Ky = 40 m/d y kz = 0.4 m/d; para toda el área.

Vistas las características geológicas anteriormente mencionadas, se eligió trabajar con una sola división o capa en el acuífero, ya que los datos analizados indican que la fluctuación de la freática, durante el período sin riego, se realiza en la capa inferior del acuífero.

Se considero un espesor del acuífero variable de este a oeste, con valores que oscilan en 6 m en la cercanía de la barda, de 9 m en la zona media (desde la barda al río) y de 12 m adyacente al río.

Se estableció como altura máxima de terreno en el límite norte del área de estudio 300 msnm (metros sobre el nivel del mar) y mínima, en el sur de 276 msnm

El tramo del Río Neuquén que se encuentra en la zona de estudio posee un recorrido de aproximadamente 25 Km, con anchos que varían entre 40 y 90 m, se modeló para un caudal de 200 $m^3.s^{-1}$ y sus correspondientes alturas hidrométricas. El programa Modflow calcula la conductancia del río en cada tramo teniendo en cuenta los siguientes parámetros en forma directa: conductividad hidráulica en la dirección z de los sedimentos del río (estimado en 0,04 m^2/d), ancho del rio ingresado y longitud de la celda; e inversamente proporcional al espesor de los sedimentos del lecho del rio, estimados en 0,15 m.

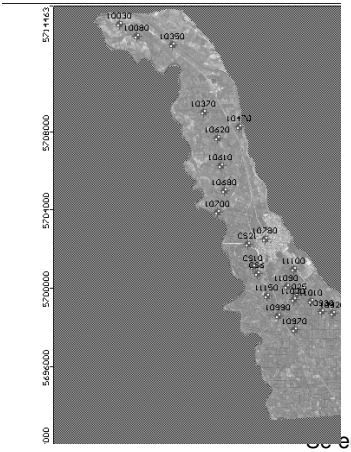
Se supuso una recarga efectiva neta de 500 mm/año.

Las condiciones de borde establecidas fueron, en el límite norte y este, una formación llamada localmente “bardas” de flujo nulo, el límite oeste con condición de borde río y al sur no se incluyó condición de borde.

Se puede considerar que la interacción entre el río y el acuífero es permanente.

El modelo regula si el río alimenta al acuífero o viceversa según las alturas de la freática y el nivel del río. Esto se hace a través de una ecuación de acople propia del modelo.

La Fig. 1 muestra el área de estudio.



Se emplearon así los parám

Figura 1. Esquema del Distrito de Cinco Saltos, pozos de observación.

Resultados y discusión

La calibración se realizó en régimen permanente y los resultados fueron comparados con los registros del mes de agosto del año 2008. Los parámetros que más sensibilidad mostraron fueron la conductividad hidráulica y la recarga. El mejor ajuste del modelo se obtuvo con los valores que se muestran en las Fig. 2 y Fig. 3.

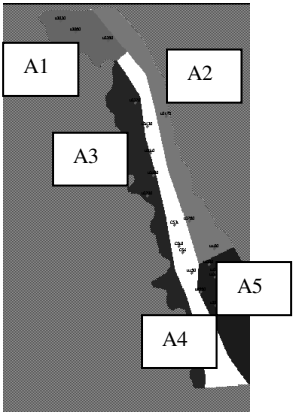


Figura 2. Distribución espacial de la conductividad hidráulica: A1: 60 m/d, A2: 45 m/d, A3: 85 m/d, A4: 50 m/d, A5: 20 m/d.

La Fig. 3 muestra la distribución espacial de la recarga efectiva, siendo la recarga efectiva la suma entre la precipitaciones y el riego menos la evapotranspiración, en todos los casos los valores son anuales.

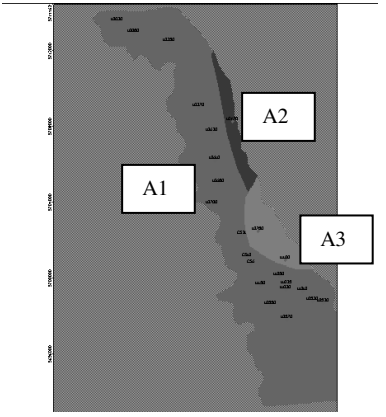


Figura 3. Distribución espacial de la recarga efectiva: A1: 400 mm, A2: 100 mm, A3: 0 mm.

La zona de nula o baja recarga efectiva se corresponde con áreas urbano-rural con servicio de cloacas.

La Fig. 4 muestra como los valores calculados versus los observados se aproximan a una recta a 45°, con un error estándar estimado de aproximadamente 14 cm, siendo los puntos ubicados en la parte central del gráfico los correspondientes al área de estudio propiamente dicha.

Se realizaron validaciones para los años 2009-2010 con los valores de los parámetros encontrados y se obtuvieron ajustes similares.

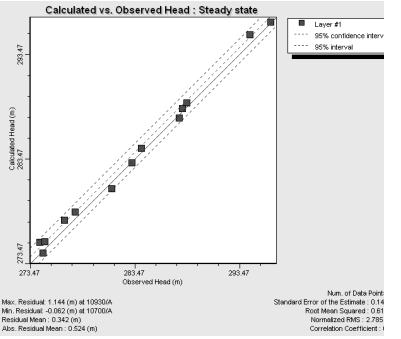


Figura 4. Calibración del modelo.

En la Fig. 5 se muestra el mapa de isohipsas y vectores de flujo obtenido de la calibración.

Figura 5. Isohipsas y vectores de flujo agosto-2008.

Dado que el objetivo del trabajo fue analizar el comportamiento del acuífero sometido a una extracción intensiva de agua (extracción de un gran volumen de agua en toda el área del acuífero en un mismo período de tiempo), para control activo de heladas, se propuso una batería de 10 pozos ubicada en el Distrito de Cinco Saltos, con características hidrogeológicas diferenciables.
Dicha conformación se muestra en la Fig 6.

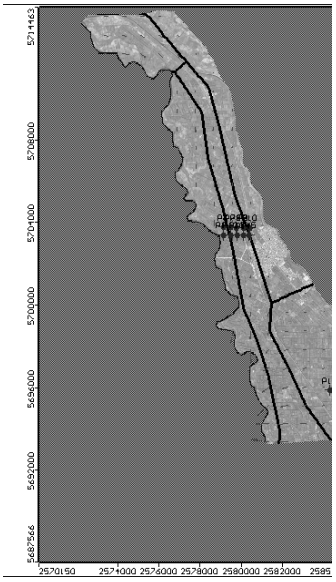


Figura 6. Batería de pozos.

Para el diseño de la batería de pozos se consideró que la zona extractiva (rango de profundidades donde se extraerá el agua), se encuentra entre 1.5 y 6 m de profundidad, abatimiento máximo admitido 4.5 m para que no existan problemas de cavitación. El distanciamiento entre pozos será de 350 m valor estimado a partir de la fórmula de Jacob, este valor de distanciamiento permite que los conos de abatimiento entre pozos no se intercepten, asegurando así que no aumente su descenso.

El caudal de 3000 m^3/d se obtuvo a partir de las perforaciones de la zona, ensayos de bombeos y estimaciones analíticas la fórmula de Theis y se considera técnicamente factible de extraer.

Con este criterio habrá un pozo cada 12 ha aproximadamente y con el caudal extraído se podrá regar de 4 a 5 ha en promedio.

Se simuló una helada crítica de 3 noches consecutivas, en régimen transitorio, regando 8 hs y dejando recuperar el acuífero durante las 16 hs restantes, manteniendo ese patrón durante 3 días.

La Fig. 7 corresponde a un corte transversal con dirección este –oeste, de la batería de pozos donde se observa el acuífero en estado de equilibrio hidrodinámico, modelado en estado permanente y antes de realizar la extracción de agua.

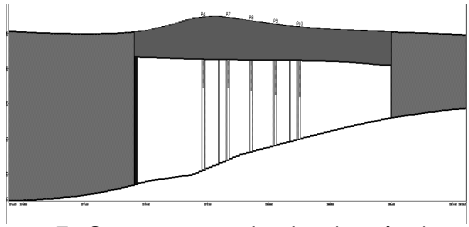


Figura 7. Corte transversal sobre batería de pozos.

La Fig. 8 ilustra la situación del acuífero anterior en un entretiempo de recuperación, luego de bombear 8 hs.

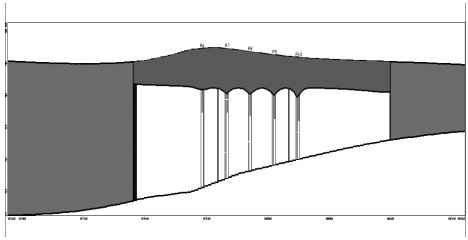


Figura 8. Corte transversal sobre batería de pozo en entretiempo de recuperación del acuífero.

En la Fig. 9 muestra el mismo corte transversal al finalizar el tercer día de bombeo.

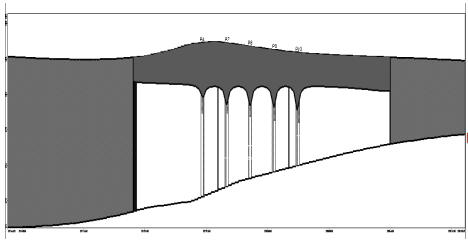


Figura 9. Corte transversal sobre batería de pozos al tercer día del bombeo.

Del análisis de la modelación se infiere que es posible la protección contra heladas para una equidistancia entre pozos de 350m, donde cada

uno tiene un área de influencia de aproximadamente 12 ha, pero el caudal extractivo solo alcanza para proteger 4.5 ha.

Conclusiones

El modelo utilizado representó adecuadamente la hidrodinámica del acuífero.

Los parámetros más sensibles en la calibración fueron la conductividad hidráulica y la recarga al acuífero.

A partir del diseño propuesto, se puede proteger aproximadamente un tercio del área total del Distrito.

En todo el Distrito de Cinco Saltos, cada pozo acepta una extracción de 3000 m^3/d, con una equidistancia de 350m.

Referencias

Administración Pcial. Del Agua (A.PA.)1984. Estudio Hidrológico y Drenaje Area de riego Centenario. *Informe Técnico*.Neuquén.

Batty, M. 1979. On planning processes. En: B Goodall y A. Kirby (eds.), *Resources and planning*. Pergamon Press. Oxford. 17-45.

Estudio Integral del Río Negro. Convenio Agua y Energía Eléctrica –Prov. Río Negro. 1987. Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Sector drenaje. Informe Final. Tomo I". *CIL- Consorcio Inconas-Latinoconsult*. Río Negro.

Estudio FAO. Riego y Drenaje 56. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. ISSN 0254-5293.

McDonald, M. y Harbaugh, W.1988. *"Modflow"*—A Modular 3-climensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. US Geological Survey.

Stangaferro, S., Polla, G., Horne, F. Y Pavese, J. 2011. Modelo Hidrológico conceptual del acuifero Alto Valle de Río Negro. *VII Congreso Argentino de Hidrogeología*. ISBN 978-987-23936-8-7. I:124-131. Salta.

Tassara, M. 2005. Defensa contra heladas. *Revista: Fruticultura y Diversificación*. Año 11. Nro 45. I: 20-24. Edición Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Gral. Roca.

Evidencias hidrodinámicas de explotación intensiva en cuencas del Noreste de la provincia de Buenos Aires

María Marta Trovatto [(1)], María del Pilar Álvarez [(1)], Nilda González [(1)] y Mario Alberto Hernández [(1)]

(1)Cátedra de Hidrogeología. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. (UNLP) Av. 60 y 122 La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina

Mail de contacto: m.trovatto@hotmail.com

RESUMEN

Se analiza la hidrodinámica subterránea en las cuencas de los arroyos Conchitas-Plátanos y Baldovinos, alterada por la extracción para abastecimiento público, industrial, agrícola y recreativo. El sistema geohidrológico se compone de la zona no saturada, acuífero freático y semilibre asociados, y acuífero semiconfinado (Puelche), sobre acuícludo paraniano. Se realizó un censo de perforaciones, medición de profundidad de niveles y parámetros fisicoquímicos *in situ*. Las redes de flujo muestran una morfología hidrodinámica con conos de depresión coalescentes, y niveles dinámicos de -30 msnm y -10 msnm, para el Puelche y suprayacente respectivamente. Las hidroformas antecedentes se mantuvieron en el tiempo y profundizaron aguas arriba de las cuencas. Producto de la explotación intensiva desaparece por sectores el conjunto acuífero freático-semilibre, cambiando el comportamiento hidráulico del acuífero Puelche de semiconfinado a libre. La mayor extracción respecto de la recarga determina nuevas perforaciones y a futuro, otras fuentes de abastecimiento.

Palabras clave: Hidrogeología, hidrodinámica, usos, explotación intensiva

ABSTRACT

The groundwater hydrodynamics of the altered Conchitas-Plátanos and Baldovinos watersheds-altered by the public supply and by industrial, agricultural and recreational uses-are analyzed. The geohydrologic system includes the vadose zone, the associated phreatic and semi-free aquifer and the semi-confined aquifer (Puelche) above the paranian aquiclude. A well survey was conducted, and the groundwater levels and *in situ* physicochemical parameters were measured. The groundwater flows show a hydrodynamic morphology with coalescent cones of depression, and dynamic levels of -30m as and -10 m as for the Puelche and the overlying aquifer, respectively. The historical hydroforms remained in time and deepened upstream from the watersheds. Due to intensive exploitation, the phreatic and semi-free ensemble disappears by sectors, changing the hydraulic behavior of the Puelche from semi-confined to unconfined. Increased extraction with respect to recharge determines new drillings and other future sources of water supply.

Keywords: Hydrogeology, hydrodinamics, uses, intensive exploitation

Introducción

El ámbito de estudio se encuadra en el Noreste de la Provincia de Buenos Aires, donde las cuencas de los arroyos Conchitas-Plátanos y Baldovinos abarcan un gran porcentaje de los partidos de Berazategui y Florencio Varela (Figura 1).

En las últimas décadas ha tenido lugar en ellas un acentuado proceso de ocupación antrópica, con actividades abastecidas exclusivamente por agua subterránea extraída principalmente del acuífero semiconfinado Puelche (doméstico, industrial, florihortícola y recreativo) y en menor medida, del acuífero Pampeano (florihortícola).

Desde el estudio hidrogeológico a escala regional realizado hace aproximadamente 40 años, no han sido superadas todavía las limitaciones relacionadas al conocimiento del recurso hídrico subterráneo tales como el resguardo de perfiles geológicos con sus descripciones, la medición de niveles con frecuencia adecuada, así como los caudales de extracción, parámetros hidráulicos, control y monitoreo de calidad, entre otras, ya señaladas EASNE, 1972.

No obstante resulta de importancia destacar la iniciativa de organismos como la Autoridad del Agua (ADA) y el Consejo Federal de Inversiones (CFI), al promover y financiar el estudio integral de cuencas pequeñas del NE de

la provincia con el fin de planificar y gestionar el agua subterránea.

Se plantea como objetivo por un lado, presentar la hidrodinámica elaborada en base al relevamiento del recurso subterráneo, realizado en el mes de mayo de 2010, y por el otro, su comparación con información antecedente, generada a fines de la década del '60.

Características generales del área

En un ambiente de llanura del NE de la provincia de Buenos Aires, el área de estudio abarca 160 km^2. Limita al N-NE con la Llanura Costera paralela al río de La Plata, al E-SE con la cuenca Pereyra-San Juan, al S con la cuenca del río Samborombón y al SW- W - NW con los arroyos Las Piedras y Jiménez.

En un clima subhúmedo-húmedo mesotermal, las precipitaciones modulares anuales registradas en las estaciones Ezeiza y La Plata Observatorio (1973-2009 y 1909-2007), están comprendidas entre 903 mm y 1042 mm. La evapotranspiración real se calcula en 800 mm/año con excesos hídricos del orden de 243 mm anuales para la Estación La Plata Observatorio según la metodología de Thornthwaite - Mather, (1957).

Las unidades geomorfológicas principales son la *Llanura Costera* del río de la Plata y la *Llanura Alta*. La primera no está involucrada en el ámbito de estudio y se vincula con la segunda a través de un "escalón" o antigua terraza, disimulada en parte por la erosión y la actividad antrópica (Hurtado et al., 2006). La segunda se desarrolla entre las cotas de 5 m snm lindante con la Llanura Costera y 30 m snm, en el límite Suroeste con la cuenca del río Samborombon. Incluye geoformas de menor jerarquía como los interfluvios planos-convexos, y las planicies de inundación de los arroyos (Hurtado et al., 2005). Estos presentan en su desarrollo un rumbo general de escurrimiento SW – NE, hacia río de la Plata.

A nivel regional los suelos reconocidos son Argiudoles vérticos y acuérticos, y Natracuoles y Natracuertes (Hurtado et al., 2006).

El sistema geohidrológico y su comportamiento hidrolitológico, pueden resumirse en tres componentes (González et al., 2002): el subsistema activo vinculado al ciclo exógeno, el subsistema pasivo ó profundo y el basamento ó soporte del conjunto. El primero de ellos está compuesto por la Zona No-Saturada (ZNS), un acuífero freático y otro semilibre (Pampeano) que funcionan como una única unidad desde el punto de vista hidráulico, un acuitardo y el acuífero principal (Puelche) de características semiconfinadas. El pasivo está compuesto por dos acuíferos confinados (Paraná y Olivos), limitados por sendos acuícludos, mientras que el basamento, de comportamiento acuífugo, está conformado por rocas ígneas y metamórficas.

En referencia a la hidroquímica subterránea, se reconocen para los acuíferos Pampeano y Puelche aguas bicarbonatadas de tipo sódicas.

Metodología

El presente trabajo contó con información antecedente Artaza (1943), EASNE (1972), González (2005), informes inéditos, perfiles geológicos de perforaciones de la batería bombeo de Berazategui e informes técnicos de establecimientos industriales.

Para la hidrodinámica subterránea de los acuíferos Pampeano y Puelche se realizaron tareas de gabinete y campo. En la primera se contactó a los responsables del abastecimiento público en los Municipios de Florencio Varela (ABSA-Aguas Bonaerenses Sociedad Anónima) y Berazategui (Secretaría de Servicios Sanitarios), establecimientos industriales y escuelas. En campo se realizó el censo de perforaciones o fuentes de agua preexistente, para establecer una red de monitoreo con representatividad espacial y fácil acceso a los sitios. Se midió la profundidad de agua subterránea y parámetros fisicoquímicos *in situ* como conductividad eléctrica (CE), pH, temperatura, oxígeno disuelto y potencial redox.

Las redes de flujo se construyeron con la profundidad medida en cada sitio, la cota topográfica obtenida de la cartografía IGM y la altura del brocal, calculando las alturas freatimétricas y potenciométricas expresadas en metros sobre el nivel del mar. Se debe aclarar que las alturas equipotenciales tanto del acuífero Puelche como Pampeano corresponden a valores estáticos y dinámicos que reflejan la situación de Mayo de 2010.La escala de trabajo utilizada fue de 1:50000, con una equidistancia de 5 m.

La lectura de los mapas equipotenciales permitió reconocer la morfología de la superficie potenciométrica, la dirección de escurrimiento, las zonas de recarga, circulación y descarga, y su relación con el agua superficial.

Con los gradientes hidráulicos asociados a valores de conductividad hidráulica (K), obtenidos de ensayos antecedentes y de porosidad efectiva (θ) para cada acuífero, se calcularon las velocidades efectivas promedio, máximas y mínimas correspondientes.

Con relación al trabajo antecedente de fines de los ’60, se digitalizaron las redes de flujo de ambos acuíferos ubicando en una misma base digital georeferenciada los diferentes mapas, logrando la superposición y posterior comparación de las curvas equipotenciales.

Resultados

De 144 sitios relevados en ambas cuencas, 68 puntos de control conforman la red de monitoreo, 29 pozos al acuífero Pampeano y 39 al acuífero Puelche, correspondientes a perforaciones de escuelas, industrias, quinteros, abastecimiento individual, sumadas a aquellas administradas por el Municipio de Berazategui, y por la empresa ABSA, en el partido de Florencio Varela.

A continuación se analiza la dinámica del agua subterránea para cada acuífero, con localización de las áreas de recarga-circulación-descarga y cálculo de gradientes hidráulico y velocidad de flujo.

Hidrodinámica del acuífero Pampeano

La dinámica del flujo subterráneo en el acuífero Pampeano se muestra en la Figura 1, donde las curvas equipotenciales presentan un valor máximo de 20 m snm y uno mínimo de -10 m snm.

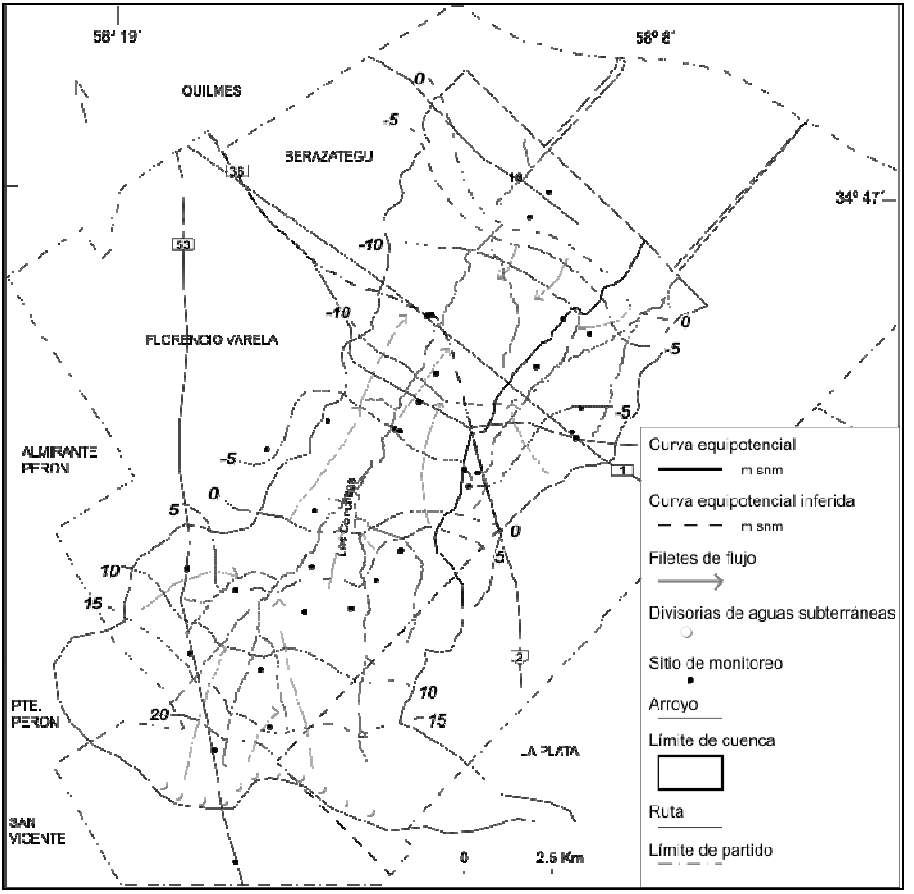


Figura 1. Mapa equipotencial del acuífero Pampeano – Mayo de 2010.

La dirección regional del escurrimiento subterráneo para la cuenca Conchitas – Plátanos es SW - NE hacia el río de La Plata en su sector superior a medio, con algunas

variaciones locales en cercanías del curso superficial. En la parte media a baja, si bien mantiene la dirección, invierte el sentido.

En el caso de la cuenca del arroyo Baldovinos, se reconoce una dirección Noreste – Suroeste y Sureste – Noroeste con sentido de flujo hacia el límite entre ambas cuencas.

La morfología de la superficie freática manifiesta un patrón radial sobre el sector de la cuenca alta a media con tendencia a convergente sobre el ámbito de la zona media a baja donde existe una distorsión en las curvas equipotenciales, traducida en una amplia hidroforma negativa, enmarcada por la isolínea de -10 m que afecta a ambas cuencas.

La disposición de las curvas equipotenciales y de los filetes de flujo divergentes del sector Suroeste, Sur y Sureste, permiten identificar áreas de recarga que son consecuencia de las características climáticas (zona húmeda), topográficas (pendientes suaves) e hidrolitológicas (acuífero libre), definen un proceso de tipo autóctono directo, en coincidencia con las divisorias superficiales e interfluvios menores.

La circulación y descarga tienen lugar hacia el sector medio de la cuenca, donde la curva isofreática de 0 m snm, refleja la extracción por bombeo presente tanto en el acuífero Pampeano como en el Puelche.

En cuanto a la relación agua superficial - agua subterránea, por la disposición de las curvas equipotenciales y los filetes de flujo en el sector de cabeceras, se interpreta para los arroyos un comportamiento indiferente con tendencia a influente o perdedor, basado además en las profundidades de nivel registradas (10 m a 15 m). Hacia el sector medio e inferior de la cuenca, el carácter indiferente e influente se mantiene por la acción antrópica mencionada, con profundidades mayores a 15 m.

La pendiente de la superficie freática o gradiente hidráulico presenta un promedio para toda el área de 4,2. 10^{-3}, con mínimos del orden de 1,2. 10^{-3}, localizados en el sector superior - medio de la cuenca, y máximos de 9,0. 10^{-3}, en la zona urbanizada del Municipio de Berazategui (cuenca media baja).

Para el cálculo de la velocidad efectiva, se empleó la información antecedente de Auge (2005), con un promedio de 5 m/d de K, mientras que para la porosidad efectiva se asignó un valor de 0,10 (limos arenosos). Luego con los gradientes extremos de 1,2. 10^{-3} y 9,0. 10^{-3}, la velocidad efectiva en el Pampeano alcanza valores de 6 cm/día a 45 cm/día, para el sector medio, y el área de bombeo, respectivamente.

Se observa en líneas generales que el comportamiento hidrodinámico descripto se encuentra instalado en las cuencas desde los años ´70, situación reconocida por EASNE (1972), Hernández (1975, 1978) y Ruíz de Galarreta (1996).

Hidrodinámica del acuífero Puelche

La hidrodinámica del acuífero Puelche surge del análisis de la red de flujo en la Figura 2, donde las curvas equipotenciales presentan un valor máximo de 20 m snm y mínimo de -25 m snm, indicando los filetes el escurrimiento subterráneo general con dirección Sur - Norte en sentido Norte-Noreste, mejor representado en el sector superior y medio de la cuenca. Ya, en la parte baja del sector medio y en el sector bajo, el sentido se modifica con inversión hacia el Este, Sur y Sureste, concentrándose hacia el ejido urbano del partido de Berazategui (localidades de Gutiérrez, Hudson, Ranelagh).

Siguiendo el orden recarga-circulación-descarga que caracteriza al circuito hidrodinámico se señala que la recarga natural reconocida para el acuífero Puelche, es de tipo autóctona indirecta, proceso ya señalado en EASNE (1972), Auge et al. (2002), Auge (2005) y González (2005), donde se identifica una dinámica vertical del flujo a través del acuitardo, impuesta por la menor altura potenciométrica respecto al acuífero Pampeano, lo cual se traduce en una filtración vertical con sentido descendente.

Respecto a la circulación, las curvas equipotenciales y los filetes de flujo definen una morfología de la capa de tipo radial en el sector de la cuenca alta, tanto del arroyo Conchitas – Plátanos como del Baldovinos, pasando a cilíndrica convergente en el partido de Berazategui, donde se generan hidroformas negativas (conos de depresión).

Dentro de la mayor, se distingue un máximo puntual de -29,5 m snm con epicentro en un pozo asociado a la actividad industrial. También se reconoce una hidroforma cerrada de -25 m snm, elongada en sentido Noroeste – Sureste, la cual enmarca a los pozos medidos en la batería de Berazategui; mientras que las curvas correspondientes a -20 m snm y -10m snm, encierran a dos pozos de Berazategui, y otros dos de la batería de ABSA, en Florencio Varela. El cierre de las curvas de -25 m snm y -20 m snm se infiere en cercanías de la llanura costera.

La interferencia de los conos de depresión ha provocado la coalescencia y ampliación de

los mismos alcanzando el ápice de los principales, niveles negativos desde -29,1 hasta -26,9 m snm, traducidos en profundidades máximas que van desde 40 m (ABSA – Florencio Varela) hasta 46 m (Berazategui).

El gradiente hidráulico calculado sobre los filetes de flujo es de un promedio para toda la cuenca de 1,58. 10^{-2}, con valores mínimos de 3,49. 10^{-3} y máximos de 4,0. 10^{-2}. Se reconoce en el sector superior un promedio de 6,33. 10^{-3}; en tanto que para los sectores medio y bajo de 2,01. 10^{-2} y 1,31. 10^{-2} respectivamente.

Considerando los gradientes mínimo y máximo, los valores medios de K de 28 m/d y 24 m/d (ensayos de bombeo de ABSA y Municipio de Berazategui), y teniendo en cuenta una porosidad efectiva de 0,20, para las arenas, se obtiene la velocidad efectiva de flujo subterráneo según expresión de Darcy.

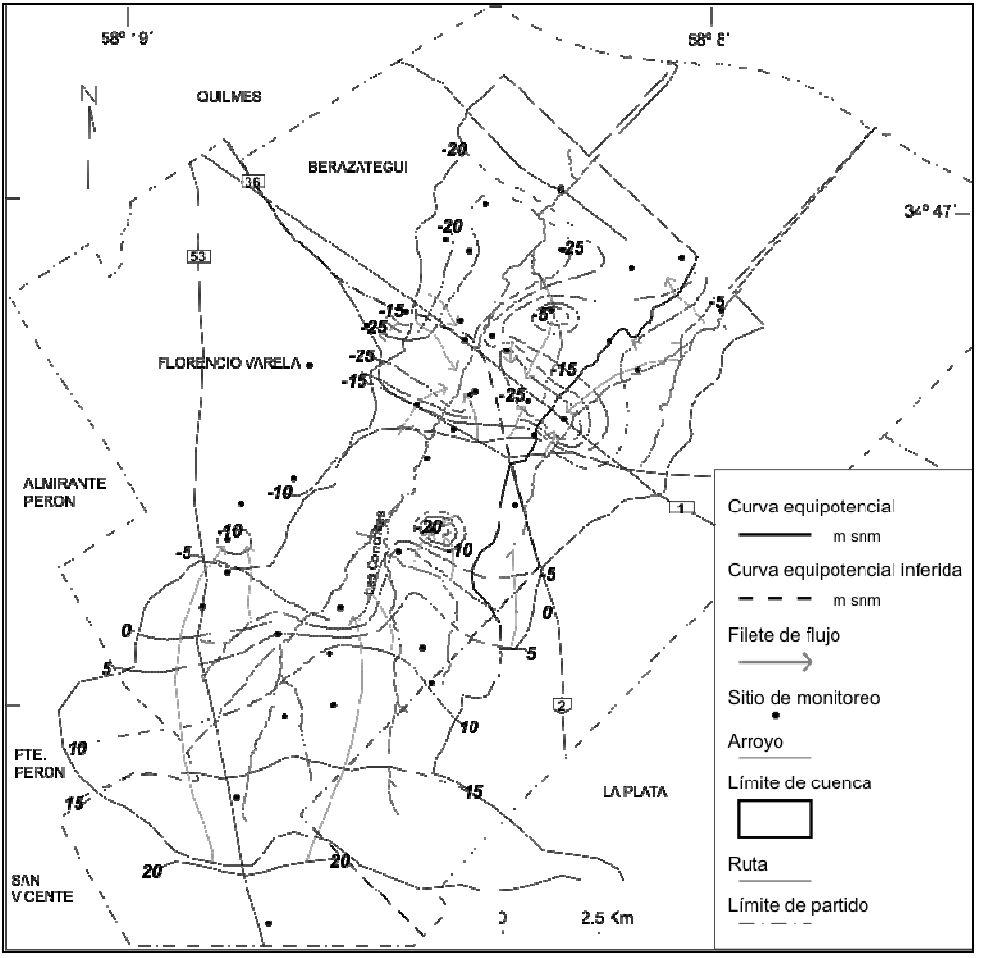


Figura 2. Mapa equipotencial del acuífero Puelche - Mayo de 2010

En el sector superior de la cuenca es del orden de 0,49 m/día, y en el sector medio a bajo es de 4,85 m/d, asociada a los ápices más profundos de las hidroformas negativas.

Por lo expuesto, la descarga del sistema está directamente vinculada con el bombeo, modificando la descarga natural, ya señalada

por EASNE (1972), Hernández (1978), y Ruiz de Galarreta (1996).

En relación a las profundidades máximas alcanzadas por el nivel piezométrico (entre 40 mbbp y 46 mbbp) se puede interpretar que la condición de semiconfinamiento cambia a libre en Berazategui donde el techo de las arenas se ubica entre 29 mbbp y 46 mbbp.

Análisis Comparativo 1969-2010

Se realizó una comparación de los niveles freáticos y piezométricos entre las mediciones efectuadas en mayo de 2010 y las registradas para el año 1969 por el EASNE (1972). Si bien existen algunos estudios comprendidos entre las dos fechas consideradas (1978 y 1996) éstos no abarcan las cuencas en su totalidad, prefiriendo mostrar sólo los extremos mencionados.

En la Figura 3 se muestra la superposición de las curvas equipotenciales 2010 y 1969 para el acuífero Pampeano. En líneas generales, se observa un desfasaje de la posición de hasta 10 km en el sentido Sur-Suroeste de las curvas freatimétricas de 10 m snm y 5 m snm registradas en 1969 respecto de las medidas en 2010. Se evidencia una velocidad de desplazamiento aguas arriba de toda la zona deprimida de entre 120 m a 240 m por año. Una diferencia notable está dada por la curva de 0 m snm, la cual se ubica en la actualidad en la cuenca alta, mientras que en 1969 podría inferirse próxima a la llanura costera.

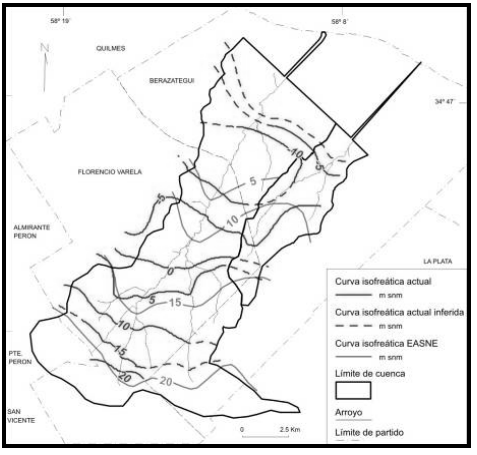


Figura 3. Acuífero Pampeano. Redes de flujo 1969 y2010.

El desplazamiento de las curvas del acuífero Pampeano en dirección aguas arriba es el reflejo de la profundización de los niveles, en respuesta al bombeo del acuífero Puelche

En la Figura 4 el acuífero semiconfinado también muestra un desfasaje importante entre ambos períodos, señalando diferencias notables en cuanto a la morfología de la capa, debido a que presenta conos de depresión más definidos y amplios que los existentes en 1969.

Si bien en ese año ya se registraban valores negativos (curva de -20 m snm) éstos se situaban en el extremo Norte y Noroeste de la cuenca, mientras que en la actualidad las mayores depresiones se ubican en el sector centro-este, influenciado principalmente por la incorporación de nuevos pozos a la batería de Berazategui en la zona El Pato en reemplazo de aquellos fuera de servicio cercanos a la llanura costera. Se suman las nuevas perforaciones incorporadas en Florencio Varela para el abastecimiento de las localidades de Ingeniero Allan y La Rotonda.

Al comparar la posición de la curva 0 m snm se evidencia el desplazamiento aguas arriba de toda la zona deprimida, que hoy se ubica en promedio a 5 km al Suroeste de la posición más antigua, equivalente a un avance de 120 m por año.

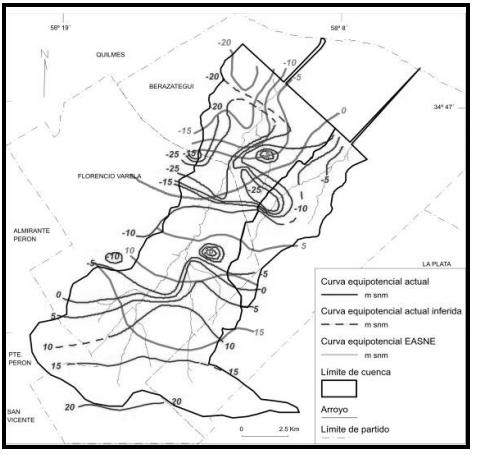


Figura 4. Acuífero Puelche. Redes de flujo1969 y 2010.

Conclusiones y Recomendaciones

El recurso hídrico subterráneo constituye la principal fuente de abastecimiento de agua para consumo humano y la única para uso industrial, florihortícola y recreativo.

La recarga del acuífero Pampeano es de tipo autóctona directa, producto de la infiltración

de agua de lluvia, mientras que en el Puelche es autóctona indirecta por filtración vertical descendente a través del acuitardo.

La dirección del flujo subterráneo en ambos acuíferos es Suroeste-Noreste con sentido Noreste en la cuenca alta, invirtiéndose en el sector medio a bajo.

Existe una alteración importante de lo que habría sido la red de flujo natural en ambos acuíferos, producto de la presencia de grandes conos de depresión generados por la explotación intensiva.

La relación agua superficial – agua subterránea originalmente de carácter efluente, ha sido modificada a indiferente – influente.

El bombeo intensivo llevado a cabo durante décadas en el acuífero Puelche y, el consecuente aumento de la filtración vertical descendente, se manifiesta de modo extremo con la ausencia del acuífero Pampeano en el sector suprayacente al gran cono de depresión, ubicado en el partido de Berazategui, donde el acuífero inferior pierde por sectores su carácter natural de semiconfinado quedando como libre.

En relación a las actividades desarrolladas en el ámbito de estudio se reconoce una mayor cobertura en el uso florihortícola (de tipo intensivo-bajo cubierta) en conflicto creciente con requerimientos en cantidad y calidad por parte del abastecimiento público, reflejado tanto en la ampliación de la batería de Berazategui (zona El Pato) como en la zona rural a suburbana de Florencio Varela (aguas arriba).

En la cuenca alta las curvas equipotenciales se desplazaron en dirección aguas arriba tanto para el acuífero Pampeano como para el Puelche, reflejo de la profundización de sus niveles (se toma como referencia la curva de 0 msn).

El sostenimiento, expansión y profundización de las hidroformas negativas ha llegado a afectar a las reservas geológicas del sistema, donde los ingresos no cubren la demanda, indicando una evolución desfavorable desde finales de los años ‘60 a la actualidad, situación crítica para la disponibilidad del recurso.

Las recomendaciones se centran en:

- Continuar con los estudios hidrogeológicos que permitan seguir la evolución del agua subterránea, tanto en cantidad como en calidad, con ampliación del monitoreo hacia cuencas vecinas.

-Requerir un control preciso de los volúmenes de extracción, a través de caudalímetros, por parte de las autoridades estatales, cooperativas, concesionarios, extensivo a todos los usos, con el fin de conocer, calcular y ajustar los egresos del sistema.

-Exigir a los distintos operadores del agua subterránea el monitoreo de las obras de captación, acompañado del correspondiente mantenimiento, control y seguimiento con muestreos y análisis químicos normalizados.

-Considerar la incorporación al sistema de otras fuentes de abastecimiento como el agua superficial procedente del río de La Plata, la cual representaría un refuerzo y asistencia para el abasto público y una potencial recuperación del recurso hídrico subterráneo bajo control, recurriendo al uso conjuntivo.

-Propender a una priorización del uso de agua subterránea, en vista de los conflictos potenciales del público con otros destinos, incluyendo si fuese necesario perímetros de protección.

-Requerir a todos los actores intervinientes en la extracción del agua el resguardo de la información generada (perfiles geológicos, caudales, ensayos de bombeo, niveles, análisis químicos), a fin de garantizar el historial de registros y su posterior disponibilidad para el conocimiento del vital recurso, y así asegurar un adecuado manejo y una gestión responsable.

Referencias

Auge, M.P., Hernández, M.A. y Hernández, L. 2002. Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *XXXII IAH Congress - VI Congreso ALHSUD.624-633.Mar del Plata.*

Auge, M. 2005. Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. En: Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino*, Cap. XXII: 293 – 312. La Plata.

Custodio, E. y Llamas M. R. 1983. *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega. Barcelona.

EASNE 1972. Contribución al estudio geohidrológico del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. *EASNE-CFI. Serie.Téc.*24, Tomo I y II.

González, N., Trovatto, M. M. y Hernández M. A. 2002. Modelo Conceptual Hidrodinámico en una cuenca tributaria del río de la Plata (Buenos Aires, Argentina). XXXII IAH & VI ALSHUD CONGRESS 2002. Mar del Plata.

González, N. 2005. Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. En: Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*, Cap. XXII: 359 – 374. La Plata.

Hernández, M.A. 1975. Efectos de la sobreexplotación de aguas subterráneas en el Gran Buenos Aires y alrededores. República Argentina. *II Congreso Ibero Americano de Geología Económica*. Tomo I, pp.417-450. Buenos Aires.

Hernández, M.A. 1978. Reconocimiento hidrodinámico e hidroquímico de la interfase agua dulce - agua salada en las aguas subterráneas del estuario del Plata (Partidos de Quilmes y Berazategui, Buenos Aires). *VII Congreso Geológico Argentino.* Actas II, pp. 273-285. Neuquén.

Hurtado, M.A.; Giménez, J.E.; Martínez, O.R.; Cabral, M.G.; Lucesoli, H.; Forte, L.M. da Silva, M. M.; Crincoli, A. C. Sánchez, C.A.; y Somoza Sánchez, V.R. 2005. Elaboración de Cartografía Temática integrada a Sistema de Información Geográfica (SIG) y Propuesta de Ordenamiento Territorial y Zonificación según Usos. Partido de Florencio Varela. 91 pág. (Inédito).

Hurtado, M.A.; Giménez, J.E. y Cabral, M.G. 2006. Suelos del partido de Berazategui como base para el planeamiento ambiental y ordenamiento territorial. *CFI-FCNyM*. 180 pág. y mapas.

Ruiz de Galarreta, V.A 1996. Importancia del conocimiento y seguimiento geohidrológico de un acuífero sometido a intensa explotación (Partido de Berazategui). *XVI Congreso Nacional del Agua*, San Martin de los Andes, Neuquén.

Thornthwaite, C. W. Mather, J. R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Clim. Drexel Inst.of Techn*. 10: 185-311.

UIDD-GA. 2011. Plan piloto de gestión de las Cuencas de los arroyos Conchitas – Plátanos y Baldovinos, Convenio (UIDDGA – FI – UNLP). *Autoridad del Agua (ADA) y Consejo Federal de Inversiones (CFI)*. Junio 2011.

Relación entre acuíferos y lagunas del noreste de La Pampa, Argentina, desde una perspectiva hidrológica ambiental

Carla Moscardi [(1)] *y Carlos Schulz* [(2)]

[(1)] Universidad Nacional de la Patagonia Austral - Unidad Académica San Julián. Colón y Sargento Cabral, Puerto San Julián, provincia de Santa Cruz, Argentina. 02962-452319
[(2)] Universidad Nacional de La Pampa - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Argentina. Avda. Uruguay 151, Santa Rosa, provincia de La Pampa, Argentina. 02954-425166

Mail de contacto: carlamoscardi@yahoo.com.ar

RESUMEN

Este trabajo consiste en un estudio hidrológico, hidroquímico y ambiental de un área de llanura y se explica la relación existente entre las aguas subterráneas y superficiales. Los cambios que sufren las lagunas son del tipo hidrodinámico en relación al intercambio y conexión entre el agua superficial y los acuíferos y a la variación en la superficie cubierta de agua. Los cambios hidroquímicos, analizados a partir de las proporciones de iones mayoritarios y la ubicación en la curva isotópica responden a este fenómeno. La variación extrema de inundación o sequía responde a la combinación de los factores hidrometeorológicos y geomorfológicos. Se obtienen diferentes escenarios de funcionamiento de los cuerpos lagunares con la finalidad de establecer pautas concretas de manejo integral y sustentable. Se recomienda planificar el uso del recurso teniendo en cuenta la dinámica hidrológica de los sistemas ambientales como medio de transporte de posibles impactos negativos sobre el recurso hídrico.
Palabras clave: Relación agua subterránea-superficial, La Pampa.

ABSTRACT

This work is a study hydrological, hydrochemical and environmental plain area and explains the relationship between groundwater and surface waters. The changes experienced by hydrodynamic type gaps are related to the exchange and connection between surface water and groundwater and the variation in the area covered by water. Hydrochemical changes respond to this phenomenon, as well as the contents of major ions and isotope curve location. Extreme variation of drought or flood responds to a combination of factors, geomorphology and hydrology. This gives different operating scenarios lagoon bodies in order to establish specific guidelines for the integrated management and sustainable. It is recommended that resource use planning considering the hydrological dynamics of environmental systems for transportation of potential negative impacts on water resources.
Keywords: relationship groundwater-surface waters, La Pampa.

Introducción

Los ambientes lagunares en áreas de llanura, y particularmente los ubicados en la región noreste de la provincia de La Pampa sufren grandes cambios, dependiendo de la situación meteorológica dominante, desde una situación de mínima pluviosidad a una de máxima. También influye notablemente el rol que cumplen, estos ambientes lagunares en el medio dónde se encuentran ubicados. La situación hidrológica en el área es controvertida. Por un lado existe una necesidad de localizar nuevas fuentes de agua potable de buena calidad para abastecer la población habitante de la región y los usos productivos, así como conocer el volumen de explotación correcto a fin de no agotar o dañar el recurso. Por otro, se presentan periódicamente eventos extremos como sequías o inundaciones donde los déficits o excesos hídricos ocasionan daños de distinta índole, sumados a grandes pérdidas económicas. Para estos casos puntuales se han realizado estudios para mitigar esas situaciones, evaluar los impactos ambientales y lograr un manejo integrado de la cuenca.

El agua de lluvia, la subterránea y la superficial son parte del mismo ciclo hidrológico, por lo tanto, se considera de suma importancia obtener un modelo de funcionamiento de la dinámica del agua superficial y subterránea y la interacción entre ambas a fin de lograr un uso sustentable del recurso hídrico de la región. La

caracterización ambiental que incluye el uso que el hombre ha realizado históricamente y actualmente de estos ambientes, complementará y permitirá inferir sobre diferentes situaciones en el mismo modelo.
Es importante resaltar que, el análisis de la relación entre el agua superficial y subterránea desde una perspectiva hidrológica – ambiental, implica entender el sistema bajo estudio como una unidad integral en la cual las entradas (E) pueden interaccionar con todos los subsistemas presentes y ocurren salidas (S) del mismo, de manera continua y dinámica en el espacio y el tiempo.
El objetivo general de este trabajo ha sido establecer un modelo conceptual de funcionamiento de los cuerpos de agua superficiales de la región noreste de la provincia de La Pampa, en función de su relación con los acuíferos y su caracterización ambiental, a fin de poder establecer pautas de manejo integral y sustentable del recurso hídrico de la región.
Para lograr este objetivo se caracterizaron desde el punto de vista hidrológico, hidroquímico y ambiental los cuerpos de agua superficial presentes. Se estudiaron los acuíferos, sus variaciones y fluctuaciones freatimétricas en el área de estudio y se integraron en un modelo conceptual de funcionamiento.
Los modelos logrados permitirán establecer pautas de manejo integral y sustentable de los recursos hídricos presentes en la región noreste de la provincia de La Pampa.

Región bajo estudio

La zona bajo estudio comprende el noreste de la provincia de La Pampa, limitando al norte con la provincia de Córdoba y al este con la provincia de Buenos Aires, ambos límites políticos (Figura 1) Los límites sur y oeste se corresponden con el paralelo 36º50' y el meridiano de 64º00', respectivamente. Estos últimos, son límites arbitrarios establecidos en estudios previos (Mariño 2003; Schulz y Castro, 2005), los cuales se toman como referencia, para el desarrollo de este trabajo. En total, el área tiene una longitud norte-sur de aproximadamente 100 Km., y un ancho medio de 40 Km., lo que hace una superficie de unos 4000 km^2. Las ciudades con mayor densidad poblacional situadas dentro del área de norte a sur son: Intendente Alvear, General Pico y Quemú Quemú, coincidentes con los sitios de muestreo considerados en este trabajo.

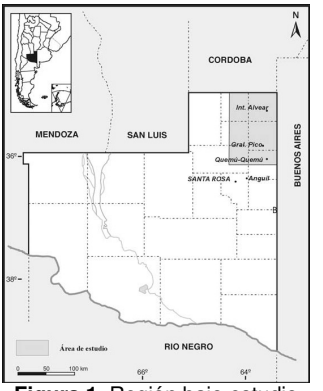


Figura 1. Región bajo estudio

Metodología

Los pasos metodológicos generales han sido los siguientes:

- Recopilación de antecedentes y bibliografía general y específica de la temática, tanto de la región como de otros ambientes de similares características.
- Interpretación de imágenes satelitales del área bajo estudio, realizando un análisis temporal, de estimación de cambios en el uso del suelo y de cambios de la superficie cubierta de agua.
- Análisis climático de la región. Estudio de las series de datos climáticos.
- Descripción de los factores físicos: geología, geomorfología y edafología; factores biológicos: región biogeográfica, flora, fauna, biodiversidad; factores antrópicos: sociedad, población, uso del suelo, actividades económicas, agua potable, entre otros.
- Toma de muestras en los sitios seleccionados como de referencia y envío a laboratorios para la determinación de los parámetros físico-químicos e isotópicos, se detalla la metodología de los análisis en el capítulo correspondiente.
- Interpretación de los datos de calidad físico-química de las aguas e isótopos ambientales.
- Análisis de los datos, interpretación de los resultados y diseño del modelo de funcionamiento.

Resultados

Clima

Se tomaron las series de datos climáticos que se detallan en la tabla a continuación:

Tabla 1. Variables y series climatológicas

Localidad	Serie	Variables	Fuente
Quemú Quemú	1914 – 2009	Precipitación Temperatura Viento	Estación meteorológica a cargo UNLPam - INTA Anguil
General Pico	1911 – 2009	Precipitación Temperatura Viento	Estación meteorológica del SMN
Intendente Alvear	1956 – 2009	Precipitación	Registro Pluviómetrico (Policía de la provincia LP)

A partir de estos datos se graficó la distribución anual de las lluvias a los largo de toda la serie y para cada una de las localidades arriba mencionadas. En el gráfico 1 se puede observar el tratamiento realizado para la localidad de Intendente Alvear. A partir de esta distribución se identificaron los años extremadamente húmedos aquellos que superan la media anual más un desvío estándar y años húmedos los que superan la media. También se consideran años extremadamente secos los que presentan valores menores a la media anual menos un desvío estándar y años secos los que se encuentran por debajo de la media. Mientras que se consideran años medios los que se aproximan al promedio total anual de la serie de datos.

A partir de la interpretación de los gráficos mencionados, se obtuvo el régimen pluviométrico para cada una de las localidades. La distribución estacional de las lluvias, según año hidrológico, es similar en las tres localidades consideradas, corroborando de esta manera la homogeneidad en la estacionalidad de las precipitaciones a nivel regional. Los promedios mensuales mayores ocurren en el período estival y los mínimos en el invernal.

En relación a la variable temperatura, se resaltan los datos de los meses representativos de las estaciones extremas, verano e invierno: La media de enero de la zona en estudio no presenta diferencias marcadas de norte a sur y sus valores oscilan alrededor de 24ºC. En cambio, la temperatura media del mes de julio tiene un gradiente decreciente en sentido norte a sur con valores de 8,1ºC para General Pico y 7,4ºC para Quemú Quemú.

Del análisis del balance hídrico anual y seriado, surgen dos momentos bien diferenciados, casi coincidentes con la distribución de las precipitaciones. Ellos son abril/septiembre y octubre/marzo. Para las series climatológicas disponibles y en las tres localidades analizadas y las dos capacidades de campo consideradas (100 y 200 mm.) no hubo excesos de agua, en cambio se encontraron valores de deficiencia hídrica para los dos momentos, siendo muy importantes durante los meses estivales (octubre/marzo).

Geomorfología

Geomorfológicamente el área que se estudia corresponde a la subregión "Planicies Medanosas" (Cano *et al*, 1980) o a la unidad "Llanura Pampeana de Modelado Eólico Superimpuesto (Calmels, 1996) y desde el punto de vista fisiográfico y en sentido regional, puede considerarse como una extensa llanura con suave pendiente hacia el este, con un gradiente del orden de 0,4 m/km.

Los procesos morfogenéticos que actuaron fundamentalmente en esta área fueron eólicos (de acumulación y deflación) produciendo una capa arenosa de espesor variable. Las geoformas mayores lucen como dorsales de significativa extensión longitudinal, las cuales limitan por el oeste con amplias depresiones subparalelas y de carácter endorreico y hacia el este se enlazan paulatinamente con el ambiente de llanura. (Schulz y Castro, 2005).

Edafología

Los suelos dominantes en la región son los del tipo Hapludol éntico, familia franca gruesa, mixta térmica y el asociado es de reacción ácida y moderadamente bien drenado (Cano *et al*, 1980). Este suelo presenta incipiente evolución genética con un sencillo perfil del tipo A-AC-C y la tosca se encuentra cercana a los 2 m. El suelo es profundo con un contenido de materia orgánica, cercano al 2%, reuniendo las exigencias de un epipedón mólico (Cano *et al*, 1980). El drenaje es algo excesivo, con una permeabilidad rápida, un escurrimiento nulo y capa freática algo profunda (7 a 8 m), aunque en algunos sectores puede tener menos de cinco metros, un régimen de humedad údico, marginal al ústico, temperatura térmica y su clase granulométrica es franco gruesa. Sus limitaciones son las características para suelos de áreas semiáridas, es decir regular capacidad de retención de la humedad, erosión eólica ligera y sequías estacionales.

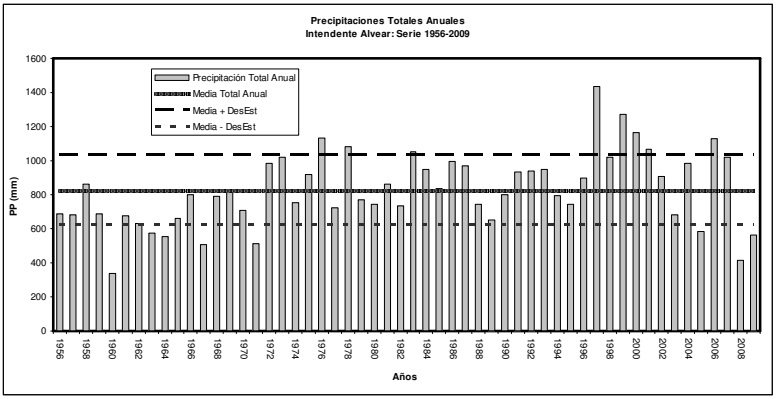


Gráfico 1. Precipitaciones Totales Anuales. Int. Alvear.

Geología e hidrogeología

Desde el punto de vista geológico-estratigráfico**,** se reconocen en el área las siguientes unidades, descriptas de lo más antiguo a lo más reciente:

Formación Paraná: se atribuyen a las capas de origen marino que aparecen por debajo de 191 m.b.b.p.. Está compuesta por arcillas verdes, a veces con restos de pelecípodos, con cristales tabulares de yeso y capitas intercaladas de limos castaños. La edad de esta unidad es miocena. La separación, entre las distintas formaciones, está representada en cada caso, por una discordancia de erosión.

Formación Cerro Azul: Con este nombre se designa un conjunto de capas alternantes limo-arenosas y arenas muy finas limosas de color castaño rojizo. Arcillosas mezcladas de color pardo amarillento a pardo rosado de origen continental. Normalmente están consolidadas con presencia variable de carbonato de calcio, desde el estado pulverulento al de cemento. Materiales de origen principalmente eólico, finos tipo loess, con paleosuelos intercalados. Su potencia alcanza hasta los 190 mts y se le asigna edad miocena superior o mioceno tardío.

Formación Pampeano / Arenosa / Loess: Manto delgado de limos arenosos eólicos con potencias máximas de hasta 2 m, acumulados durante el Pleistoceno tardío – Holoceno.

Formación Junín, que presenta dos miembros: Miembro basal y Miembro superior.

Cada una de las formaciones geológicas descriptas se comporta de manera diferente en relación al almacenamiento de agua En la tabla 2 se integra la información teniendo en cuenta las diferentes fuentes bibliográficas.

Tabla 2. Perfil hidroestratigráfico

Prof. (mbbp)	Material	Formación		Edad	Autor/es Año	Carácter hidrogeológico
3	Arenas de tamaño variable, a veces limosas, no consolidadas, sin contenido cálcico. Compuestas por cuarzo, feldespatos, máficos y vidrio.	Miembro Superior - Formación Junín		Holoceno	CFI 1975 / Giai y Gatto Cáceres 1996 / Mariño 2003	Acuífero
6	Arenas gruesas a finas y limosas o limosas-arenosas, son cuarzosas, tienen vidrio y en menor cantidad máficos y feldespatos. Carbonato de calcio en estado pulverulento.	Formación Arenosa (Malán 1983)	Miembro Inferior - Formación Junín			
15	Limos arenosos	Formación Arenosa		Pleistoceno Tardío	Mariño 2003 / Zárate (Com. Pers.)	Acuífero
	Arenas gruesas a medianas en la base y arenas finas con vidrio volcánico en la parte superior.	Formación Pampeano (Salso, 1996; Malán, 1983)		Plioceno tardío		
100	Arenas finas a limosas cementadas por material calcáreo. Intercalaciones limo-arcillosas. Capas y nódulos de tosca		Formación Cerro Azul	Mioceno Superior	Linares y Llambías 1980 / Mariño 2003 / Folguera y Zárate 2009	Acuitardo
165	Arcillas verdes y castañas, arenas gruesas y medianas con arcillas grises	Formación Paraná		Mioceno	Irigoyen 1975 / Giai 1972 / Mariño 2003	Acuicludo a acuitardo en algunos niveles
250	Areniscas Cuarzosas			Triásico	Mariño 2003	Acuífero

Piezometría

La superficie piezométrica de la región se encuentra a una profundidad variable en un rango de 0 y 10 metros, dependiendo de los factores enunciados: clima, geomorfología, perfil estratigráfico, entre otros. En rasgos generales la superficie freática acompaña, de manera atenuada, a la topográfica, con niveles estáticos más profundos en las partes elevadas, hasta aflorar en los bajos, que actúan como áreas de descarga local.

Las variaciones freatimétricas para cada uno de los sitios de referencia, de Norte a Sur, Intendente Alvear (Serie 1993-2007), General Pico (Serie 1978-2007) y Quemú Quemú (Serie 1986-2007), permitieron ver la dinámica del agua en el espacio y en el tiempo. La descarga y conexión con el agua superficial se identifica claramente, aunque no se logró determinar con esta variable la desconexión de ambos sistemas o el cambio de la relación hidráulica de descarga o recarga que puntualmente pueda ocurrir.

Los niveles piezométricos se confrontaron con las precipitaciones para las tres localidades, tomando las series coincidentes de datos. Se corrobora una directa relación de los niveles freáticos menores con los períodos húmedos y extremadamente húmedos considerados. Así mismo, en los años determinados como secos y extremadamente secos el sistema acuífero parece desconectarse.

A nivel regional se dificulta establecer la piezometría de manera gráfica, ya que la misma se ha comprobado se comporta de manera puntual y localizada.

Hidrología superficial

El trabajo basado en la interpretación y comparación espacio-temporal de imágenes satelitales permitió la corroboración de épocas de máxima y mínima situación hidrológica y el cálculo de las superficies de las lagunas en diferentes situaciones.

El estudio de la hidrología superficial del área bajo estudio se basó en el método inductivo, comparando las variables de la imagen con las variables tomadas a campo, principalmente las de los factores físicos descriptos, el clima, la geología y geomorfología y los suelos. Para evaluar los cuerpos de agua seleccionados se utilizaron las imágenes del satélite Landsat 5 TM y 7/Path and Row 228-084 y 288, correspondientes a los años 2000, 2001, 2006 y 2009.

Los resultados de la digitalización de los perímetros de cada uno de los ambientes estudiados y en cada una de las imágenes, en período de sequía y de inundación. A partir de los perímetros se calcularon las superficies, conservando la escala de trabajo y para los dos años considerados extremos, el 2000 y 2009.

Se obtuvieron los siguientes datos comparables:

Tabla 3. Superficies de lagunas

Ambiente Superficial	2000	2009
El Cañadón – Quemú Quemú	31.421.648 m^2 3.142,2 has.	446.354 m^2 44,6 has.
La Arocena – General Pico	2.649.263 m^2 264,9 has. (Total inundado) 60,8 has. (Cuenco principal)	493.290 m^2 49,3 has.
Zona Límite La Pampa/Córdoba: Bañado río Quinto	4.883.610 m^2 488,4 has.	200.099 m^2 20,0 has.

Hidroquímica

De cada uno de los sitios seleccionados como de referencia, se extrajeron muestras de agua para la determinación de los parámetros físico-químicos y para isótopos, tanto en el ambiente superficial como de la perforación.

Las aguas se clasificaron según su tipología. Las muestras de agua subterránea, tanto en General Pico como en Quemú Quemú coinciden en su tipología y son del tipo bicarbonatadas sódicas. El Cañadón y el río Quinto llaman la atención por la similitud en la tipología, ambas resultaron Cloruradas y/o sulfatada sódica, aunque parecen no pertenecer a un mismo sistema de funcionamiento, interrogante para profundizar en futuros estudios. Así mismo ambos sistemas pueden estar atravesando una situación hidrodinámica similar (gran pérdida por evaporación y descarga del acuífero).

La Arocena con aguas bicarbonatadas requieren la profundización del análisis, en base a la comparación de las variables: pH, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica a los largo del tiempo, especialmente desde el año 2000 a la actualidad. Los altos valores de Nitrógeno Total en años anteriores se puede atribuir a eventos de desborde de efluentes cloacales sin tratamiento sobre el cuenco. Actualmente el agua aportante es principalmente de los desagües pluviales de la ciudad de General Pico.

En la Tabla 4 se presentan los análisis isotópicos realizados en las 6 muestras de agua superficial y subterránea.

Tabla 4. Análisis isotópicos de las muestras

Sitio de Muestreo	δ^2H‰ ±1	δ^{18}O‰ ±0,2
Laguna El Cañadon QQ	42	9,1
Perf. Aeródromo QQ	-28	-4,9
Laguna La Arocena GP	26	4,6
Perf. La Pobrecita GP	-28	-4,8
Laguna Límite NW Río V	13	3,6
Perf. Límite NW Río V	-16	-2,0

Los resultados de los análisis isotópicos se han representado en diagramas convencionales δ^2H vs. δ^{18}O conjuntamente con la recta meteórica global *i.e*: $\delta^2H = 8*\delta^{18}O + 10$ ‰, (Gráfico 2.).

El contenido isotópico del agua subterránea de los pozos de Quemú Quemú y General Pico tienen composición isotópica similar consistente con los valores medidos en las precipitaciones de las estaciones Quemú Quemú e Intendente Alvear. El agua de la perforación río Quinto tiene valores más enriquecidos que pueden asignarse a procesos de evaporación previos a la infiltración o a infiltración selectiva.

Las aguas superficiales tienen valores muy enriquecidos evidenciando procesos de evaporación. Estas aguas y el agua subterránea de la zona del río Quinto se alinean en una recta de evaporación cuyo origen es una composición isotópica compatible con la del agua subterránea de la región. Esta situación señala que probablemente el agua de las lagunas tenga una componente subterránea.

Por otro lado se observa que las aguas superficiales muestran mayor o menor evaporación y los valores más enriquecidos corresponden a la laguna El Cañadón. Este muestreo fue realizado en verano cuando las temperaturas y la evaporación son más altas. Asimismo es importante notar que durante la evaporación desde cuerpos superficiales de agua, el fraccionamiento de los isótopos del hidrógeno y oxígeno depende de la temperatura superficial, la velocidad del viento, la salinidad y fundamentalmente de la humedad.

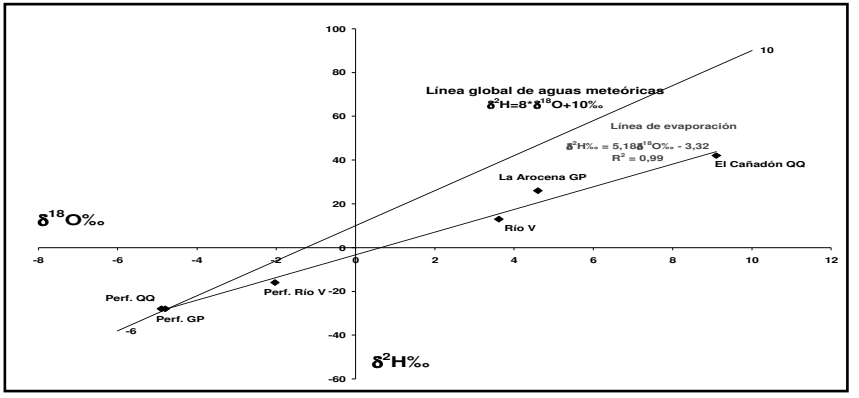


Gráfico 2. δ^2H vs. δ^{18}O de las muestras y línea global de aguas meteóricas.

Modelo conceptual de funcionamiento

Al superponer los sistemas de flujo local, asociados a los cuerpos de agua superficial de referencia en el área de estudio, a las condiciones regionales, resultan interacciones complejas, y esto ocurre independientemente de su posición topográfica. Los procesos hidrológicos asociados con los propios cuerpos de agua superficial, como los niveles superficiales máximos estacionales y la evapotranspiración/evaporación de agua subterránea en los perímetros de cuerpos superficiales, generan complejidad y variación de la dinámica de las interacciones entre aguas subterráneas y superficiales. A lo largo del análisis se pudieron identificar diferentes situaciones hidrológicas en función de la integración de los fenómenos y las variables consideradas. A continuación se presentan los modelos conceptuales logrados para cada situación hidrológica, las cuales se identifican como distintos escenarios.

Escenario 1
Luego de un período de años húmedos y extremadamente húmedos el sistema de lagunas se encuentra colmatado, los niveles acuíferos poco profundos, el agua superficial y subterránea se conectan entre sí. Los bajos topográficos reciben agua de descarga del acuífero y superficial por el aporte de las precipitaciones. Predominan los movimientos horizontales avanzando el agua por la llanura anárquicamente, sin cauces definidos hacia los bajos topográficos. La figura 2 esquematiza el modelo conceptual de funcionamiento para esta situación hidrológica.

Escenario 2
En época de sequía producto de sucesivos años de precipitaciones menores a la media, años secos y extremadamente secos, el sistema bajo estudio se modifica predominando los

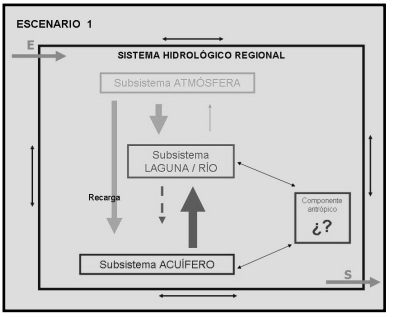


Figura 2. Modelo conceptual. Escenario 1

flujos hidrológicos verticales, de pérdida de agua del sistema. El subsistema de agua superficial parece desconectarse del subsistema acuífero, es decir que se puede invertir la relación hidráulica o anularse. En la figura 3 se observa el modelo que conceptualiza esa dinámica.

Escenario 3
Se plantea un tercer escenario (Figura 4), el cual describe una situación hidrológica media, donde las precipitaciones se ubican alrededor de la media estimada, los acuíferos responden a la dinámica del nivel de explotación, de la alternancia entre aumentos y disminución del nivel freático. En esta situación hidrológica se identifican descargas del acuífero en la superficie e influencia de los ambientes superficiales sobre las aguas subterráneas y son los factores físicos del sistema, los que adquieren mayor protagonismo en la condición hidrodinámica del sistema regional.

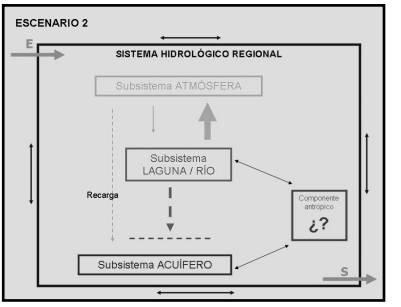


Figura 3. Modelo conceptual. Escenario 2

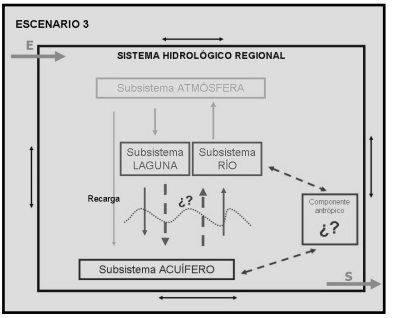


Figura 4. Modelo conceptual. Escenario 3

Es en este escenario 3 dónde se plantean los mayores interrogantes respecto a la presión antrópica sobre los ambientes lagunares de la región. Dejando el interrogante para futuros estudios si las lagunas localizadas en cercanías de centros urbanos, de la región noreste de La Pampa presentan alteraciones de su funcionamiento hidrológico natural esperable.

Conclusiones

En la situación de máxima el acuífero freático trae acumulado los excesos hídricos anuales que la capacidad evapotranspirante de la región no alcanza a compensar dentro del ciclo hidrológico anual, trasladando excedentes de un año a otro. A esta condición hidrometeorológica, se suman las características geológicas y geomorfológicas que mantienen el agua en superficie. En la situación de mínima, momento en el cual se tomaron los datos reales, los diferentes subsistemas superficial/subterráneo se distancian entre sí hasta desconectarse.

En la zona en estudio, la variabilidad climática se asocia con fenómenos con importantes impactos socioeconómicos y ambientales. Dicha variabilidad climática, se relaciona con la ocurrencia de sequías severas o con lluvias intensas. Si los efectos de este extremo climático se incrementan, la zona se verá expuesta a eventos extremos de origen hidrometeorológico, a menos que se corrijan prácticas sociales que incrementan la vulnerabilidad. Bajo este panorama, la planificación, la gestión y la acción frente a los riesgos hidrometeorológicos cobran gran relevancia.

Este análisis de la relación agua – clima - sistema productivo - factores sociodemográficos intenta incidir en el espacio de vinculación entre los actores que generan el conocimiento y quienes diseñan y aplican política pública. Se trata de pensar de una manera distinta los temas de vulnerabilidad hídrica, de los riesgos frente a la variabilidad climática y en particular frente a los eventos hidrometeorológicos extremos, para proponer estrategias de acción que sumen las capacidades del gobierno a la acción de la sociedad.

Referencias

Calmels, A. P., 1996. Bosquejo Geomorfológico de La Provincia de La Pampa. UNLPam. Santa Rosa. 106 p.

Cano, E. G., Casagrande, H. A., Conti, B., Fernandez, R., Hevia, J. C., Lea Plaza, D., Maldonado Pinedo, H., Martinez, M. A., Montes y Peña Zubiate, C. A., 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa-Clima, Geomorfología, Suelo y Vegetación. INTA-Gobierno de La Pampa-UNLPam . Santa Rosa. 493 p.

Folguera A. y Zárate M. 2009. La sedimentación neógena continental en el sector extrandino de Argentina central. Revista de la Asociación Geológica Argentina 64 (4): 692-712.

Giai, S. y R. Gatto Caceres, 1996. Ajuste de un modelo para registros freatimétricos mensuales en General Pico-La Pampa. IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses. Actas 2: 221-227.

Linares, E, Llambías E .et al.,1980. Geología de la Provincia de La Pampa y Geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas. RAGA. Tomo XXXV, Nº1. pp.87-146. Buenos Aires.

Mariño, E. E., 2003. Sistema hidrogeoquímico de un acuífero libre en ambiente medanoso en el área General Pico-Dorila, provincia de La Pampa. Tesis Doctoral en Ciencias Geológicas. Universidad Nacional de Córdoba. 142 p.

Schulz C. J. y Castro E. C., 2005. Estimación de la infiltración eficaz en el sector medanoso del noreste de La Pampa, mediante distintos métodos. IV Congreso Argentino de Hidrogeología, Tomo II: 105-112, Río Cuarto.

Varni, M., Rivas, R. y Entraigas, I. 2003. Interacción de un cuerpo de agua superficial con el agua subterránea en la llanura pampeana, Argentina. Información Tecnológica, 14(6):97-104.

Relación entre el agua superficial y subterránea en la cuenca del Arroyo Buriñigo (Buenos Aires, Argentina)

Francisco Cellone [1], Lucía Gomez [1], Federico Vera [1] y Eleonora Carol [1,2]

[1-] Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata 64 n°3 (1900, La Plata, Argentina).
[2 -] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
Mail de contacto: fcellone@yahoo.com.ar

RESUMEN

El objetivo del trabajo es evaluar la relación agua superficial - subterránea en la cuenca del arroyo Buriñigo (provincia de Buenos Aires) a partir de datos de caudales y contenido de aniones conservativos mayoritarios. Se realizaron mediciones de caudales y de niveles de agua y se extrajeron muestras de agua superficial y subterránea en las que se determinó el contenido en iones mayoritarios. Los resultados muestran que el arroyo es un curso efluente y que en los periodos monitoreados la descarga subterránea hacia el arroyo prácticamente no se percibe. La química del agua freática se relaciona principalmente a la geomorfología mientras que la del arroyo está regulada por la descarga subterránea, los efluentes industriales y la influencia mareal.
Palabras clave: relación agua superficial-subterránea, caudal, hidroquímica.

ABSTRACT

The aim of this study to assess the relationship surface water - groundwater in the Buriñigo creek basin (Province of Buenos Aires) from data flow and content of anions conservative majority. Flow measurements were made and determined the major ion content in samples of surface water and groundwater. The results show that the creek is effluent and in the monitored periods the groundwater discharge to the creek hardly perceived. Groundwater chemistry is mainly related to the geomorphology while the creek is regulated by groundwater discharge, industrial effluents and tidal influence.
Keywords: relationship surface water - groundwater, flow rate, hydrochemistry.

Introducción

En los ambientes llanos, donde predominan los movimientos verticales del agua (evapotranspiración – infiltración) sobre los horizontales (escurrimientos) existe una fuerte interrelación entre el agua superficial y la subterránea (Sala et al., 1983, Kruse y Laurencena, 2005). La variación en las características químicas del agua de superficie depende de la composición del agua subterránea y del volumen de esa descarga, que es función del gradiente hídrico y la transmisividad del medio. La actividad antrópica puede modificar esta situación a través de la descarga de por ejemplo efluentes, provocando que la calidad química del agua superficial muestre la influencia de sustancias contaminantes. Además el agua subterránea puede verse afectada en ese mismo sentido en los casos en que el agua de los cursos se transforme en fuente de recarga del agua freática, como consecuencia de la explotación de los recursos hídricos subterráneos. En estas condiciones tanto los cambios naturales como los antrópicos adquieren una gran relevancia y su conocimiento resulta indispensable para la gestión sustentable del recurso agua (Kruse y Ainchil, 2011).

El arroyo Buriñigo, que desemboca en el Río de la Plata, se ubica en el partido de Magdalena, al noreste de la provincia de Buenos Aires (Fig. 1). Abarca un área dedicada principalmente a la actividad agrícola y ganadera, existiendo además en el tramo medio a inferior tres industrias (dos alimenticias y una curtiembre).

Geomorfológicamente la cuenca se ubica en la subregión Pampa Ondulada (Frenguelli, 1950). Dentro de ella, la cuenca superior y media se desarrolla en un ámbito de llanura alta y la inferior en la planicie costera del Río de la Plata. La llanura alta presenta sedimentos loéssicos en superficie y las cotas alcanzan los 35 m snm sobre la divisoria de cuenca y los 5 m snm en el límite con la planicie costera. En la planicie costera existe un predominio de sedimentos limo-arcillosos y las cotas varían entre 5 y 1 m snm.

El clima de la región según la clasificación de Thornthwaite es húmedo, mesotérmico con nula

o pequeña deficiencia de agua (Martinez et al., 2006).

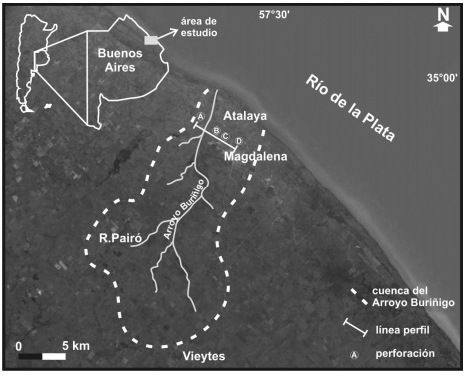


Figura 1. Ubicación de la cuenca del arroyo Buriñigo.

El objetivo del trabajo es evaluar la relación entre el agua superficial y la capa freática en la cuenca del arroyo Buriñigo a partir de datos de caudales, niveles de agua y contenido de aniones conservativos mayoritarios.

Metodología

Se realizó una caracterización de la cuenca del arroyo a partir del análisis de información antecedente (EASNE, 1972), cartas topográficas a escala 1:50.000, fotografías aéreas e imágenes satelitales. Además, con registros de perforaciones de pozos de agua se efectuó un perfil hidrogeológico para el área media a baja de la cuenca (Fig. 1 y 2).

Se analizaron los datos diarios de las lluvias del periodo 2003 – 2012 procedentes de la estación meteorológica ubicada en la Sociedad Rural de Magdalena (cuenca media del arroyo) y se realizaron balances hidrológicos según la metodología de Thornthwaite y Mather (1957).

Se generó una red de monitoreo de puntos de medición de caudal en el arroyo y de medición y muestreo de agua superficial y subterránea somera (Fig. 3). Los puntos de monitoreo de agua subterránea comprenden molinos, pozos domiciliarios y pozos de exploración efectuados para este estudio. Los datos analizados en este trabajo corresponden a dos monitoreos realizados en febrero y abril de 2013.

Para las mediciones de caudal se determinaron las secciones del arroyo, las cuales fueron fraccionadas cada 0,50 m y se midieron en cada sub sección los caudales utilizando un molinete hidrométrico.

En los puntos de toma de muestras de agua se determinó in situ la conductividad eléctrica y temperatura del agua con un equipo portátil. En el muestreo de agua superficial y subterránea realizado en febrero sólo se determinaron las concentraciones de cloruro, sulfato y nitrato con el fin de evaluar las variaciones en los aniones más conservativos. Por su parte, en el muestreo realizado en abril se determinó el pH y la concentración de bicarbonato, cloruro, sulfato, nitrato, sodio, calcio, magnesio y potasio (APHA 1998).

En función de las características hidroquímicas, los datos de caudales y niveles y de las observaciones de campo, se efectuó el modelado hidrogeoquímico con el software NETPATH (Plummer et al., 1991) para evaluar si los procesos identificados como condicionantes de la química del agua (mezclas de aguas, evaporación, etc.) son termodinámicamente posibles.

Resultados

Geohidrología del área de estudio

El agua subterránea somera se asocia a un acuífero freático que conforma la sección superior de una unidad acuífera multicapa. El perfil hidrogeológico definido para el sector medio a bajo de la cuenca (Fig. 2) a partir del análisis de los datos de perforaciones existentes permite reconocer las principales características de dicho acuífero.

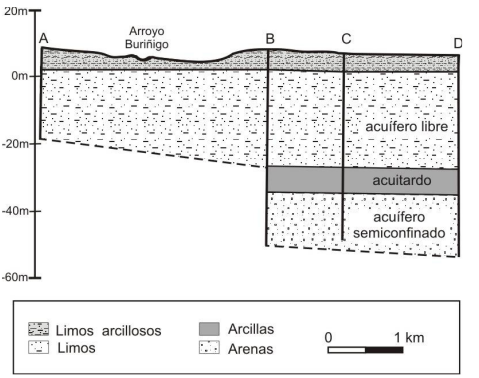


Figura 2. Perfil hidrogeológico para el sector de cuenca media a baja. La ubicación del perfil y perforaciones se indica en la figura 1.

El acuífero freático comprende dos formaciones: Sedimentos Postpampeanos y Sedimentos Pampeanos. Los Sedimentos Postpampeanos afloran en la zona de cuenca media a baja y

están compuestos por limos grises a verdosos con restos de conchillas. Predominan en todo el ambiente de planicie costera acompañados por cordones de conchilla compuestos por arenas y restos de conchilla. En la sección estudiada tienen un espesor que varía entre 5 y 8 m.

Por debajo se desarrollan depósitos limosos a arcillosos de coloración pardo rojiza o amarillenta con niveles de tosca y rodados calcáreos correspondientes a los Sedimentos Pampeanos. La base está compuesta por una arcilla de color gris azulado de 10 m de espesor, que desde el punto de vista de la permeabilidad actúa como acuitardo. En conjunto el espesor total de los Sedimentos Pampeanos en la sección estudiada es cercano a 35 m. Estos depósitos afloran en la llanura alta y se acuñan hacia el área de planicie costera y Río de la Plata.

Por debajo del acuífero freático existe un acuífero semiconfinado compuesto por arenas finas a medias de color pardo amarillenta (Arenas Puelches).

Hidrodinámica

La precipitación media anual para el periodo 2003-2012 es de 1005 mm, siendo la evapotanspiración real de 807 mm/año. Los balances hidrológicos muestran que existe déficit de agua en los meses de noviembre a marzo y excesos entre abril y octubre.

La relación entre los niveles de agua superficial y subterránea evidencia que la capa freática descarga en el arroyo (Fig. 3). Los niveles freáticos se ubican a 15 m snm en cabeceras y disminuyen a valores inferiores a 1 msnm en la zona costera. En los sectores deprimidos en el área de planicie costera puede observare en periodos lluviosos que el nivel freático aflora.

Los caudales medidos muestran un aumento del volumen de agua que drena el arroyo desde cabeceras a la cuenca baja. Tanto en febrero como en abril el caudal en nacientes (punto I de la Fig. 3) fue nulo, no obstante pudo observarse en pequeñas barrancas de las márgenes del arroyo la presencia de zonas de descarga subterránea (Fig. 4a y 4b).

En cuenca media (punto II de la Fig. 3) el caudal determinado en febrero fue de 0,017 m^3/seg, mientras que en abril fue de 0,052 m^3/seg. En la cuenca baja (punto III de la Fig. 3) el caudal fue de 0,175 m^3/seg en febrero y de 0,113 en abril.

En el punto II, de febrero a abril hay un aumento del caudal, mientras que en el punto III hay una disminución. Esto se debe a que el caudal en el punto II está regulado principalmente por la descarga subterránea que aumenta al pasar del periodo con déficit hídrico al periodo con excesos hídricos y en el punto III (ubicado aguas debajo de las industrias) el caudal depende en gran medida del mayor o menor volumen de efluentes vertidos al arroyo (Fig. 4c).

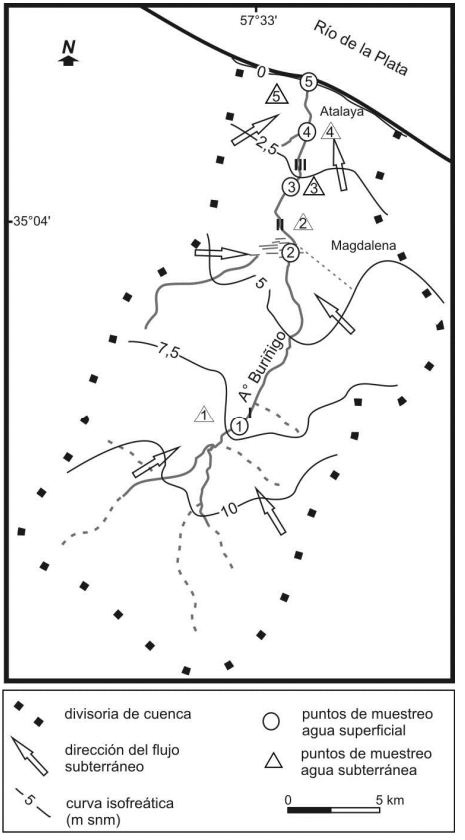


Figura 3. Mapa de flujo subterráneo y ubicación de puntos de muestreo. En número romanos se indican los sitios de medición de caudal.

En el sector de desembocadura (Fig. 4d) los caudales del arroyo están fuertemente influenciados por el ingreso de la marea desde el Río de la Plata, existiendo periódicamente una inversión en el sentido de escurrimiento en el agua del arroyo. El ingreso de la pleamar inunda el área de planicie costera. Las mediciones del nivel freático realizadas durante un periodo mareal evidencian que el nivel freático asciende durante la pleamar en la zona de marisma.

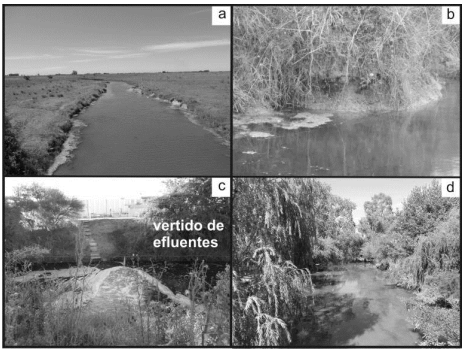


Figura 4. Fotografías del arroyo en (a) cabeceras en área de llanura alta, (b) detalle de sitio de descarga subterránea, (c) sector con vertido de efluentes en cuenca media a baja y (d) sector con influencia mareal próximo a la desembocadura.

Hidroquímica

El agua subterránea tiene un pH entre 7,16 y 8,32 y es de tipo bicarbonatada con porcentajes similares de cationes en la llanura alta, variedades sódicas en la planicie costera y cálcicas en los cordones conchiles (Fig. 5). Por su parte, el agua superficial tiene un pH entre 7,36 y 7,39 y es clorurada sódica a cálcica en la llanura alta, tendiendo a tipos clorurado sódicas en la cuenca media a baja dentro de la planicie costera (Fig. 5).

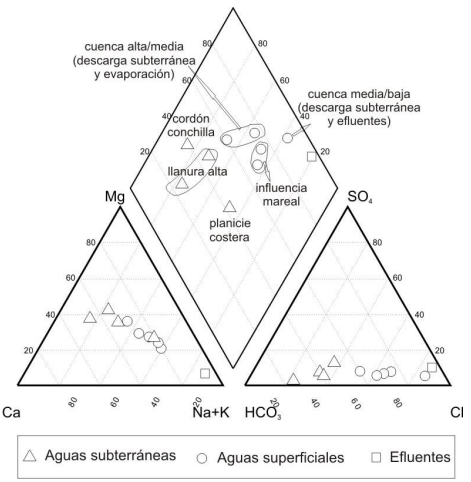


Figura 5. Diagrama de Piper para clasificación de aguas superficiales y subterráneas

La comparación de las concentraciones en aniones mayoritarios entre el mes de febrero (final del periodo de déficit) y abril (inicio del periodo de excesos) (Tabla 1) muestra que tanto el agua superficial como subterránea registra mayores variaciones en febrero que en abril. En febrero el agua subterránea tiene concentraciones de cloruro entre 65 y 324 mg/L, de nitrato entre 8 y 41 mg/L y de sulfatos entre 6 y 188 mg/L y la conductividad eléctrica de agua oscila entre 700 y 2474 µS/cm. El agua superficial es más variable y registra concentraciones de cloruro entre 87 y 2946 mg/L, de nitrato entre 5 y 1338 mg/L y de sulfatos entre 65 y 1217 mg/L asociadas a conductividades eléctricas del agua entre 700 y 12500 µS/cm.

En abril, los excesos hídricos hacen que disminuya el contenido en todos los aniones, siendo esta disminución más notoria en el agua superficial, en donde los contenidos de cloruros, sulfatos y nitratos presentan valores entre 138 y 1296 mg/L, 22 y 111 mg/L y 2 y 197 mg/L respectivamente, variando la conductividad eléctrica del agua entre 578 y 5090 µS/cm.

Los gráficos de SO_4^{2-} y NO_3^- en función Cl^- muestran que el agua subterránea tiende a agruparse en el vértice de menores concentraciones y las superficiales siguen una tendencia hacia la línea de mezcla y dilución (Fig. 6). Las muestras superficiales del área de cabeceras y cuenca media aguas arriba de las industrias se agrupan próximas a las aguas subterráneas. Las muestras de la cuenca media a baja situadas aguas abajo de las industrias se ubican en torno a la línea de mezcla entre las de aguas arriba y los efluentes. Las muestras de la cuenca baja próximas a la desembocadura disminuyen notoriamente el contenido aniónico y se ubican en torno a la recta de dilución con agua del Río de la Plata y aquellas ubicadas aguas abajo de las industrias (Fig. 6).

La ubicación de las muestras en el diagrama de Piper y en los gráficos de relaciones aniónicas muestra que la descarga subterránea sólo influye sobre la química del agua del arroyo en el sector de cuenca alta, determinándose que el otro proceso dominante en la química del agua superficial es la evaporación. Por su parte, en el tramo aguas abajo de las industrias los vertidos de efluentes salinos de tipo clorurado sódico determinan que la química del agua en el arroyo responda principalmente a procesos de mezcla.

Tabla 1. Conductividad eléctrica y contenido de aniones mayoritarios en muestras de agua superficial y subterránea.

Muestra	Cond (µS/cm)		Cl^- (mg/L)		SO_4^{2-} (mg/L)		NO_3^- (mg/L)	
superficial	feb	abr	feb	abr	feb	abr	feb	abr
1	950	995	595	151	76	22	8	11
2	4498	2216	1200	516	158	88	38	12
E	16240	8580	6900	3820	3125	612	1615	576
3	12500	5090	2946	1296	1217	111	1338	197
4	4827	578	280	142	602	22	315	7
5	700	679	87	138	65	17	5	2
subterránea								
1	700	1152	65	68	6	6	8	2
2	1021	649	94	102	16	11	10	3
3	2474	2603	324	345	188	61	13	1
4	1390	1973	88	218	25	78	41	2
5	1216	740	193	37	14	5	11	1

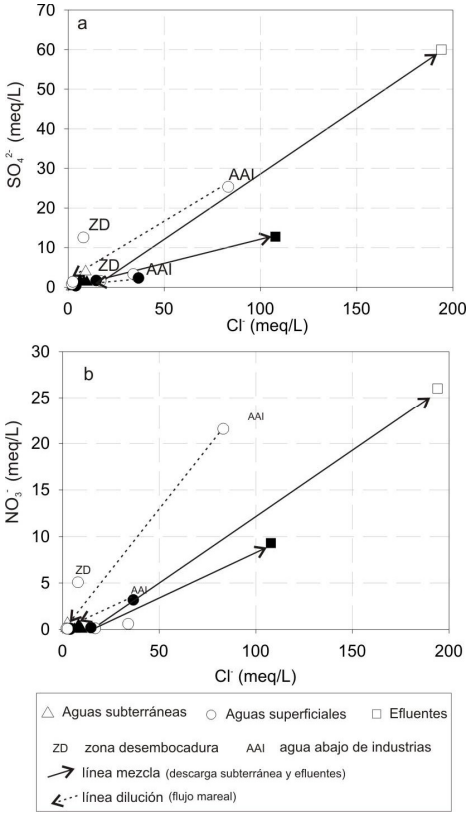


Figura 6. Relaciones entre aniones mayoritarios para febrero (símbolos en blanco) y abril (símbolos en negro).

Los porcentajes de mezclas estimados en función del contenido en cloruros y sulfatos de las muestras agua arriba de las industrias, el efluente y las muestras agua abajo fueron similares para ambos aniones, determinándose en febrero que el agua presenta entre un 30 y 35 % de aporte del efluente. En abril estos porcentajes disminuyen a menos del 20 %. Las mezclas estimadas por el contenido en nitratos muestran mayores porcentajes de efluente. Si bien en este trabajo no se ha estudiado en detalle qué procesos puede aportar iones nitratos al agua del arroyo, la oxidación de nitritos del efluente en el cauce del arroyo podría explicar este comportamiento.

En el sector de desembocadura, el ingreso de agua desde el Río de la Plata durante la pleamar determina que el agua en el arroyo disminuya su contenido iónico en todo el sector de cuenca baja, presentando valores similares a los de cabeceras. Nótese que el efluente tiene en febrero una elevada concentración en los aniones analizados (producto de la evaporación mayor en las piletas de decantación). Esto sumado al menor caudal del arroyo determina que el agua superficial se vea químicamente más modificada en los meses con déficit que en los meses con excesos hídricos.

Conclusiones

La relación entre los niveles superficiales y subterráneos indica una clara descarga del agua subterránea en el arroyo. No obstante, la química y caudales del agua superficial en la cuenca media y baja de la planicie costera están

determinados principalmente por procesos ajenos a la relación agua superficial – subterránea como lo son el vertido de efluentes y la influencia mareal.

Dado que el flujo subterráneo es hacia el arroyo, la contaminación del agua subterránea a partir de efluentes vertidos al arroyo no es posible mientras se mantengan dicha relación en el flujo.

Comprender el funcionamiento de la relación agua superficial - agua subterránea es de vital importancia en la gestión del recurso hídrico, principalmente en cuencas donde se desarrollan distintas actividades y usos del suelo que pueden modificar la calidad y cantidad del agua.

Los datos presentados en este trabajo constituyen una base para el estudio geohidrológico de la cuenca del arroyo Buriñigo. No obstante, un monitoreo periódico que comprenda todo el año hidrológico será necesario para evaluar en detalle los cambios en la dinámica y química de la relación entre el agua superficial y subterránea.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Proyecto Promocional de Investigación y Desarrollo "Evaluación de los recursos hídricos en áreas de la planicie costera del Río de la Plata" (PPID/N007) y el Proyecto de Incentivos "Evaluación de los cambios hidrológicos y ambientales en áreas llanas" (11/N615) ambos de la Universidad Nacional de La Plata.

Referencias

APHA (American Public Health Association) 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington,DC

EASNE. 1972. Estudios de Aguas Subterráneas del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. Convenio CFI – MOP (Buenos Aires). La Plata.

Frenguelli, J. 1950. Rasgos Generales de la Morfología y la Geología de la Provincia de Buenos Aires. LEMIT. Serie 2(33), 72 p., La Plata.

Kruse, E. y J. Ainchil. 2011. El agua en la llanura bonaerense. *Revista de la Universidad Nacional de La Plata*. 36: 109-122.

Kruse E.; Laurencena P. 2005. Aguas superficiales. Relación con el régimen subterráneo y fenómenos de anegamiento. *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*. La Plata. Capítulo XIX: 313 – 326.

Martinez, O., Hurtado, M. y Jiménez, J. 2006. Caracterización ambiental de los humedales costeros del Río de La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de Geociencias* 5 (1): 55-64.

Piper A M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *American Geophysical Union Trans* 25:914–923.

Plummer L., Prestemon E., Parkhurst D. 1991. An interactive code (NETPATH) for modelling NET geochemical reactions along a flow PATH. US *Geol Surv Water Resour Invest* 4078.

Sala, J. M.; González, N. y Kruse, E. 1983. Generalización Hidrológica de la Provincia de Buenos Aires. *Coloquio Internacional Sobre Hidrología de Grandes Llanuras*. Comite Nacional para el Programa Hidrológico Internacional, Olavarría, Argentina.

Thornthwaite C. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geography review* 38:55–94.

Thornthwaite, C., Mather, J. 1957. Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance. Climate. Drexel Institute of Technology 10: 185-311.

Reseña geológica-técnica de la perforación Villa Elisa-2 Entre Ríos

Julio Benítez[1] Daniel Mársico [2 3]

[1] Consultor privado. Calle 25 de Mayo 1548– (2840) Gualeguay- Entre Ríos.
[2] ERRTER – Ente Regulador de los Recursos Termales de Entre Ríos. [3] UADER Subsede Gualeguaychú Facultad de Gestión Ambiental.

Mail de contacto: danielmarsico@hotmail.com

RESUMEN

El propósito del presente texto es detallar sobre los trabajos que se desarrollaron durante la segunda perforación realizada en la localidad de Villa Elisa para alumbrar aguas termales, en el período 2011/2012. En un principio se realiza una descripción de las tareas propias de un sondeo, comenzando con una referencia del equipo utilizado y las operaciones asociadas al mismo como lo son los controles de boca de pozo entre los que se mencionan, la extracción de muestras de las distintas formaciones geológicas, los perfilajes y el entubado y cementado de los distintos tramos entre otras. En una segunda etapa y en base a la integración de la información surgida de la descripción megascópica y bajo lupa binocular del cutting extraído, de las testificaciones geofísicas y de los tiempos de perforación fue posible elaborar un perfil hidrogeológico detallado. Se finaliza con la mención de los aportes técnicos, hidrogeológicos e hidroquímicos surgidos de la totalidad de los trabajos realizando de esta manera nuevos aportes a la propuesta hidroestratigráfica para la zona centro-oriental de la provincia. A esto se le suma la posibilidad de contar con nuevos elementos de juicio para la planificación de futuros trabajos en el tema de las perforaciones profundas.
Palabras claves: Chacopampeana, Entre Ríos, Aguas Termales, Perforaciones

ABSTRACT

The intention of the present text is to detail on the works that developed during the second perforation realized in the locality of Villa Elisa to light thermal waters in the period 2011/2012. In a beginning there is realized a description of the own tasks of a poll, beginning with a reference of the used equipment and the operations associated with the same one as they it are the controls of mouth of well between which it is possible to mention, the extraction of samples of the different geological formations, the perfils, the casing and cemented of the different sections between others.In the second stage and on the basis of the integration of the information arisen from the description megascopic and under magnifying glass binocular of the extracted cutting, of the geophysical testing and of the times of perforation it was possible to elaborate a profile hydrogeological detailed.

It concludes with the mention of the technical contributions, hydrogeological and hydrogeochemical arisen from the totality of the works realizing hereby new contributions to the offer hidroestratigrafic for the zone oriental center of the province.To this there adds the possibility of possessing new facts for the planning of future works in the topic of the deep perforations
Key words: Chaco-paranaense, Entre Ríos, Thermal Waters, boreholes

Introducción

La empresa termas Villa Elisa S.A. que explota el complejo termal de su propiedad a partir de la perforación de un primer sondeo realizado en 1997, dicho pozo llegó a 1032 m.b.b.p.(Benítez, 1996) y al principio quedó surgente con 15 m^3/h de agua levemente salada con 40 °C de temperatura, de sedimentitas prebasálticas. Posteriormente con el desarrollo del complejo termal se fue utilizando más fluido y por lo tanto fue necesario bombearlo a superficie, como lo es en la actualidad. Sin embargo desde el año 2008 el caudal explotado quedó disminuido y muy acotado para las crecientes necesidades del complejo, debido a la caída de un cuerpo de bomba con unos 90 ms de cable; y cuyo trabajo de recuperación (pesca) y normalización del pozo, resultaría una operación riesgosa, de resultado incierto y muy oneroso. A la fecha el complejo termal ha

crecido de tal manera, que necesita para su desarrollo y expansión, un mayor caudal de agua, de igual o más temperatura.

De modo que con estos antecedentes y necesidades la empresa Termas de Villa Elisa S.A., decidió realizar una segunda perforación, todo en el marco de las normas y leyes que regulan esta actividad, en Entre Ríos.

Ubicación

Este segundo pozo está ubicado dentro del predio termal, a unos 300 m al Sur del anterior A. ER. Xp VE-1 (Villa Elisa 1), (Fig.1) en las siguientes coordenadas:Latitud: 32°7'47,62" S. Longitud: 58° 26'17,33" Oeste Altitud: 44msnm.

Figura 1. Predio termal con ubicación de los dos sondeos.

El sondeo vertical previsto, al igual que el anterior, tiene por objetivo explotar los niveles acuíferos infra-basálticos.

Fecha de ejecución: Inicio de perforación: 17 /11/11 y finalizó el 1° de noviembre de 2012
El tiempo de ejecución fue muy largo debido a las dificultades que tenía el perforador para atravesar la columna de rocas volcánicas y conseguir en el mercado local o en su defecto, importar de países limítrofes, parte de la herramienta de perforación y reparaciones parciales y otros elementos del equipo; de manera que la actividad fue interrumpida en varios periodos.

Fue perforado con equipo Marca Ideco Pignone H-40, sistema Rotary, con capacidad de 1800 m.b.b.p., alcanzando la profundidad final en 1224 m.b.p., en diámetro de 8,5". (Fig. 2 y 4)

Figura 2. Predio Termal y Equipo de Perforación ERVE-2 (Villa Elisa) 2012.-

Equipo de perforación y profundidad final

Diseño de la perforación

El diseño general de estas perforaciones, sigue la normativa vigente de la ley provincial de termas N°9678 que trata de evitar la contaminación y mezcla de los acuíferos atravesados por los sondeos, hasta alcanzar los sedimentos prebasálticos. En la misma estaba previsto:

Una cañería guía o de aislación de los acuíferos superiores, proveedores de agua potable y de riego, en la zona correspondiente a las Arenas de la Fm Salto Chico. Posteriormente se plantea una segunda cañería de menor diámetro que aísle la secuencia rocas volcánicas, prácticamente hasta su base. Posteriormente continuar perforando los sedimentos prebasálticos hasta 1200 m.b.b.p, y luego entubar cañería filtro, filtro y pre-filtro de grava, para garantizar una larga vida útil del pozo. Finalmente si el pozo no es surgente, se bajará una bomba para la etapa de explotación del pozo (Pettarini y Vaccarini 2011).

Este sondeo se perforó con 17 ½" (444mmm) hasta 120 m.b.b.p. y se entubó hasta la boca de pozo, con caños de acero con costura de 6,5mm de espesor y diámetro de 14" (355mm), desde la profundidad de 115m.

Posteriormente se perfora con diámetro de 12 ¼"(311mm) hasta 828m y se coloca una cañería intermedia o de aislación de (diámetro exterior)10" (254mm) hasta la base de las rocas volcánicas, con la finalidad de evitar contacto y potencialmente mezclar con los fluidos intrabasálticos con los pre- basálticos, razón de esta explotación. La mezcla de fluidos podría generar, descenso de la temperatura del fluido termal, cambios en la salinidad, con probables precipitados y hasta disminución en el caudal. El pozo fue entubado desde superficie hasta 825m.b.b.p. y cementado hasta la boca de pozo, con cañería de acero con costura de 10" (254mm) de diámetro y 6,5mm de espesor.

Posteriormente se continuó perforando con diámetro de 8 1/2" (216mm) hasta alcanzar la profundidad final 1224,2m.b.b.p. Quedando el pozo en observación. Restaría bajar la cañería final de explotación (pre-filtro y filtro, más engravado) para la explotación del mismo, tarea que por el momento la empresa Termas de Villa Elisa SA, no realizará.

Perforación

Mantuvo un ritmo de avance muy irregular, ya que las litologías alumbradas presentaron diferentes dificultades para atravesarlas.

El tramo sedimentario superior (desde boca de pozo hasta los 347m.b.b.p.) fue a un ritmo normal con promedios de 2 a 10 (min /m).siendo un poco más lento en los tramos más arcillosos.

Posteriormente la perforación fue muy lenta, dificultosa y costosa, cuando atravesó el tramo basáltico; el cual presentó zonas más blandas, Basaltos castaño rojizo castaño claro con vesículas y alteraciones por oxidación (exposición aérea?, circulación de aguas superficiales y subterráneas?, etc.) y partes más duras que resultaron los basaltos, castaño rojizo, gris oscuros, y gris medio, microcristalinos, compactos, fractura irregular y aspecto masivo. En algunos casos para perforar cada metro se tardaba hasta 200 minutos. Como la perforación producía una gran vibración, se utilizó un "amortiguador" que se colocó sobre el trépano, para disminuir la vibración que repercutía negativamente en la herramienta de perforación, especialmente en la columna de portamechas. También se utilizaron estabilizadores en la columna que ayudaban a mantener el diámetro del pozo, cuando el trépano pierde diámetro.

En el tramo inferior (sedimentos pre-basaltos) el avance de la perforación se puede diferenciar en dos tramos. El superior (932 a 1019) fue relativamente rápido entre 2 y 30 min/m, con excepción de las intercalaciones de basaltos o meláfiros (90 a 140') y un segundo tramo (1019 a 1224) el avance fue entre 50 a 150 min/m pero en forma muy irregular, ya que algunos tramos arcillosos tendían a "embolar" el trépano, haciendo muy lento el avance y algunas intercalaciones más arenosas bajaban el promedio de avance entre 12 y 25min/m. Este último tramo estaría más compactado que el anterior y es más arcilloso.

Los trépanos utilizados fueron en los tramos sedimentarios con insertos largos y medianos y en las rocas basálticas con insertos pequeños y cortos. En cada carrera se probaba con mayor o menor peso (2, 5, 10 y hasta 14 tn) y las vueltas/minuto (RPM) variaban según los trépanos (70 a 110) y a los terrenos atravesados.

Lodo de Perforación

El lodo utilizado es en base a Agua-bentonita con Polímeros. Se inyecta al pozo por dentro de la herramienta de perforación y retorna por fuera de la misma. En superficie pasa por un par de zarandas, (Fig. 3) que separan los sólidos y el cutting de perforación, (lugar donde se toman las muestras de terreno) luego pasa a una pileta de decantación y finalmente llega a otra pileta depósito, para nuevamente ser tratada, acondicionada y reinyectada. Los valores reológicos más comunes fueron:

Densidad de Entrada 1100 a 1180 gr/ls., Viscosidad de embudo: 45 a 55', PH: 7,5 a 9.

Control Geológico

Se montó un laboratorio para recolectar, tratar y preparar las muestras para, su análisis y acondicionamiento final para su archivo. Se calculaba el retorno de las muestras en función del volumen desplazado por la bomba con una aproximación de hasta 15% del tiempo neto.
Se guardaron un juego de muestras sin lavar (dejándosela secar a la intemperie), otro juego fue lavado y embolsado en sobres de papel, con su respectiva identificación. La frecuencia del muestreo fue de cada 2 m en los sedimentos supra-basálticos cada 5 m en los basaltos y cada 3 a 5 m en las sedimentitas infra basálticas. Algunas muestras fueron observadas con luz fluorescente, pero no evidenciaron materia orgánica ni hidrocarburos. Las muestras fuero descriptas con lupa binocular y se utilizó HCL para los calcáreos, y H2O2, para la materia orgánica. También se llevó un control de velocidad de perforación en metros por minutos. Datos a los se le agregaban los parámetros de perforación (RPM, EPM, Presión de bomba, caudal, etc.). Toda la información fue graficada en un perfil geológico de pozo. Escala 1:1.000.-

Perfiles eléctricos

Luego de perforar cada tramo se corrieron perfiles eléctricos desde boca de pozo. Los perfiles corridos corresponden a Resistividad (Rt), Potencial Espontaneo (SP), rayos gamma (GR). Lamentablemente no se están corriendo perfiles de calibrado del pozo (CAL) y sónicos (S) que darían muy buen información de la porosidad y permeabilidad de las rocas y en ciertos casos también para identificar tipos de litologías.

Figura 3. Zarandas del equipo donde se recuperan muestras de terreno (cutting)

La información recolectada en el Control Geológico fue ajustada con el Perfil Eléctrico y

de su combinación se determinaron con mayor precisión: profundidades, pases estratigráficos, formaciones, niveles acuíferos, etc.
Finalmente con la información interpretada y ajustada por perfil, se ajusta el diseño de entubamiento final del Pozo.

Entubamiento de Cañerías y Cementación

Este es el momento más importante de la operación, ya que luego de la evaluación se ha resuelto encamisar el pozo para su posterior explotación. Luego de circulado el pozo y estabilizadas sus paredes se procede al entubamiento del pozo con la cañería prevista que ya estaba en locación. Posteriormente se hace circular lodo por el pozo para garantizar una buena circulación detrás de la cañería y dejar el camino listo para la cementación.

Una vez que se bajó la cañería a la profundidad prevista (Fig: 4), se acondiciona el equipo para la cementación. En este caso el cemento es preparado por una empresa local y es traída a la locación en camión mezclador de capacidad de 5m^3 cada uno. El cemento utilizado es tipo A y la densidad del mismo es de 1620 gr/ls. La operación se inicia con un bombeo muy lento, mandándose un colchón de Agua de 5m^3, con efecto mecánico de limpieza. Luego se bombea el cemento lentamente, controlando la presión, para evitar cualquier taponamiento del flujo.

El primer tramo fue cementado hasta boca de pozo y se lo dejó en fragüe más de 72 hs.

El segundo tramo se entubo casi todo el espesor de los basaltos cementando hasta boca de pozo La lechada primera que se bombeo es más liviana densidad 1350 gr/ls y el tramo principal (frente a los basaltos) quedó con lechada 1620 gr/ls. La operación fue normal y el pozo quedó en fragüe más de 10 días.

El tercer tramo perforado con 81/2" no fue entubado ni engravado ni se colocaron filtros y el pozo quedó en observación, por decisión de la empresa Termas de Villa Elisa SA.

Ensayo de Explotación

Llegado a este punto de la operación, la empresa en acuerdo con el perforador, deciden ensayar el pozo, para conocer cuál será el aporte de fluido de los sedimentos infra basálticos y averiguar si se produce alguna interferencia con el otro sondeo.

El pozo fue ensayado aproximadamente 20 hs. por bombeo, quedando con un caudal de 40m^3/h, Nivel Estático 32 m.b.b.p. y Nivel dinámico durante el bombeo 90 m.b.b.p. Ubicación de la bomba 90 m.b.b.p.

Figura 4. Equipo H-40, bajando cañería.

No se percibieron interferencias con el otro sondeo (ERVE-1). En las primeras dos horas de ensayo el agua salió turbia, contaminada con lodo, pero luego se fue aclarando y solo salía una pequeña cantidad de arena fina a muy fina, castaño clara, suelta, cuarzo lítico, buena selección- proveniente de formación. Se monitoreo el caudal, la resistividad del fluido, temperatura y PH, así como el nivel dinámico, que fueron estabilizándose al cabo de las primeras 12 hs. de bombeo.Transcurridos las 20 hs. de ensayo, la empresa decide dar por terminados los trabajos y dejar el pozo en observación.

Resultado final

Pozo productivo por bombeo 40m^3/h, Agua Salada con una Temperatura de 43 ℃, y Conductividad 47000 ohm/m, PH: 7,6, ND: 90m.b.b.p..NE: 32,10 m.b.b.p.

Consideraciones Geológicas

Se atravesaron en este pozo tramos bien diferentes de rocas y sedimentos, que hacen también a las mayor o menores dificultades de perforarlos. La nomenclatura seguida para las diferentes formaciones, es la utilizada últimamente en la zona, especialmente en la República Oriental del Uruguay, donde existen afloramientos y numerosos sondeos que han alcanzado hasta el basamento cristalino. (Bossi J. y Navarro R., 1988) y (Aceñolaza, F. 2007)

En la parte superior los sedimentos Terciarios, pertenecen a la *Cobertura* Sedimentaria de la cuenca del Paraná. El segundo tramo corresponde al *Relleno* Volcaniclástico correspondiente a rocas basálticas con areniscas asociadas, y sedimentos del mesozoico inferior (Tr-J) y del paleozoico superior (Pm). Los pases han sido definidos teniendo en cuenta el resultado del análisis del Control Geológico y de los perfiles eléctricos corridos en el pozo. La columna es similar al pozo anterior (ERVE-1), y a la de otros pozos perforados en la región de Concordia y Salto (ROU). Este sondeo no alcanzó el basamento cristalino, que si fue constatado en las cercanas localidades de San José, Colón y Concepción del Uruguay, con lo que se reafirma la existencia de altos de basamentos, fallas subverticales y depresiones rellenas con sedimentos antiguos permo-triásicos, tal como han sido comprobados en sondeos del Uruguay (pre-basálticos).

Otro rasgo particular de este pozo (al igual que el anterior ERVE-1) es que los sedimentos prebasálticos contienen aguas saladas, diferentes a todos los sondeos mencionados anteriormente, quedando para dilucidar si las mismas provienen de los sedimentos pre-basálticos o existe percolación de aguas de sedimentos marinos post basálticas, a través de fisuras verticales del basalto. (Mársico D, 2013)

Columna Estratigráfica del pozo ERVE-2 (Villa Elisa)

Tramo superior o Cobertura sedimentaria:

00 a 02 Suelo Actual

02 a 22 Fm Hernandarias (Reig, 1957) Sedimentos limo-arcillosos. -pampeanos.-

22 a 74 Fm Salto Chico (Rimoldi,1963). Arenas amarillentas medianas a gruesas redondeadas
moderada selección, cuarzosas y escasos líticos oscuros, friable a suelta en superficie.

74 a 287 Fm Fray Bentos ("Capas de Fray Bentos, Lambert, 1939, 1940".) (Oligoceno): constituido por sedimentos rosados y castaño claro arcillo-arenoso con abundante nódulos de carbonatos gris claro.

Tramo inferior o Relleno volcaniclástico (A)

287 a 347 Fm Puerto Yeruá (De Alba y Serra, 1959 (K) conformada por Arcilla marrón rojizo moderado, plástica, en parte Arcilla Arenosa, en parte arena muy fina, de origen fluvial.

347 a 928 Fm Serra Geral (White 1908) (J-K): basaltos gris medio a gris oscuro, en alternancia con otros de color castaño rojizo.

Tramo inferior o Relleno Sedimentario (B)

928 a 1019 Fms Botucatú –Tacuarembó (Falconer J.D.,1937. (Tr-J): areniscas castaño claro finas a muy finas alternando con niveles de limoarcilitas castaños rojizas con algunas intercalaciones de meláfiros o basaltos gris oscuros (2 a 4m de espesor)

928 a 1224 Fms Yaguarí -Buena Vista (Falconer 1937 y Bossi 1966) (Pm-Tr) Se atribuyen a estas
unidades - con dudas- Limo arcillitas castaño rojizo, castaño clara, y arcillo- arenosa, consolidadas. En el fondo se observaron limoarcilitas negras y gris muy oscuras (últimos 10 metros).

Nota: no hay datos de dataciones, ni análisis microscópicos, rayos X, u otros, que podrían variar esta interpretación**.**

Hidrogeología

Durante la perforación se atravesaron dos acuíferos muy importantes. El primero corresponde a la Fm Salto Chico (=Ituzaingó,=Puelche) que provee agua potable a todos los pobladores de la zona y a la misma localidad de Villa Elisa; Inclusive Termas de Villa Elisa S. A. tiene una perforación (70 m de profundidad.) para abastecimiento de todo el complejo termal, de estos niveles. También es explotado en la zona para agua de riego para cultivos como; arroz, soja, etc.

El segundo acuífero corresponde a niveles arenosos de las formaciones infra-basálticas objetivos de esta perforación. Luego de entubado y perforado hasta el fondo, se resolvió cambiar el lodo del pozo por agua limpia y luego observar el pozo, para ver si el mismo surgía; lo cual no ocurrió. Durante más de 5 hs., el nivel se mantuvo estático en 32,10 m, Posteriormente se bajó equipo de bombeo con barras de sondeo, hasta 90 m.b.b.p. El bombeo a régimen constante se realizó durante 20 hs. continuas. Al principio el sondeo arrojó agua vertida con lodo y algo de arena y después de las primeras horas el fluido se fue estabilizando y aclarando hasta ser constante. El resultado fue de 41m^3/h de agua salada (Conductividad 46600 µm/m) con 43,21ºC de temperatura.

Con respecto al otro sondeo no se percibieron interferencias. Mientras se realizaba esta operación el pozo ERVE-1(Villa Elisa) se encontraba en bombeo 30 m^3/h con Nivel dinámico en 77,90 m.b.b.p. Sin bombear el NE: 32 m.b.b.p. Se carece de resultados de análisis físico-químicos.

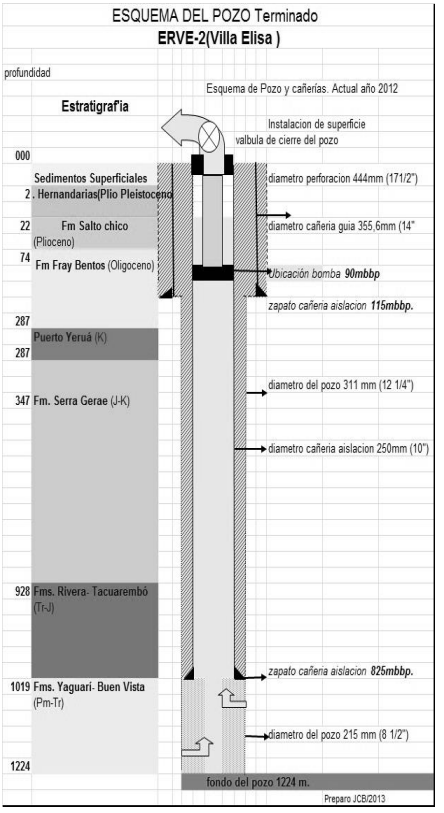


Figura 5. Esquema del pozo terminado

Lamentablemente las condiciones en que se hizo el ensayo y el escaso tiempo a que fue sometido el pozo, no permiten llegar a conclusiones más precisas que las obtenidas en este ensayo. Se desconoce también el estado de las paredes del pozo, situación que plantea el interrogante de una futura intervención del pozo, si comenzara a disminuir el caudal durante su explotación o aparecieran sedimentos con el agua, o hubiera cambios en la Temperatura.

Conclusiones

Si bien el sondeo atravesó una columna prevista para la zona y quedó listo para producir, se considera necesario realizar la terminación del mismo colocándole las correspondientes cañerías de explotación (pre-filtro-filtro y engravado perimetral) y realizar nuevamente el ensayo de pozo, siempre controlando y referenciado el otro sondeo; ya que el mismo puede influir en resultado. El perfil eléctrico no fue lo suficientemente claro para indicar todos los niveles acuíferos que aportan fluidos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a empresa Termas de Villa Elisa S.A. por permitir publicar esta información.

Referencias

Aceñolaza, F., 2007. *Geología y recursos naturales de la Mesopotamia Argentina*. UNT-CONICET. Instituto Superior de correlación geológica. San Miguel de Tucumán.-

Benítez J., 1996 *Informe final Pozo ERVE-1* (Villa Elisa). Inédito. 10 pp

Bossi J. 1966 *Geología del Uruguay*; Departamento de Publicaciones. Comisión de Ciencias N°2.

Bossi J. y Navarro R., 1988. *Geología del Uruguay*. Universidad de la República.1 y 2.

De Alba E. y Serra N 1959: Aprovechamiento del río Uruguay en la zona de Salto Grande. Informe sobre las condiciones y características geológicas. *Dirección Nacional de Geología*. Anales XI: 35 pp. Buenos Aires.

Falconer 1937. La Formación del Gondwana en el noreste del Uruguay, con especial referencia de a los terrenos eogondwanicos. *Inst. Geol. Perf*. Bol 23. Montevideo.

Lambert R. 1939 Memoria explicativa de una carta geológica de reconocimiento del Dto. Paysandú y los alrededores de Salto; *Inst. Geol*. Bol Nº 27.Montevideo.

Lambert, R. 1940. Memoria explicativa de un mapa geológico de reconocimiento del Departamento de Río Negro*; Inst. Geológico del Uruguay*. Bol Nº28, Montevideo.

Mármy D. 2013. *Aportes a la perspectiva geológica e hidrogeológica regional en el sector centro este de la cuenca Chacopampeana*. Tesis doctoral. Universidad de la Coruña, pp 241

Pettarini y Vaccarini L., 2011. *Propuesta de Perforación*. Inédito.

Reig O. 1957 Sobre la posición sistemática de zigolestes paranaensis Amegh. *Revista Centr. Est. Cienc. Nat.*, Bs as. 5 (12-13): 200-226.

Rimoldi H.V. 1963 Aprovechamiento del río Uruguay, en la zona de Salto Grande. Estudio Geológico-geotécnico para la presa de compensación proyectada en el Paso Hervidero (provincia de Entre Ríos). An. *Prim. Jorn. Geol. Arg*. Bs. As., 2: 287-310.

White,I. 1908. Relatorio sobre as "Coal measures" e rochas associadas do Sul do Brasil. *Relatorio final da Comissao de Estudos das Minas de Carvao de Pedra do Brasil*1: 2-300. Imprensa Nacional, Río de Janeiro.

Características hidrolitológicas de las formaciones Patagonia y Santa Cruz. Cuenca del Golfo San Jorge. (Provincias de Chubut y Santa Cruz)

Lisandro Hernández[1] y Mario A. Hernández[2]

[1] Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) Av. 60 y 122 La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina. Hidroar SA. 67 No 1747 La Plata (1900).Buenos Aires. Argentina
[2] Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) Av. 60 y 122 La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina

Mail de contacto: lisandro_h@sinectis.com.ar

RESUMEN

Se describen comportamientos hidrolitológicos de las formaciones Patagonia y Santa Cruz en el ámbito oriental de la cuenca del Golfo San Jorge, que suelen albergar un acuífero denominado "Patagoniano". La provincia de Santa Cruz protegió estas aguas subterráneas por Ley 2185, fijando una reserva hidrogeológica entre las mesetas Espinoza-El Cordón y río Deseado. Recientemente y ante la eventual contaminación por hidrocarburos en operaciones de recuperación secundaria, por Disposición 135 de la Subsecretaría de Medio Ambiente. Por necesidad de discernir términos acuíferos de las formaciones, de aquellos con comportamiento hidrogeológico diferente, se revisaron e interpretaron perfiles geológicos/geofísicos de pozos y piezómetros, sobre el conocimiento regional e hidrolitología de las unidades. Fueron identificados lugares donde las formaciones Patagonia y/o Santa Cruz ofrece/n una condición predominantemente acuífera (freática, confinada o semiconfinada según su posición), otros donde es parcialmente alternante con tramos poco permeables y sondeos en que todo el espesor es acuícludo. Se pretende aclarar una frecuente confusión entre la entidad litoestratigráfica y la hidrolitológica.
Palabras clave: Hidrolitología – Formaciones - Patagonia extrandina – Golfo San Jorge -

ABSTRACT

Hydrolithological behaviours of the Patagonia and Santa Cruz formations are described. They are located in the eastern parts of San Jorge Gulf basin and usually host the so-called "Patagoniano" aquifer. Groundwaters in Santa Cruz province are protected by Law 2185 and, accordingly, a hydrogeological reserve was established between Espinoza-El Cordón tablelands and Deseado river. Recently, they were also protected through Ordinance 135 of the Environment Under-Secretariat in the event of hydrocarbon pollution due to secondary recovery operations. In the need to discern the the aquifer terms of both formations from other aquicludes/aquitards, geological/geophysical profiles of wells and piezometers were reviewed and interpreted, based on the regional and hydrolithological characteristics of the units. Locations in the Patagonia and/or Santa Cruz formations were differentiated as follows: predominantly aquifer (phreatic, confined or semiconfined according to their position); partially fluctuant with low permeability sections and aquicludes throughout the thickness of the soundings. A common confusion between lithostratigraphic and hydrolithological units is discussed.
Key words: Hydrolithology – Formations – Extra-andean Patagonia – San Jorge Gulf

Introducción

El vasto territorio de la Patagonia extrandina argentina se halla bajo condiciones climáticas áridas, con lluvias medias anuales en general inferiores a 200 mm/año y un déficit hídrico del orden de 500 mm/año (Hernández et al. 2008). Pese a los aportes nivales en las latitudes más altas, el panorama regional es de escasa disponibilidad de agua dulce, excepto los poco frecuentes cursos de nacientes andinas y sectores donde tienen lugar mecanismos especiales de recarga de aguas subterráneas (Hernández et al. 2009).

Para proteger estos limitados recursos, la provincia de Santa Cruz sanciona en el año 2000 la Ley 2185 declarando área de reserva hidrogeológica a la comprendida entre los niveles terrazados "Meseta Espinosa" y "El Cordón", delimitada por cota IGM 300 m en el Norte hasta el eje del valle actual del Río

Deseado al Sur; por el Este el meridiano 67º 30' y al Oeste el de 69º.

Consecuentemente, se dicta en el año 2009 la Disposición 135 de la Subsecretaría de Medio Ambiente, que en sus considerandos y luego de introducir sobre problemas derivables de la extracción de petróleo por inyección de agua reza (sic)… "*Que esta situación constituye un potencial riesgo de contaminación de los acuíferos de interés existentes, como por ejemplo en la Cuenca del Golfo San Jorge (Formación Patagonia). Que ante el cuadro de situación existente se hace menester dictar la normativa que regule en esta actividad extractiva de hidrocarburo con este tipo de método de recuperación asistida*…".

Comienza fundamentalmente en el sector oriental de la cuenca del Golfo San Jorge (Figura 1) y a propósito de la legislación aludida, a manifestarse la diferencia de criterios respecto a los conceptos de Formación Patagonia y acuífero "Patagoniano" que motiva esta contribución.

Figura 1. Ubicación de la zona (modificado de Paredes, 2002).

El objetivo es precisamente aclarar las diferencias entre ambas concepciones, que más allá de lo semántico conlleva una implicancia práctica, como se verá.

Materiales y métodos

La metodología utilizada parte de la revisión crítica de la abundante bibliografía de raíz geológico-estratigráfica de alcance regional y local, acerca de las formaciones terciarias Patagonia y Santa Cruz y/o sus equivalentes, entre la cual merecen destacarse los aportes de Feruglio (1949, 1950), Bellosi (1990), Bertels (1969, 1970), Lesta et al. (1980), Malumián (1999, 2002), Nullo y Combina (2002).

El reconocimiento de sus características litológicas y límites, especialmente los verticales, permitió orientar la interpretación de perfiles geológicos y geofísicos (sp y resistividad, Fig.2) procedentes de la exploración-explotación petrolífera y de ejecución de pozos inyectores de agua para recuperación secundaria, desde el punto de vista litoestratigráfico.

Paralelamente, con la misma información de base y los trabajos antecedentes de la Cátedra de Hidrogeología UNPSJB (1982), Consejo Federal de Inversiones (1986, 1991), González Arzac et al. (1991), Grizinic y Fronza (1996), Hernández et al.(2008) más aquella proveniente de relevamientos hidrogeológicos específicos (hidrodinámica, ensayos hidráulicos), fue analizada la conformación hidrolitológica de las formaciones en diferentes perfiles de perforación, con atención a la calidad acuífera, acuícluda o acuitarda de los materiales geológicos.

Fue posible de esta manera distinguir tres modelos típicos del comportamiento en subsuelo para la comarca: cuando resulta preponderantemente acuífera, cuando la unidad litoestratigráfica actúa como acuícluda en todo su espesor, o cuando alternan términos acuíferos con otros acuitardo/acuícludos

Las unidades litoestratigráficas

La *Formación Patagonia*, yacente por debajo de la cubierta gravosa pliocena conocida genéricamente como "*Rodados patagónicos*" o de la *F. Santa Cruz,* está constituida por depósitos de la transgresión marina del Oligoceno tardío-Mioceno y descripta por primera vez por Ameghino (En Feruglio, 1949) que reconoce un piso inferior o *Juliense* y otro superior o *Leonense,* cubiertos por un tercero que llama *Superpatagoniense*.

Su litología comprende areniscas generalmente calcáreas, intercaladas con arcilitas y limolitas con abundantes fósiles marinos (Feruglio, 1949; 1950) incluyendo bancos coquinoideos tenaces.

Por haberse depositado en la etapa transgresiva de un mar de extensión regional, se apoya

sobre formaciones de edades diferentes como *Sarmiento, Río Chico*, *Chon Aike* o *La Matilde* entre otras.

Históricamente, la *F. Patagonia* ha experimentado sucesivos y a veces cíclicos cambios de asignación estratigráfica, cronológica o nominativa. Se crearon formaciones equivalentes parcialmente, como *San Julián* que en la práctica se correspondería con el piso más bajo (Juliense), o la *F. Monte León* que algunos autores asignan al Oligoceno superior-Mioceno inferior (Malumian, 2002). También se propuso considerar a *Patagonia* como un Grupo con las formaciones precitadas como componentes, o en otros casos llamarla *Formación Chenque* (en Malumian, 1999) que con ciertas discrepancias cronológicas puede considerarse equivalente.

Se halla referida al Oligoceno superior-Mioceno y en parte de la región, infrayace a la *F. Santa Cruz* o eventualmente a los "*Rodados Patagónicos*", apoyándose sobre las formaciones *Sarmiento* o *Río Chico*.

Los depósitos corresponden a las mayores profundidades de los mares cenozoicos patagónicos (Malumian, 2002), con gran aporte silico-biogénico. Se produce la erosión y redepósito en ámbito marino de pelitas procedentes de las tobas de la *F. Sarmiento*, que contribuyen a importantes espesores arcillosos-limoarcillosos en la base, como pareciera ocurrir según perfiles de perforación con control geológico y registros geofísicos, en localidades del Norte de Santa Cruz, alcanzando más de 100 m. En otros lugares, predominan sedimentitas arenosas y las fracciones más finas están subordinadas como intercalaciones (Bertels, 1970; Bellosi, 1990)

Ocurre de esta forma una marcada heterogeneidad litológica, traducida como se interpreta más abajo en modelos hidrogeológicos de anisotropías heterogéneas.

La *Formación Santa Cruz* descripta también por primera vez por Ameghino en 1889 (Feruglio, 1949) como el "piso Santacruceño continental" es una sucesión de arcilitas tobáceas, arcilitas y areniscas finas a medianas, tobas y tufitas blanquecinas a pardo claras (Nullo y Combina, 2002), de edad generalmente asignada al Mioceno temprano-medio y tardío, a veces portadora de mamíferos fósiles.

Difícil de diferenciar de la *F. Patagonia*, especialmente en subsuelo, es precisamente, el contenido fosilífero el principal elemento diagnóstico de reconocimiento, no obstante lo cual existe en oportunidades una zona de mezcla de ambos orígenes en el estadio transicional.

Completando la columna hasta superficie existen depósitos que, bajo la denominación genérica de "*Rodados Patagónicos*", incluyen a una amplia variedad de depósitos de gravas poligénicas que tapizan las mesetas extrandinas, y terrazados como los de los ríos Deseado, Senguerr, Cañadón Salado y tributarios, Chico y Shehuen. Desde el punto de vista litoestratigráfico, han merecido varias denominaciones formales como *F. La Avenida*, *F. Cordón Alto*, *F. Pampa de la Compañía*, *F. Mata Grande* y otras.

El "acuífero Patagoniano".

La presencia de agua subterránea en las formaciones *Patagonia* y/o *Santa Cruz*, muchas veces de buena calidad, fue reconocida ya por antiguos pobladores rurales y luego por la actividad petrolífera, llegando a utilizarse para la provisión pública en Caleta Olivia (captaciones de Cañados Quintar y Cañadón Esther). Llegó así a asociarse unívocamente a la formación con el concepto de acuífero, conocido generalmente como "Patagoniano", e incluido por Grizinik (Cátedra de Hidrogeología UNPSJB 1982; Grizinik y Fronza 1996) dentro del denominado para la zona oriental de la Cuenca del Golfo San Jorge *Complejo Multiunitario*.

Este Complejo, redefinido por Hernández et al. (2009), fue subdividido en dos segmentos: el equivalente al Acuífero Multiunitario superior, denominado allí más propiamente Sistema Geohidrológico Superior o activo (SGS), y el restante, Sistema Geohidrológico Inferior o pasivo (SGI).

El primero, ocurrente exclusivamente en medio poroso, incluye a la *Formación Patagonia* y a todos los terrenos terciarios suprayacentes a la *Formación Salamanca* de edad paleocena (Cuadro 1).

Cuadro 1. Secuencia estratigráfica

EDAD	UNIDAD ESTRATIGRAFICA	AMBIENTE
Holoceno	Sedim. modernos	Cont/Marino
Pleistoceno	Terrazas fluviales	Fluvial
Plio-Pleist.	*Rodados Patagónicos*	Continental
Mioceno	*F. Santa Cruz*	Continental
	F. Patagonia	Marino
Eo-Oligoceno	*F. Sarmiento*	Continental
Paleoceno	*F. Río Chico*	
	F. Salamanca	Marino

La experiencia ha indicado, sobre la base de nuevos y más detallados perfiles litológicos y especialmente, información específicamente

hidrogeológica, que muchas veces las formaciones objeto no poseen un comportamiento acuífero, o al menos lo alternan con términos acuícludos o acuitardos.

Esto sucede a expensas de la litología más arriba descripta, ya que ocurren importantes espesores pelíticos, especialmente en los sectores occidentales. Es en estos casos en que suelen surgir discrepancias en cuanto al diseño de los entubamientos de perforaciones petrolíferas o para inyección de agua en recuperación secundaria, más allá de que resulte imprescindible proteger el acuífero por una elemental razón ambiental, independientemente de que lo requiera la normativa.

Para poder apreciar los diferentes comportamientos de las formaciones en la cuenca, se recurre a los perfiles considerados como representativos de las tres situaciones advertidas, a modo de patrones denominados según los lugares donde se sitúan las perforaciones, al no poder referirlas individualizadas según su código por razones de confiabilidad del dato.

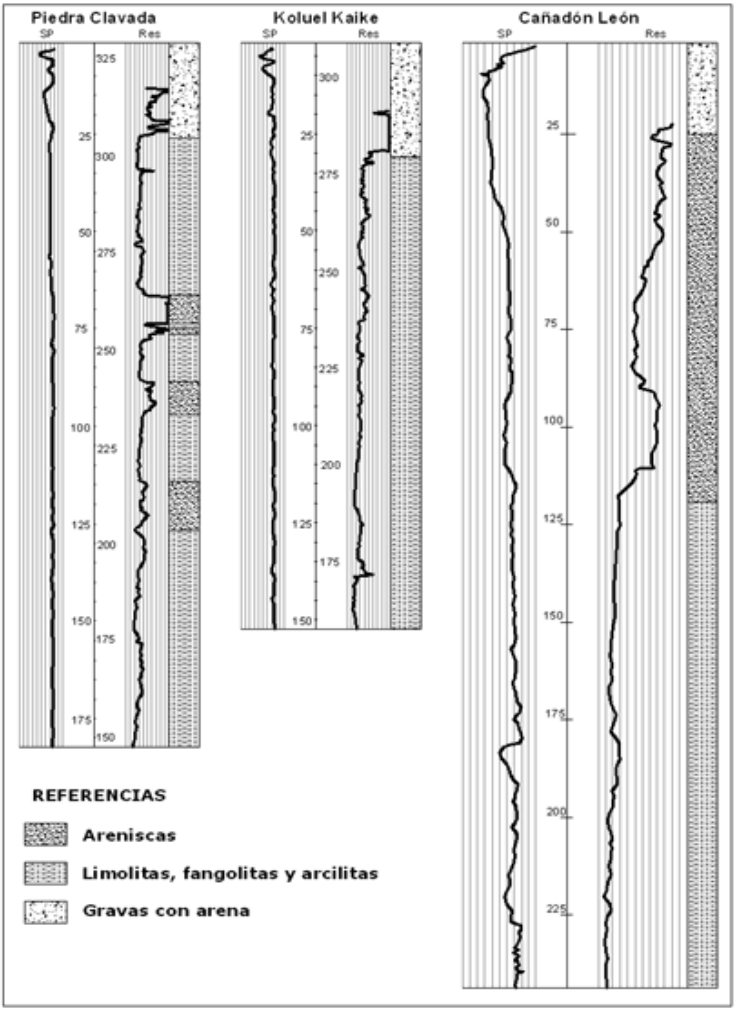


Figura 2. Perfiles geofísicos-litológicos de los Patrones de comportamiento

1. Patrón Cañadón León: La formación está compuesta en su mayor parte por materiales acuíferos (arenas, arenas limosas, areniscas, ocasionalmente conglomerados organógenos), generalmente apoyados sobre un acuícludo correspondiente a tobas de la *F. Sarmiento* (Figura 2). Prevalece este comportamiento en todo el sector costero (Caleta Olivia, Cañadón Seco, Cañadón Quintar, Cañadón Esther), con espesores que suelen superar los 100 m (90 m en el ejemplo), rendimientos del orden de 10-12 m^3/h (Consejo Federal de Inversiones 1991; Plusagua, 2012). En algunos casos es la *Formación Santa Cruz* la que contiene el acuífero, con ausencia de restos fosilíferos marinos.

2. Patrón Piedra Clavada: Por debajo de 10 m de arenas y rodados, el perfil muestra hasta los 204 m la prevalencia de comportamientos desde acuícludos hasta acuitardos (limolitas y limoarcilitas), con delgadas manifestaciones acuíferas (fracción arena) que generalmente no llegan a integrar una unidad hidráulica de tal carácter, por falta de continuidad espacial. Los caudales de prueba fueron francamente exigüos (0,05 m^3/h a 1 m^3/h) con un rápido agotamiento.

3. Patrón Koluel Kaike: Luego de atravesarse unos 40 m de conglomerados, depósitos de gravas gruesas y areniscas conglomerádicas, portadores del acuífero freático, *la Formación Patagonia* está compuesta por una sucesión de arcilitas y limoarcilitas netamente acuícludas, sin ninguna manifestación acuífera apreciable, siquiera a título de intercalación.

Existen lógicas dificultades para reconocer, en base a la información de perfiles eléctricos y geológicos, la pertenencia de pozos antecedentes a alguno de estos patrones de comportamiento, en especial aquellos de antigua data.

Los más nuevos cuentan ya con descripción litológica y registros de multiperfiles, lo cual facilita precisar los pases y a veces la composición.

Pero es indudable que son los sondeos con diseño hidrogeológico y los ensayos hidráulicos los que pueden aportar criterios válidos para identificar las características acuíferas, acuitardas o acuícludas de las formaciones.

A título general, puede decirse que en el sector oriental de la zona de yacencia (Figura 1) la tendencia regional es a la existencia de un carácter acuífero de las formaciones, según el patrón Cañadón León, con presencia creciente de hidrolitología acuitarda o acuífera hacia el Oeste.

Si bien en los ejemplos mencionados los acuíferos son en general confinados o semiconfinados, puede tratarse también de freáticos en los sectores más próximos a la costa, donde las formaciones afloran o se hallan cubiertas por reducidos espesores de gravas.

Conclusiones

La normativa de la provincia de Santa Cruz establece acertadamente la protección de los acuíferos contenidos en la *Formación Patagonia*, surgiendo una confusión respecto a la identidad de esta unidad litoestratigráfica con la hidroestratigráfica denominada acuífero Patagoniano.

Con la finalidad de aclarar debidamente estos aspectos, se analizaron perfiles litológicos, perfilajes eléctricos (potencial espontáneo y resistividad) y datos de perforaciones hidrogeológicas, para componer un cuadro de situación.

De esta forma se distinguieron tres patrones de comportamiento, denominados según la localidad tipo que contiene el sondeo de referencia Cañadón León, Piedra Clavada y Koluel Kaike.

En el patrón Cañadón León la formación se presenta como esencialmente acuífera en casi todo su espesor. En Piedra Clavada se presenta una litología acuícluda/acuitarda, prevalente sobre intercalaciones acuíferas y el patrón Koluel Kaike ofrece toda la potencia de la unidad con comportamiento acuícludo, como lo demuestran los ensayos.

Se concluye concretamente que las unidades litostratigráficas objeto de este estudio no son invariablemente acuíferas, y que sería muy útil para la autoridad de aplicación una regionalización al menos orientativa, para ordenar las acciones a indicar a las operadoras petroleras para el acabado cumplimiento de las normas.

Referencias

Bellosi, E. S., 1990. Formación Chenque: registro de la transgresión patagoniana en la Cuenca San Jorge. *XI Congreso Geológico Argentino*, Actas 2:57-60 San Juan.

Bertels, A. 1969. Estratigrafía del límite Cretácico Terciario en Patagonia Septentrional. *Rev. Asoc. Geol. Argentina* XXIV (1): 41-54.

Bertels, A. 1970 Sobre el “Piso Patagoniano” y la representación de la época del Oligoceno en Patagonia Austral. Rep. Argentina. *Rev. Asoc, Geol. Argentina* XXV (4):495-501. Buenos Aires.

Catedra de Hidrogeologia UNPSJB 1982. Reconocimiento Geohidrológico del Sudeste de la Pcia. del Chubut.UNPSJB-DGRH (ined.). C. Rivadavia.

Consejo Federal de Inversiones 1986. Geología y Geomorfología del NE de la Provincia de Santa Cruz. Tomos I y II. *CFI*. Bs. Aires.

Consejo Federal de Inversiones 1991 Geohidrología del area Noreste de la Pcia. de Santa Cruz. *Colec. Hidrol. Subterránea* N°1. Buenos Aires.

Feruglio, E. 1949 Descripción geológica de la Patagonia, T. I y II. *Dirección General de Yac. Petrolíferos Fiscales*. Buenos Aires.

Feruglio, E. 1950 Descripción geológica de la Patagonia, T. III. *Dirección General de Yac. Petrolíferos Fiscales*. Buenos Aires.

González Arzac, R. J., Díaz, L. y Calvetty Amboni, B. 1991. Geohidrología del Area Noreste de la Provincia de Santa Cruz. Consejo Federal de Inversiones. *Serie Investigaciones Aplicadas, Colec. Hidrología Subterránea* N° 1. Buenos Aires.

Grizinik, M. & S. Fronza 1996. Hidrogeología de la región situada al Noreste de Las Heras, Provincia de Santa Cruz, Argentina. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas IV: 417-425. Buenos Aires.

Hernández, M. A., González, N. and Hernández, L. 2008. Late Cenozoic geohydrology of Extra-Andean Patagonia Argentina. En: J. Rabassa (ed), *The Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego*, Elsevier, Amsterdam, Developments in Quaternary Science 11: 497-509. ISSN 1571-0866.

Hernández, Hernández, M. A., González, N., Ceci, J. H. y Sánchez, R. 2008. "Origen de aguas subterráneas salinas en la zona de Caleta Olivia. Provincia de Santa Cruz. Argentina". *IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. ALHSUD*. Ed. CD Rom y Libro de Resúmenes (Memorias, pp.36).Quito, Ecuador.

Hernández, M. A., González, N. y Hernández, L. 2009. Regiones áridas. Procesos diferenciales de recarga y casos ejemplo de Argentina. En: J. Carrica, M. A. Hernández y E. Mariño (eds), *Recarga de acuíferos. Aspectos generales y particularidades en regiones áridas*, AIH GA-Amerindia, Santa Rosa (La Pampa), 63-70. ISBN 978-987-1082-39-1.

Hernández, M. A., Scatizza, C., Rojo, M., Preiato, S. y Hernández, L. 2009. Un método para estimar la sensibilidad hidrológica aplicado en la cuenca del Golfo San Jorge. Provincias de Chubut y Santa Cruz. *Boletín Geológico y Minero de España*, 120 (4): 523-532. ISSN 0366-0176. Madrid.

Lesta, P. J., Ferello, R. y Chebli, G. 1980. Chubut extrandino. II Simposio Geológico de la República Argentina. *Academia Nacional de Ciencias*. Córdoba.

Malumian, N., 1999. La sedimentación y el volcanismo terciarios en la Patagonia extra-andina. En: *Geología Argentina, Anales* 29, 18:557:612. SEGEMAR, Buenos Aires.

Malumian, N. 2002. El Terciario marino. Sus relaciones con el eustatismo. Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz. *Relatorio del XV Congreso Geol. Arg*. M.J. Haller, Ed. I-15:237-244. Buenos Aires.

Nullo, F. E. y Combina, A. M. 2002. Sedimentitas terciarias continentales". Geologia y Recursos Naturales de Santa Cruz. Relatorio XV Congreso Geol. Arg. M.J. Haller, Ed. I-16:245-258. Buenos Aires.

Paredes, J. M. 2002. Asociaciones de facies y correlación de las sedimentitas de la formación Chenque(Oligoceno-Mioceno) en los alre-dedores de Comodoro Rivadavia, cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. *AAS Revista* Vol. 9 No. 1:53-64.

Plusagua 2011 Estudio hidrogeologico para abastecimiento de agua industrial al Yacimiento Cañadón Seco.YPF S.A. http://www.plusagua.com.ar

Contribución al conocimiento de la hidrogeología de las cuencas intraandinas del N de Chile

Orlando Acosta[1,4], Jordi Guimerà[2], Emilio Custodio[3], Isabel Ansón[2] y José Luis Delgado[1]

[1] Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Chile. jldelgado@collahuasi.cl
[2] Amphos 21 Consulting. jordi.guimera@amphos21.com; isabel.anson@amphos21.com
[3] Depart. Ing. Terreno. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). España. emilio.custodio@upc.edu
[4] Actualmente en Colbún S.A. Chile. oacosta@colbun.cl
Mail de contacto: oacosta@colbun.cl

RESUMEN

La cordillera andina en el norte de Chile es un área muy árida, aunque se puede producir una pequeña recarga pluvial y nival a los acuíferos en áreas recubiertas por formaciones volcánicas ácidas recientes, la que da origen a vertientes, humedales y salares activos. También se encuentran en el área importantes recursos minerales cuya explotación requiere disponer de agua, lo que hace necesario compatibilizar esa demanda de agua con las necesidades de la población y los valores ecológicos. La hidrogeoquímica y en especial los isótopos del oxígeno y del hidrógeno permiten diferenciar los orígenes del agua. Resulta una marcada diferencia de origen entre las aguas subterráneas altiplánicas y las propias de la depresión central. Los isótopos del carbono indican tiempos medios de residencia del agua subterránea en el entorno de 5 000 a 15 000 años.
Palabras clave: Altiplano andino, acuíferos, hidrogeoquímica, isótopos, Norte de Chile, Tarapacá.

ABSTRACT

The Andes Range in northern Chile is a very arid area, albeit a small groundwater rain and snow recharge is possible in an environment dominated by a cover of recent acidic volcanic. This recharge originates springs, wetlands and active salt pans (salares). Also important mineral resources are found, which need water for their exploitation. This water demand has to be made compatible with population needs and ecological values. Hydrogeochemistry and especially the oxygen and hydrogen isotopes allow differentiating the water origin. A conspicuous difference of groundwater origin between the Altiplano and the central depression groundwater appears. Carbon isotope data show average residence times around 5,000 to 15,000 years.
Keywords: Andean Altiplano, aquifers, hydrogeochemistry, isotopes, Northern Chile, Tarapacá.

Introducción

El norte de Chile es árido. Algunas áreas reciben en promedio menos de 5 mm/a de precipitación, como la Depresión Intermedia entre la Precordillera de los Andes y la Cordillera Costera. En el Altiplano se precipitan actualmente en promedio entre 100 y 200 mm/a como lluvia y nieve, lo que unido a la alta tasa de infiltración en las áreas recubiertas por piroclastos recientes poco retentivos y a la muy escasa vegetación, permite una cierta recarga a los acuíferos, que pudo ser mayor en periodos pasados algo más húmedos. Además se puede producir recarga por escorrentías superficiales alimentadas por manantiales que descargan los acuíferos circundantes y la que se produce en eventos lluviosos ocasionales.

Más de un 80% de las lluvias altiplánicas son de procedencia atlántica por vía transamazónica, con lo que resultan isotópicamente muy ligeras a causa del largo recorrido continental y de la altitud a la que se producen, hasta más de 5000 m, y con un marcado exceso de deuterio por recirculación de la humedad continental (Aravena *et al.*, 1999; Salati *et al.*, 1979). Actualmente la humedad procedente del Pacífico muy raramente deja sus escasas precipitaciones cerca de la costa. Ocasionalmente alcanzan la Depresión Intermedia y el Altiplano, aunque quizás lo pudieron hacer con mayor frecuencia en épocas pasadas, en las que el bloqueo de la zona de altas presiones atmosféricas costeras se podía haber desplazado durante ciertos periodos más hacia el Norte.

En este ambiente árido las manifestaciones del agua subterránea en forma de manantiales (vertientes) y cursos de agua asociados antes de que se evaporen o infiltren, son esenciales a la vida y a la economía de sus habitantes.

En las numerosas cuencas endorreicas altiplánicas, de orientación N–S, reactivadas y mantenidas por la actividad tectónica y las efusiones volcánicas, se producen áreas cerradas terminales en las que la escorrentía subterránea y superficial interna se evapora y da lugar a salares, con un entorno hídrico de transición y notables bofedales (humedales) de gran altitud. En la Depresión Intermedia también se forman o han formado salares y bosquetes de freatofitas. Además de los salares en superficie, hay restos de otros que han quedado enterrados como resultado de la relativamente rápida evolución geomorfológica debida al volcanismo y a la tectónica (Acosta *et al.*, 2010; Navarrete *et al.*, 2012). En estos salares domina el NaCl, pero en función de la geohidroquímica local pueden haber depósitos de sulfatos y de carbonatos (Risacher *et al.*, 1999, 2003; López y Garcés, 2002), entre los que en esta área están el Na_2CO_3. Además existen salmueras subterráneas profundas que se extienden sobre una amplia área alrededor de los salares. Estas salmueras que pueden estar enriquecidas en B y Li, y más raramente de NO_3, actualmente son objetivos mineros. En el área existen también acumulaciones muy importantes de sulfuros metálicos que han generado una muy notable actividad minera, en especial para la producción de Cu, de gran importancia nacional.

Para el procesamiento de los minerales hace falta disponer de agua. Ésta se puede captar de los acuíferos locales, con el riesgo de afecciones a los usos humanos preexistentes y a los notables valores ecológicos, bien sea por descenso de niveles freáticos, agotamiento de caudales o contaminación, además de un posible uso importante de reservas multiseculares de muy lenta reposición. Por esta razón se han realizado estudios para conocer y evaluar los posibles impactos y analizar la posibilidad de usar temporalmente esas reservas de agua subterránea.

El objetivo de los estudios ha sido esclarecer las relaciones entre los cuerpos de agua subterránea existentes. Aunque los datos disponibles son escasos dada la gran extensión territorial, permiten evaluar la situación.

Características del área

El área considerada, de unos 25 000 km^2, se localiza en el norte de Chile, en la Región de Tarapacá (Figura 1), al Este de la Cordillera de la Costa. Comprende la cuenca de la Pampa del Tamarugal (Depresión Intermedia) y las Cuencas Altiplánicas entre la Precordillera y la Cordillera de los Andes, además de un área intermedia (aquí principalmente la de Pica–Matilla), y considera parte de las quebradas que van desde las zonas altas de la Precordillera hacia la Pampa del Tamarugal. Entre las cuencas altiplánicas, la de Collacagua–Salar del Huasco es de especial interés por disponer de estudios y datos y estar en régimen natural.

Se tiene una alternancia de estructuras tipo horst y graben controladas por sistemas de fallas principales de desgarre con dirección N–S, con un segundo sistema secundario de fallas transversales W–E. Este conjunto da lugar a un relieve en el que dominan las cadenas montañosas, cuya altitud aumenta hacia el E, alcanzando sus cotas máximas de 5500 a 6000 m en el Altiplano Chileno. Existen notables recubrimientos volcánicos ácidos, que cubren una amplia área de la Cordillera Andina en este lugar, con elevados volcanes y extensas áreas de depósitos piroclásticos de caída (tobas de cenizas y lapillis) e ignimbríticos.

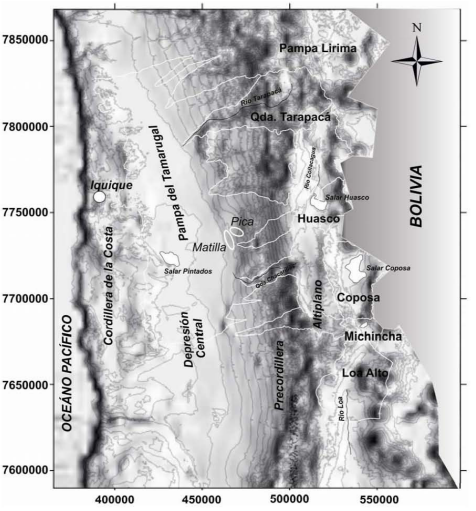


Figura 1. Mapa de situación, morfológico y toponímico. Los mayores salares terminales se desarrollan en territorio boliviano.

Las fallas de desgarre con dirección N–S, que están relacionadas con la intrusión de pórfidos, posibilitan aperturas que facilitan el flujo subterráneo preferente en esta dirección. No hay evidencias de que las fallas normales de orientación ortogonal y paralela a las anteriores, permitan el flujo en sentido W–E a causa del material triturado que tienen asociado, el cual puede actuar como barrera al flujo. Esta situación confiere una anisotropía a la conductividad hidráulica a escala kilométrica. En las Cuencas Altiplánicas favorece la

permeabilidad en dirección N–S y hace difícil el flujo en dirección W–E aún con gradientes hidráulicos elevados, lo que dificulta la transferencia del agua subterránea desde el Altiplano a los acuíferos topográficamente más bajos del lado oeste. En estos acuíferos la recarga se produciría, en su caso, esencialmente a través de la infiltración de la escorrentía de quebradas que se alimentan en vertientes situadas por sobre los 3500 m y de las esporádicas crecidas actuales o pasadas.

Resultados

Método de estudio

Se ha revisado y sintetizado críticamente la literatura relevante existente sobre el área considerada. Tales son: Achurra, 2010; Acosta, 2004; Acosta y Custodio, 2008; DGA, 1998; Magaritz *et al*., 1989, 1990; Suzuki *et al*., 1984, 1985, 1989; Thomson *et al*., 2010; Tröger y Gerstner, 2004; JICA-DGA-PCI, 1995. Ha sido la base para diseñar una red de puntos de muestreo en la que se han tomado muestras de agua para analizar componentes mayoritarios y minoritarios y los isótopos del agua: oxígeno–18 (18O), deuterio (2H) y tritio (3H), y del carbono inorgánico disuelto (CID): 13C y 14C. Se han reunido unas 180 muestras de agua entre los datos previos existentes y los realizados específicamente para el presente estudio. El tratamiento de esa información se ha hecho mediante métodos clásicos. No se han realizado nuevos ensayos ni estudios hidráulicos.

Isótopos del agua

En la Figura 2 se representan los datos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ para las muestras tomadas en las Cuencas Altiplánicas, área intermedia y cuenca de Pampa del Tamarugal.

Las muestras de Pampa del Tamarugal se agrupan paralelamente a la Recta Meteórica Mundial (RMM) ($\delta D = 8\delta^{18}O + 10‰$), con valores $\delta^{18}O$ entre –7,5‰ y –11‰ y $\delta^{2}H$ entre –57‰ y –86‰, con un desplazamiento que muestra procesos de evaporación previos a la recarga, y tienen muy diversos orígenes, tales como vertientes y escorrentías superficiales, y que pueden incluir el resultado de ambientes climáticos pasados, distintos del actual. Las aguas correspondientes al área de Pica–Matilla son más ligeras y varían en un rango –12‰ a –13‰ para $\delta^{18}O$ y de δD –104‰ a –106‰ para el $\delta^{2}H$. Las muestras tomadas en las Cuencas Altiplánicas varían en un rango amplio y se disponen según una recta de pendiente aproximada 4, que es característica de procesos de evaporación del agua desde la zona no saturada. Estas aguas son en origen muy ligeras, con $\delta^{18}O$ en el entorno de –14‰ y $\delta^{2}H$ en el entorno de –110‰, considerando un cierto fraccionamiento en la recarga en áreas poco vegetadas. Responden a su procedencia atlántica y transporte transamazónico, con precipitación final en áreas elevadas y frías. Actualmente la composición isotópica de estas lluvias es notablemente más ligera que la de las aguas subterráneas de Pampa del Tamarugal.

La diferente composición isotópica de las aguas de la Pampa del Tamarugal y la de las Cuencas Altiplánicas indica que las aguas subterráneas correspondientes a cada área se han recargado en lugares y condiciones climáticas y altimétricas diferentes.

Las determinaciones de tritio (^{3}H) están por debajo del umbral de detección (aproximadamente 0,2 UT), lo que indica que se trata de aguas con un tiempo de renovación de por lo menos algunos centenares de años. La única excepción son algunas aguas subterráneas someras en el área intermedia de Matilla, afectadas por actividades recientes de regadío con aguas subterráneas locales, principalmente vertientes o galerías, que han adquirido ^{3}H en su contacto con la atmósfera.

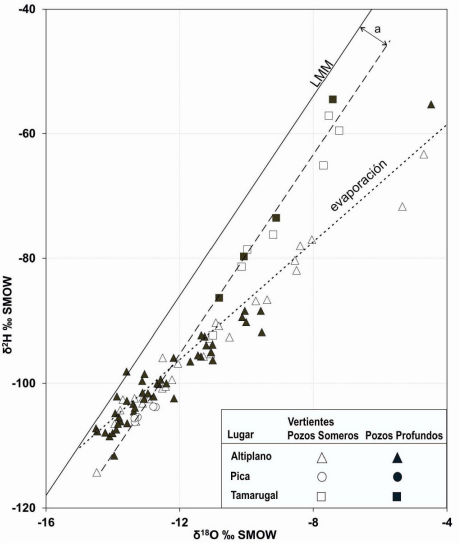


Figura 2. Relación $\delta^{2}H$–$\delta^{18}O$. LRM es la recta meteórica mundial. Las aguas de la Pampa del Tamarugal son de origen diverso, con evaporación previa a la recarga, representada por el desplazamiento **a**. Las del Altiplano y Pica son aguas recargadas a gran altitud que han

sufrido diversos procesos de evaporación tras la recarga, diferentes de los anteriores.

Estudio hidrogeoquímico

Las muestras de agua en general presentan un apreciable grado relativo de mineralización a causa de la aridez climática, que evapoconcentra la deposición atmosférica transportada y reciclada, con un ambiente en que el SO_4 puede dominar sobre el Cl. Así las aguas menos mineralizadas corresponden a las partes altas del altiplano, más lluviosas y con menor evapotranspiración, en áreas en que los suelos son poco retentivos. Se trata de aguas sulfatadas, variables entre sódicas y cálcicas, con una cierta diferenciación entre el lado Oeste y el lado Este fronterizo con Bolivia, con más volcanismo tranquiandesítico reciente y subreciente. El conjunto incluye aguas algo salinas bicarbonatadas, cálcicas o magnésicas, aportadas por los ríos Chislaca, Batea y Piga, que confluyen formando el río Collacagua que discurre por la cuenca del Salar del Huasco, y que se infiltran totalmente antes de llegar al salar y alimentan subterráneamente su periferia. Estas aguas proceden de vertientes en la cuenca y algunas son hidrotermales, lo que indica su procedencia de formaciones profundas y que emergen favorecidas por las fallas N–S. Otras aguas de moderada mineralización, bicarbonatadas sulfatadas, se encuentran en el extremo SE de Pampa del Tamarugal, más próximas a la Precordillera y otras al Salar de Pintados.

Se encuentran también aguas salinas cloruradas, que en general están asociadas a salares actuales o enterrados, bien sea como mezcla con salmueras finales (alto contenido en B y Li), bien como disolución de halita, como lixiviado de antiguos salares, a veces con alto contenido en HCO_3. Algo similar sucede en ciertas áreas de la Pampa del Tamarugal.

La Figura 3 muestra la relación entre Na y Cl. Un grupo de muestras con Cl < 5 meq/L tienen rNa/rCl > 1 (r = meq/L) y responden a la modificación de la recarga por aporte de Na de la alteración de los minerales de rocas volcánicas por acción de la acidez que comunica el CO_2 edáfico, aunque su presión parcial en el gas del suelo sea pequeña por la escasa vegetación. Tales son las aguas muestreadas en las Cuencas Altiplánicas y los pozos y vertientes intermedias del área de Pica–Matilla.

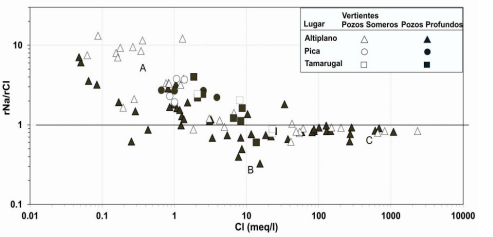


Figura 3. Relación rNa/rCl (r=meq/L) en función de Cl. A: aguas dulces con un notable exceso de Na por meteorización de materiales volcánicos, hasta Cl<2 meq/L, con tendencia más acusada para las vertientes del altiplano. B: aguas más mineralizadas, con déficit de Na para algunos pozos profundos altiplánicos, a diferencia de las aguas de Pampa del Tamarugal. C: aguas salinas con un pequeño déficit de Na a causa de la disolución de halita impura y efecto de salmueras residuales.

El valor rNa/rCl tiende a 1 al crecer el Cl, y corresponde a la disolución de halita en áreas en relación con salares actuales o anteriores o responden a mezclas de las aguas de menor mineralización con salmueras o de disolución de evaporitas.

La Figura 4 muestra un aumento de la relación Cl/Br al crecer la concentración de Cl debido a la disolución de halitas puras, que carecen de Br. Las aguas más diluidas (Cl < 5 meq/L) tienen rCl/rBr entre 100 y 800 y corresponden a los pozos y vertientes del área de Pica–Matilla, y a las vertientes altiplánicas recargadas por la precipitación en áreas altas, en un ambiente no influenciado por salmueras o facies evaporíticas. Algo similar muestra la Figura 5 que relaciona el $\delta^{18}O$ con el Cl.

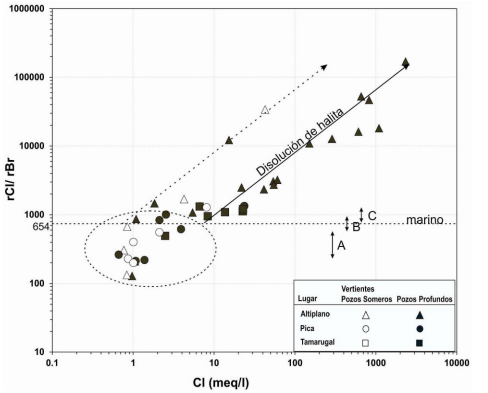


Figura 4. Relación r/Cl/rBr (r=meq/L) en función de Cl. A: rango esperable atmosférico; B: rango

esperable volcánico; C: posible rango de salmueras residuales de evaporación. Las líneas oblicuas indican la evolución por disolución de halita (NaCl) a partir de dos orígenes distintos del agua dulce.

Las aguas que tienen incorporación de salmueras tienen una relación rNa/rLi en el entorno de 100, además de aumentar la concentración en Na. Los valores rNa/rLi próximo a 500 parecen ser los característicos del ambiente natural de recarga. En este grupo se encuentran la mayoría de los puntos muestreados en las Cuencas Altiplánicas, las vertientes de Pica y los pozos de Matilla, que así se diferencian del resto de las áreas de Pampa del Tamarugal.

Tiempo de renovación

Para obtener una primera estimación de los tiempos de renovación del agua de los acuíferos (volumen almacenado / recarga en el área), que son grandes, se ha tratado de interpretar los contenidos de ^{14}C (radiocarbono) en el CID (carbono orgánico disuelto) de las aguas muestreadas. Sólo se consideran aquellas muestras que no presentan aportes de C distintos al debido al CO_2 atmosférico y edáfico. Así se han descartado las muestras con CID > 3 meq/L y $\delta^{13}C$ anómalos (Figura 6), en especial

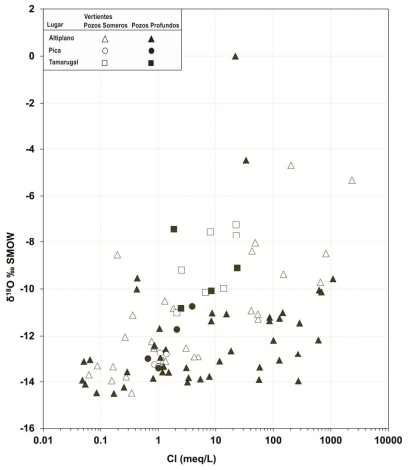


Figura 5. Relación $\delta^{18}O$–Cl. Si domina la disolución de halita el $\delta^{18}O$ no se modifica mientras que los valores se hacen mucho mayores (más pesados) si hay evaporación.

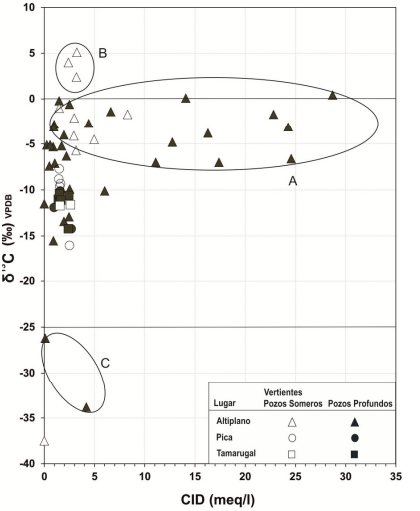


Figura 6. Relación $\delta^{13}C_{CID}$ con el CID (carbono inorgánico disuelto). A: aguas con aporte de C mineral (de Na_2CO_3 y/o $CaCO_3$); B: aguas con aporte mineral muy fraccionado (Na_2CO_3 precipitado o de salmuera); C: aguas con posible aporte de C por oxidación de CH_4 generado en humedales (biológico) o volcánico (geogénico).

las más salinas, que probablemente contienen una proporción importante de C procedente de Na_2CO_3 y $CaCO_3$ depositados en los salares y su entorno, o contenido en salmueras residuales (es una situación especial local) o con un gran exceso de Na sobre Cl que pudiera ser debido a aportes de CO_2 geogénico (volcánico).

En la Figura 7 se representa el ^{14}C en función del ^{13}C, remarcando aquellas en que la mayoría del ^{14}C es edáfico y por lo tanto interpretables como "edad" en el supuesto de flujo de pistón (edad aparente radiométrica). Los valores de rango de edades aparentes corregidas en los puntos muestreados se indican en la Tabla 1, fuera de dos muestras de agua subterránea somera que responden a recarga local reciente en las áreas con uso agrícola en el entorno de Pica–Martilla, una de las cuales tiene ^{3}H medible, el ^{14}C varía entre 0 y 50 pmc. También se eliminan las muestras que pueden reflejar oxidación de CH_4 biogénico (en humedales) o geogénico (volcánico), así como aquellas que tienen efectos antrópicos recientes en el entorno de Matilla. Para las muestras restantes, en este caso el medio geológico no aporta C de carbonatos minerales de forma significativa.

Tabla 1. Número de puntos en el rango de edades aparentes radiométricas, T_a, miles de años (ka) en base a los resultados por cuencas.

Cuenca	Total	< 5	5 < T_R < 10	10 < T_R < 15	> 20
Altiplánicas	19	0	11	7	6
Pica–Matilla	5	3	1	1	0
Tamarugal	7	1	1	5	0
TOTAL	31	4	13	13	6

Como se trata de acuíferos libres extensos, hay que distinguir entre las muestras de vertientes y de los pozos que extraen agua de todas las profundidades, de las muestras de pozos que corresponden a la parte profunda del acuífero y que hidráulicamente corresponden a un largo recorrido. Éstas tienen un tiempo de renovación que corresponde al tránsito por el medio no saturado en el área de recarga más el de circulación por el acuífero según la correspondiente línea de flujo. Aquellas primeras son una mezcla de aguas recargadas sobre todo el acuífero, cuyo tiempo de renovación depende del paso por el medio no saturado más una ponderación de tiempos de residencia en el acuífero según el conjunto de líneas de flujo. No hay datos para evaluar estas circunstancias, pero se pueden hacer conjeturas. Cabe esperar un tiempo de tránsito por el medio no saturado, $\tau = \theta g/R$, θ = humedad volumétrica, g = espesor, R = recarga, del orden de algunos miles de años, quizás hasta 30 000 años donde la recarga es menor, o sea valores de ^{14}C entre 50 y 15 pmc. El efecto de acuífero libre recargado sobre toda su superficie reduce el contenido en ^{14}C según $C_0/C = 1 + 0{,}693mb/TR$, C_0 = valor inicial, C = valor en la descarga, m = porosidad, b = espesor saturado, R = recarga, T = periodo radioactivo = 5730 años para el ^{14}C. Para C_0 = 100 pmc, C puede variar entre 60 y 30 pmc. Todo ello está en el rango de lo observado de modo que se puede justificar con condiciones de recarga similares a las actuales, pero también con periodos pasados algo más lluviosos (Herrera y Custodio, 2013). Las muestras de pozos profundos pueden tener tiempos de tránsito por el medio no saturado de hasta unos pocos miles de años. El efecto de paso por el medio no saturado suele dominar el proceso.

Discusión

La diferente composición isotópica de las aguas subterráneas entre la Pampa del Tamarugal y las Cuencas Altiplánicas indica que las aguas subterráneas correspondientes a cada cuenca se pueden haber recargado en localidades y en condiciones climáticas y altimétricas diferentes, o tener su origen en precipitaciones de diferente procedencia. Así, en términos generales se trata de sectores hidrogeológicos distintos, sin conexión. La Figura 8 muestra una síntesis del funcionamiento transversal en una sección SW–NE. La mayor permeabilidad N–S permitiría un flujo de esa orientación, pero por un lado el gradiente hidráulico es pequeño, lo que lo limita, y por otro, la tectónica y el volcanismo crean barreras que cortan la comunicación y producen las descargas que dan origen a los salares cuando la cuenca es terminal, sin salida ni superficial ni subterránea, por lo menos en un cierto tiempo geológico.

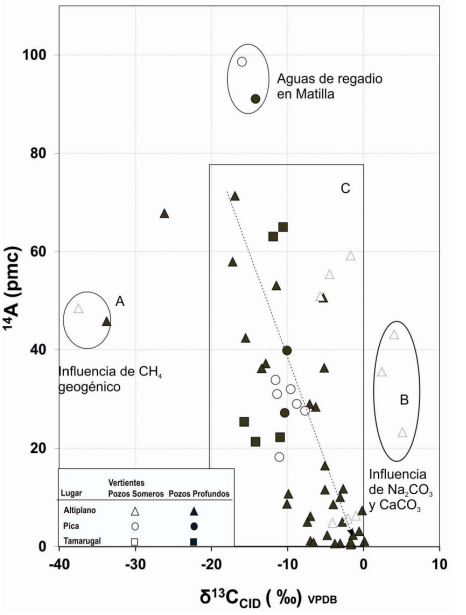


Figura 7. Gráfico ^{14}A (actividad de ^{14}C en por ciento de carbono moderno, pmc) en función de $\delta^{13}C$ del CID. A: aguas del altiplano con posible influencia de CO_2 procedente de oxidación de CH_4, en parte subrecientes; B: aguas del altiplano con influencia del C de depósitos carbonáticos, en parte subrecientes; C: campo de aguas mezclas entre aguas subrecientes y aguas con largos tiempos de residencia en condiciones hidrogeoquímicas variables; parte de los pozos profundos muestran largos tiempos de recorrido. Subreciente quiere decir de hasta pocos miles de años.

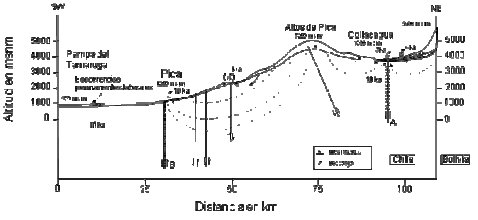


Figura 8. Funcionamiento hidrogeológico esquemático de una sección SW–NE a través de los Altos de Pica–Collacagua con indicación aproximada de los tiempos de renovación en miles de años (ka) de las aguas de descarga recargadas en los Altos de Pica y en las formaciones volcánicas fronterizas. No hay transferencia significativa hacia la Pampa del Tamarugal. A.– Falla de desgarre permeable. B.– Falla normal regional a modo de barrera.

Los valores de las edades radiométricas aparentes están dentro del orden de las dataciones de restos orgánicos dentro de los materiales del cuaternario de las quebradas que drenan hacia la Pampa del Tamarugal (Nester *et al*., 2007). De forma simplificada se menciona la existencia pasada de dos "ventanas climáticas" más lluviosas, una más acusada en el Pleistoceno terminal (13000–17000 años BP) y otra menor en el Holoceno reciente (1100–700 años BP) y que se asocia a restos arqueológicos precolombinos. Fuera de estas épocas el ambiente ha sido hiperárido, como lo es en la actualidad. En esos dos periodos, en especial en el primero, se podría haber producido una recarga preferente tanto a los acuíferos de la Pampa Tamarugal como a los de las cuencas altiplánicas. Los tiempos de renovación obtenidos en las vertientes de las diferentes cuencas son compatibles con una recarga en los periodos del Pleistoceno terminal y también con una recarga actual en las áreas que reciben algo de precipitación. Algo similar se presenta y discute en Herrera y Custodio (2013) para el área de la Depresión Intermedia–Cordillera Costera más al sur, en la II Región, aunque el periodo reciente algo más húmedo parece ser anterior, en el entorno de 3000 años BP. No obstante también puede haber recarga actual en el Altiplano y en las cuencas de la Pampa del Tamarugal a partir de la infiltración del agua de las vertientes laterales y de la ocasional escorrentía por las quebradas.

Conclusiones

No se conoce la deposición atmosférica mineral en el área. Como primer orden de magnitud por la ubicación y circulación atmosférica podría esperarse un valor medio de 0,1 a 0,3 g $m^{-2}a^{-1}$ de Cl, incluyendo cierta recirculación local, y mayores valores de SO_4 a causa de recirculación y generación local por emanaciones volcánicas residuales. En las áreas altiplánicas no afectadas por los salares la concentración en Cl del agua subterránea varía entre 40 y 90 mg/L. Eso supondría una recarga posiblemente entre el 0,9 y 4,5% de la precipitación, o sea entre 1 y 6 mm/a. Es sólo una aproximación muy gruesa, que además puede fallar si los contenidos en Cl no son estacionarios sino que responden a otras condiciones climáticas. Una recarga en torno a 6 mm/a está de acuerdo con resultados de balances de agua en el suelo, que apuntan hacia 6,5 - 10 mm/a (5 a 8% de la precipitación).

A nivel regional, el flujo subterráneo en las cuencas altas está condicionado por el estilo estructural, que facilita el flujo del agua subterránea en sentido N–S pero que lo dificulta en sentido E–W. No se justifican flujos significativos de agua subterránea entre las cuencas altas y la Pampa del Tamarugal.

Los isótopos estables del agua permiten determinar los procesos que afectan al agua en los diferentes ámbitos, fundamentalmente evaporación y altitud de recarga, y diferencian claramente las aguas de las cuencas altiplánicas muy ligeras de las de la Pampa del Tamarugal, en general más pesadas y que no son compatibles isotópicamente con una recarga en las zonas altiplánicas. Lo mismo se deduce del estudio hidrogeoquímico.

La recarga actual en el Altiplano se produce durante el llamado "invierno boliviano", con frentes de humedad que provienen del Atlántico. En cambio, la magnitud actual de la lluvia en la Pampa del Tamarugal no justifica una recarga difusa actual, aunque puede existir a partir de las vertientes laterales o de escorrentías ocasionales, o ser el resultado de épocas anteriores más húmedas, con una posible influencia de frentes de precipitación del Pacífico, isotópicamente más pesados.

Las vertientes y pozos en el lado oriental de la Pampa del Tamarugal, en el área de Pica – Matilla, a cota más elevada, tienen una composición isotópica muy ligera que se atribuye a que su zona de recarga está en los Altos de Pica, en la Precordillera, a cotas similares al resto de las cuencas altiplánicas. La recarga en estas áreas altas alimentaría a la vez e independientemente ambos lados.

El estudio de los isótopos del carbono indica tiempos de renovación de las aguas subterráneas entre 5 000 y 15 000 años,

compatibles con sus condiciones de recarga actual y también con una posible paleorecarga.

Las "edades" más antiguas obtenidas corresponden a muestras de pozos profundos de la cuenca altiplánica de Coposa, por razón del largo recorrido en flujo de pistón

El hecho de que el agua extraída en algunos de los pozos en explotación muestren edades aparentes muy antiguas no implica necesariamente que a nivel de acuífero o de cuenca solamente se estén explotando recursos de agua que no se renueva.

Agradecimientos

Se agradece a Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi el haber permitido usar los datos obtenidos recientemente en los estudios hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos del área que ha llevado a cabo con el apoyo de Amphos21.

Referencias

Achurra, L. 2010. Estudio hidrogeoquímico sobre la interacción de aguas subterráneas profundas y someras en Pampa Lirima, Norte de Chile. Tesis de Máster en Hidrología Subterránea, *Fundación UPC*. Barcelona: 107 pp.

Acosta. O. 2004. Impacto de las extracciones de agua subterránea en el salar del Huasco, Tesis de Máster en Hidrología Subterránea, *Fundación UPC*. Barcelona: 306 pp.

Acosta, O. y Custodio, E. 2008. Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 119 (1): 33–50.

Acosta, O., Rengifo, P. y Dzogolyk, E. 2010. Saline groundwater: An alternative for the sustainable exploitation of Andean highland groundwater reserves. Proceeding of the 2nd International Congress on Water Management in the Mining Industry. Santiago, Chile: 157-165

Aravena, R., Suzuki, O., Peña, H., Pollastri, A., Fuenzalida, H. y Grilli, A. 1999. Isotopic composition and origin of precipitation in Northern Chile. *Applied Geochem.* 14 (4): 411–422.

DGA 1998. Evaluación de recursos hídricos en el sector de Pica, hoya Pampa del Tamarugal, I región. Dirección General de Aguas. Santiago.

Herrera, Ch. y Custodio, E. 2013. Origen de las aguas de los manantiales costeros de la Cordillera del norte de Chile en el entorno de Antofagasta. *Revista Geológica de Chile* (en evaluación).

JICA-DGA-PCI. (1995). The development of water resources in northern Chile, supporting report B: geology and groundwater.

López, P.L. y Garcés, I. 2002. Evolución química de las salmueras del salar de Huasco (Chile) en condiciones experimentales controladas. Rev. *Real Academia de Ciencias*. Zaragoza, 57: 201–209.

Magaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O. y Grilli, A. 1989. Water chemistry and isotope study of streams and springs in Northern Chile. *J. Hydrol.*, 108, 323–341.

Magaritz, M., Aravena, R., Peña, H. Suzuki, O. y Grilli, A. 1990. Source of ground water in the deserts of Northern Chile: Evidence of deep circulation of ground water from the Andes. *Ground Water*, 28 (4): 513–517.

Navarrete N., Vergara C., Acosta O., Cáceres J., Garcés S., Avilés F., Inostroza C., Avendaño V., Ramirez E., López L. y Rengifo P. 2012. Nuevos antecedentes en la estratigrafía profunda de la cuenca del Salar de Coposa (20°30'-20°50'S). Actas del XIII Congreso Geológico de Chile, Antofagasta, Chile: 3 pp.

Nester, P.L., Gayó. E., Latorre, C., Jordan T.E. y Blanco N. 2007. Perennial stream discharge in the hyperarid Atacama Desert of northern Chile during the latest Pleistocene. *Proc. Natl. Acad. Science* USA, 104 (50): 19724–19729.

Risacher, F., Alonso, H, y Salazar, C. 1999. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: Regiones I, II y III., Chile. Convenio de Cooperación DGA-UCN-IRD. *MOP*. Vol I: 1–89 y Vol II: 1–207. Santiago.

Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth–Science Reviews* 63: 249–293.

Salati, E., Dall'Allio, A., Matsui, E. y Gat. J.R. 1979. Recycling of water in the Amazon Basin: an isotopic study. *Water Resources Research*, 15: 1250–1258.

Suzuki, O, Aravena, R. y Fritz, P. 1984, 1985, 1987. Publicaciones diversas sobre hidrologia isotópica y el recurso del área Esmeralda–Pica–Matilla. Comisión Chilena de Energía Nuclear. Santiago.

Tröger, U. y Gerstner, D. 2004. Estudio de investigación de la situación hidrogeológica en la Formación los Altos de Pica. Convenio DGA–CONADI. SDT.Nº174. 25 pp. Santiago.

Caracterización hidrogeológica en tres áreas medanosas en el nordeste de La Pampa, Argentina

Eduardo Castro[1], Carlos J. Schulz[2], Eduardo E. Mariño[2], María Emilia Ughetti[2], Lorena Ceballo[2] y Nayla M. Massara[2]

[1] Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina. Coronel Gil Nº 353, 6300, Santa Rosa, La Pampa.
[2] Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa. Avenida Uruguay N° 151 Santa Rosa, La Pampa, Argentina. Teléfono 54 2954 425166.

eduardocastror@yahoo.com.ar

RESUMEN

La presente contribución plantea la importancia de los acuíferos alojados en ambientes medanosos del NE de la Provincia de La Pampa. Presenta una evaluación hidrogeológica y destaca la trascendencia de la geomorfología en la conformación del recurso hídrico disponible en tres acuíferos denominados como General Pico-Dorila, Quemú Quemú e Intendente Alvear. En las áreas de estudio seleccionadas, la vinculación de la génesis sedimentaria con la ingente actividad antrópica, han originado la formación de cuerpos arenosos que crean condiciones favorables para la infiltración del agua de lluvia. Las propiedades hidráulicas han permitido una explotación con rendimientos superiores a los obtenidos en otros ámbitos y además han incrementado localmente el acceso a agua de mayor aptitud química para distintos usos. Se concluye que estas áreas poseen recursos hídricos subterráneos significativos, en cantidad y calidad, y dicha disponibilidad se ha relacionado con la existencia de estos ambientes geomorfológicos particulares en zonas semiáridas.
Palabras clave: acumulaciones arenosas, médanos, geomorfología, acuíferos.

ABSTRACT

This paper raises the importance of aquifers hosted in dune environments in NE of the Province of La Pampa. It presents a hydrogeological assessment and shows the relevance of the geomorphological characteristics of three aquifers named “General Pico-Dorila”, “Quemú Quemú” and “Intendente Alvear”. The studied areas were selected because their sedimentary origin and the enormous human activity have resulted in the formation of sand bodies with favorable conditions for rainwater infiltration. Their hydraulic properties provide high yielding wells and favour the access to water of good quality for several uses. It is concluded that these areas have very significant groundwater resources, in quantity and quality, and that this availability is uniquely related to the existence of these particular geomorphic environments in semiarid areas.
Keywords: accumulations of sand, dunes, geomorphology, aquifer.

Introducción

Los acuíferos alojados en ambientes medanosos son los principales recursos hídricos con que cuenta la provincia de La Pampa para el abastecimiento de agua destinada al uso urbano y rural. Las acumulaciones arenosas crean condiciones favorables para la infiltración del agua de lluvia, fuertemente condicionada por el marco climático. Sus propiedades hidráulicas permiten una explotación con rendimientos superiores a los obtenidos en otros ámbitos y además incrementan localmente la posibilidad de acceder a agua de mayor aptitud química. Estas cualidades dan lugar a su selección como los sitios preferenciales para la ubicación de obras de captación. Sin embargo, dichos medios son sensibles al régimen de explotación y cuando éste es inadecuado se produce un marcado deterioro cuantitativo y cualitativo del recurso.

En el presente trabajo se ha tomado como casos de estudio a tres sectores de los acuíferos denominados “de Intendente Alvear”, “de General Pico-Dorila”,y “de Quemu Quemú” correspondientes a las tres localidades homónimas y que representan a tres cuerpos de agua subterránea ubicados en el sector NE de la provincia de La Pampa, tal cual se observa en la Figura 1.

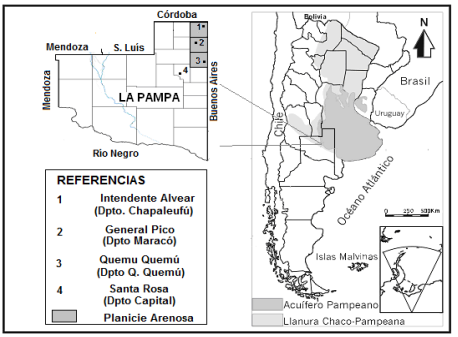


Figura 1. Ubicación del área de estudio

El objetivo central del presente trabajo ha sido demostrar las analogías hidrogeológicas y geomorfológicas entre ellos y cómo las mismas se vinculan con la presencia de agua apta para consumo humano dentro de amplias zonas que se caracterizan por la presencia de aguas con elevados contenidos en Sales Totales y algunos elementos nocivos para la salud humana.

El primer acuífero citado provee de agua potable a las localidades de Intendente Alvear y Ceballos, abasteciendo a unos 11.000 usuarios (Castro, 2009). En el mismo sentido, del acuífero de General Pico-Dorila (Mariño, 2003) depende el abastecimiento doméstico e industrial de General Pico, que, con casi 80.000 habitantes, es la segunda localidad más importante del territorio provincial y por último, el acuífero de Quemu Quemú (Malán y Schulz, 1988) que abastece de agua potable a 4650 habitantes. Todos los acuíferos además, satisfacen el consumo ganadero en los establecimientos rurales de sus respectivas zonas de influencia.

Materiales y métodos

Para los casos de estudio se realizó una evaluación de las reservas y recursos disponibles y de la calidad del agua subterránea para distintos usos. El aspecto cuantitativo se basó en la interpretación de los diversos datos recopilados de los estudios anteriores y los realizados específicamente, mientras que la caracterización hidroquímica insumió la obtención y análisis de cerca de 100 muestras de agua, mayormente provenientes de perforaciones de establecimientos rurales de cada una de las áreas y en algunos casos de las baterías de explotación de los servicios de provisión, concesionados y operados todos ellos por el sistema de asociación cooperativa.

Los muestreos se realizaron complementando los existentes y su distribución espacial se orientó a caracterizar los distintos ambientes geomorfológicos del área, partiendo de la hipótesis de la incidencia de tales condiciones sobre la calidad del agua subterránea. Los sectores analizados en consecuencia totalizan un área de más de 800 km^2 y se distribuyen políticamente en tres Departamentos del NE pampeano: Chapaleufú, Maracó y Quemú Quemú que se extienden con una longitud aproximada de 160 km en sentido N-S y 50 km en sentido W-E (Figura 1).

Los análisis químicos se realizaron según técnicas convencionales, mediante un espectrofotómetro de barrido en espectro visible y consistieron en la determinación de residuo seco, conductividad eléctrica, pH, alcalinidad, dureza, iones principales, nitratos, fluoruros y arsénico. La evaluación de la calidad para consumo humano se basó en los límites adoptados por la Dirección de Aguas de La Pampa, cuyos parámetros en líneas generales se corresponden o asemejan con los establecidos en el Código Alimentario Argentino.

Reseña geomorfológica de las áreas

Es de destacar la importancia que la geomorfología adquiere para la presencia de las aguas subterráneas y a su vez en la morfología de la capa freática. Los resultados obtenidos permitieron individualizar y delimitar dominios geomorfológicos, unidades subordinadas y efectuar una caracterización de su comportamiento hidrológico, especialmente en relación al escurrimiento subterráneo e infiltración.

Las características tanto locales como regionales, guardan relación con una serie de interrupciones que el ciclo fluvial ha tenido y que en forma recurrente actuó desde el Pleistoceno hasta la actualidad (Malagnino, 1989). Tales eventos se hallan estrechamente vinculados con profundos cambios climáticos (alternancia de períodos áridos y húmedos) que afectaron el régimen de los ríos emisarios de centros glaciares, fenómeno que dio lugar a la participación de otros procesos geomórficos, tales como eólicos o fluviales. El efecto tuvo lugar cuando estos sistemas fluviales dejaron de ser funcionales o mostraron mermas severas en sus caudales por efecto de capturas, desvíos y/o anarquía en sus cabeceras por vulcanismo. De esta manera las acumulaciones arenosas localizadas en las planicies aluviales abandonadas quedaron sometidas a los efectos de enérgicos procesos eólicos y comenzaron a

ser deflacionadas y movilizadas, estructurándose de este modo un campo de arenas integrado por médanos de predominancias longitudinales compuestas. Los mismos cubrieron al paisaje fluvial preexistente de tal forma que actualmente la red original subyace al sistema eólico.

Se puede concluir que la conformación geomorfológica se trata de una llanura de agradación, cuya colmatación se produce en el Terciario - Cuaternario temprano. Posteriormente todas estas zonas son afectadas por procesos geomórficos que las transforman dentro de su carácter llano en una sucesión de bajos y lomas, donde en particular el viento, ha dejado su huella. Por ello, las geoformas deben nominarse en general como cuencas o cubetas de deflación y médanos, donde su tamaño varía entre montones de arena y extensos cordones longitudinales de rumbo aproximado Norte-Sur, particularmente en este sector de la provincia. Generalmente los bajos más profundos (pfannen) se comportan como lagunas temporarias o playas, mientras que en las áreas elevadas que han sido profusamente cultivadas, es común la presencia de médanos antrópicos desarrollados sobre los antiguos médanos o planicies medanosas (Castro, et al, 1989).

Caracterización hidrogeológica

Acuífero de Intendente Alvear

La zona se ubica al E casi en el límite con la Provincia de Buenos Aires (Figura 1), presenta un régimen climático edáfico areal térmico de régimen údico a ustico (Cano, et al, 1980), y según Thornthwaite, (1948), Húmedo II, Mesotérmico o mesotermal con pequeña falta de agua y una concentración estival de la eficacia térmica del 24% (Castro, 2009). Hay una clara tendencia de aumento en las precipitaciones que se ha mantenido constante hasta la fecha considerada, salvo excepción de los últimos años, con valores mínimos de 525 mm en 2010 y valores máximos de 1496 mm en el año 1997, con un valor medio de 952,5 mm/año para la serie considerada (1980-2010). Se ha determinado además un gradiente pluviométrico regional en la zona del orden de 1mm/km en el sentido ENE.

Un detalle singular son los desniveles topográficos en la región. Los mismos ocasionalmente superan los 5 m y raramente alcanzan los 8 m como diferencias neta entre el cordón medanoso principal y un pedestal sobre el cual se destacan los médanos actuales, en muchos de los casos “vivos o móviles”. En ellos se distinguen dos ramas, de las cuales la oriental se prolonga hacia el sur en mejores condiciones dentro del área en estudio, mientras que la occidental tiene una mejor continuación hacia el norte. Hacia el Sur de estas geoformas, ambas ramas están separadas por una pequeña zona de descarga, visualizándose en ciertas épocas del año anegamientos temporarios. Como el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie, en algunos casos las lagunas son realmente zonas de descarga, al igual que algunos bajos que a veces presentan suelos parcialmente salinizados producto de la intensa evaporación que se lleva a cabo en esas áreas.

Desde el punto de vista hidráulico, los espesores saturados alojados en la “Formación Arenosa” sobrepuesta al “Pampeano” presentan una permeabilidad relativamente elevada, en el orden de los 10-20 m/día, constituyendo ambos una sola unidad acuitarda. No obstante ello en algunos sectores a pesar de su litología predominantemente limosa presenta muy buenas características hidráulicas con caudales de hasta 32 m^3/h, una Porosidad Eficaz de 4,5 10^{-2} y un caudal característico de 7,3 m^3/h.m para pozos de sólo 20 m de profundidad. Si bien el escurrimiento regional es netamente hacia el NE de ésta región, la variabilidad morfológica determina distintas situaciones en cuanto a la dinámica del agua subterránea. Las formas elevadas del relieve se comportan obviamente como áreas de recargas, presentando valores de la misma que oscilan entre el 11 y 16% de las precipitaciones, según la metodología de cálculo empleada (Castro, 2009), en tanto que las amplias depresiones o incluso las pequeñas de ubicación intermedanosas, actúan como áreas de descarga, ya sea formando lagunas o bañados y a veces de carácter imperceptibles. Las áreas de conducción se localizan tanto en los sectores intermedios entre los anteriores, como en aquellas extensiones de relieve predominantemente llano y con suave pendiente oriental.

Este acuífero presenta aguas con un contenido salino total comprendido entre 300 y 1400 mg/l, típicamente de 500 mg/l y son de carácter bicarbonatado sódico. En la mayoría de los casos, el flúor está por debajo de los 2 mg/l (Giai y Tullio, 2001).

Acuífero de General Pico-Dorila

El área cuenta con numerosos estudios hidrogeológicos, inicialmente orientados a establecer la posibilidad de obtener agua subterránea para abastecer a la localidad de General Pico (Malán, 1983) y luego dedicados a

profundizar el conocimiento del sistema (Consultora A.H. Risiga y Asociados, 1988, Mariño y Bonorino, 1996, Mariño, 2003 y Mariño y Dalmaso, 2003).

La zona se ubica en el noreste de la provincia de La Pampa (Figura 1) y tiene un régimen climático subhúmedo seco (Cano *et al*., 1980), con una precipitación media anual para el período 1921-2010 de 731,6 mm y una temperatura media anual para el período 1961-2010, de 15,8°C, siendo la máxima media de 22,7°C y la mínima media 8,9 °C. Presenta un relieve suavemente ondulado dado por la alternancia de planicies arenosas y depresiones suaves que se completa con médanos aislados, bajos inundables y lagunas temporarias. Una geoforma medanosa elevada y elongada en sentido NNW- SSE, constituye el área de recarga del acuífero libre (Malán, 1983) y determina una divisoria de drenaje subterráneo a partir de la cual la circulación se produce hacia el este y suroeste, donde aparece una zona de descarga local.

El acuífero libre puede dividirse, según las variaciones sedimentológicas, en una sección superior alojada en una capa arenosa eólica y en otra subyacente, en sedimentos loéssicos. Estas secciones tienen características hidráulicas bien diferenciadas pero están íntimamente relacionadas debido a que entre ellas no hay niveles que interrumpan la conexión hidráulica. Según los ensayos de bombeo realizados en la zona por Malán (1983), para el acuífero alojado en el nivel arenoso superior la permeabilidad promedio es de 20 m/día, el rendimiento específico del 11%, y el espesor saturado oscila entre los 3 y 6,50 metros. El acuitardo conformado por el nivel limo-arenoso posee una permeabilidad promedio de 2 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 2×10^{-3}. La profundidad del nivel freático no supera los 4 metros y los caudales que pueden obtenerse están en el orden de los 15 m^3/h, para perforaciones de unos 25 metros de profundidad.

En cuanto a la calidad del agua, la misma determina un espesor útil de entre 25 y 30 m para agua potable. Las sales totales en las áreas de recarga, son menores a 1 g/l. Este contenido aumenta hacia ambos lados de los cordones medanosos, en especial hacia el suroeste. Las agua en áreas de recarga son bicarbonatadas cálcicas. Además, el contenido salino aumenta con la penetración en el acuífero en forma normal, al igual que el flúor y el arsénico (Giai y Tullio, 2001).

Acuífero de Quemu Quemú

Se encuentra dentro de la unidad geomorfológica "De la llanura de modelado eólico superimpuesto", Calmels (1996) caracterizada por un manto de arena en la superficie de entre 0,4 y 15 m. Los procesos morfogenéticos que actuaron fueron principalmente hídricos (de escurrimiento difuso) y eólicos (de acumulación-deflación). Los primeros elaboraron una superficie calcárea con pendiente regional hacia el E, sobre la cual el viento acumuló un manto arenoso.

El relieve está representado por ondulaciones arenosas con sentido N-S y médanos aislados. Intercaladas entre estas ondulaciones existen planicies arenosas de 3 a 4 km de ancho, y frecuentemente áreas deprimidas con lagunas temporarias. El área de estudio pertenece a la región hídrica denominada "Región medanosa de la llanura oriental", la cual se caracteriza por tener precipitaciones con promedios anuales de 750 mm,(1921-2011) disminuyendo desde el norte hacia el sur de la región. El clima es de tipo subhúmedo seco, con una temperatura media anual de 15,9°C. Los vientos predominantes son del N-NE y S-SW, con una velocidad promedio anual de 10 km/h, siendo más intensos durante el período de septiembre a diciembre (Cano *et al*, 1980).

La zona acuífera abarca una superficie aproximada de 216 km^2, aunque la producción mediante pozos de explotación se circunscribe a un área considerablemente menor. Consiste en una capa arenosa superficial, al igual que los anteriores, que por su granulometría y escaso grado de consolidación actúa como elemento de captación y almacenamiento importante de los excedentes hídricos. Por debajo se continúan los sedimentos característicos de la Formación Cerro Azul, constituidos por limos arenosos finos y muy finos. Cuando ambas secciones están saturadas conforman un acuífero multiunitario, el cual se comporta hidráulicamente como libre con drenaje diferido. La recarga anual, calculada por varios métodos, está entre 11 y 13% de las precipitaciones (Arroyo, 2005) y su porosidad Eficaz es de 5×10^{-2} (Malán y Schulz, 1988).

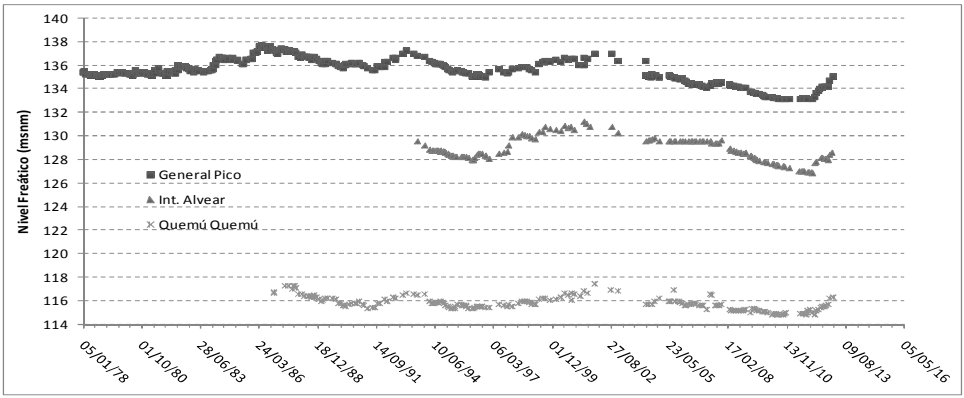


Figura 2. Oscilaciones piezometricas

La alta salinidad, cuyo valor promedio es de 3000 mg/l, coincide con los sectores de descarga y los bajos topográficos, ubicados al SW de la localidad. Por el contrario, el sector del acuífero que se explota, ubicado hacia el NE y W de Quemu Quemú, coincide con el área de recarga y aquí el valor promedio es de 1000 mg/l. Los tenores de flúor varían entre menos de 1 y más de 8 mg/l. En profundidad dicho tenor aumenta, aunque en las secciones de menor contenido se mantiene por debajo de los 2 mg/l hasta los 24 m de profundidad (Giai y Tullio, 2001).

También es importante destacar las similitudes de los de los niveles piezométricos en el área. Para la ocasión se tomaron tres piezómetros representativos de las áreas medanosas de Alvear, Pico y Quemu-Quemu (Figura 2).

Conclusiones

Las analogías hidrolitológicas, geomorfológicas y geohidrológicas de las tres zonas analizadas han permitido determinar el comportamiento como una sola unidad del acuitardo que en su parte superior presenta una importante cubierta arenosa a la cual subyacen sedimentos más finos limo-arenosos, dándole un carácter particular, desde el punto de vista hidráulico, catalogado como un acuífero libre con drenaje diferido.

En función de lo expuesto en el desarrollo del presente informe, se concluye que las tres áreas acuíferas poseen recursos hídricos subterráneos muy significativos, en cantidad y calidad, para usos en el ámbito urbano y rural. Esta condición se vincula a la existencia de ambientes medanosos, donde la cobertura arenosa genera condiciones favorables para la infiltración.

En consonancia con lo manifestado anteriormente, la recarga de los acuíferos en todos los casos es importante como consecuencia de la cobertura arenosa superior, y la misma fluctúa entre valores del 11 al 16% de las precipitaciones anuales.

El aprovechamiento sustentable de estos sectores acuíferos requiere una planificación y gestión adecuada que contemple la sensibilidad propia de los sistemas hídricos en las zonas semiáridas.

Referencias

Arroyo, C**.,** 2005. Estimación de la recarga en el sector de explotación del acuífero que abastece a la localidad de Quemú Quemú, Provincia de La Pampa. Tesina de grado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNLPam, 51 p.

Calmels, A. P., 1996. Bosquejo Geomorfológico de La Provincia de La Pampa. UNLPam. Santa Rosa. 106 p.

Cano, E.; Casagrande, G.; Conti, H.A.; Fernandez, B.; Hevia, R.; Lea Plaza, J.C.; Maldonado Pinedo, D.; Martinez, H.; Montes, M.A. y Peña Zubiate, C.A. 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa-Clima, Geomorfología, Suelo y Vegetación. INTA-Gobierno de La Pampa-UNLPam, 493 p, Santa Rosa.

Castro, E. y Tullio, J. 1989. Informe preliminar de los pozos de Exploración en la localidad de Intendente Alvear. Consideraciones Geológicas y Geomorfológicas. Informe Interno. Dir. Rec. Hídricos. Santa Rosa.

Castro, E. 2009. Análisis Hidrogeológico y Modelo Conceptual del funcionamiento del acuífero de Intendente Alvear. La Pampa. Argentina. Tesis de Magister en Ciencias Hídricas. Universidad Nacional de La Pampa. 191 p. Inedito.

Consultora A.H. Risiga y Asociados. 1988. Estudio para ajustar el conocimiento hidrogeológico del acuífero Pico-Dorila y el funcionamiento hidráulico de la batería de pozos que abastecerán al servicio de agua potable de la ciudad de General Pico. Informe Final. Ministerio de Obras y Servicios Públicos, Tomos 1 a 9, Santa Rosa (inédito).

Cooperativa de Obras, Servicios Públicos, Crédito y Provisión de Quemú Quemú Limitada, COSYPRO Ltda. Disponible en: www.cosypro.com. Consultada el 3 de Marzo de 2011.

Giai, S. B. y Tullio, J. O. 2001.Características de los principales acuíferos de la provincia de La Pampa. Facultad de Ciencias Humanas UNLPam y Dirección de Aguas de La Pampa.

Malagnino, E. 1989. Paleoformas de orígen eólico y sus relaciones con los modelos de inundación de la Provincia de Buenos Aires. *IV Simposio Latinoamericano de Percepción Remota. IX Reunión Planetaria SELPER*. PP.611-620.Bariloche.

Malán, J.M. 1983. Estudio hidrogeológico para el abastecimiento de agua potable a la localidad de General Pico, departamento Maracó, provincia de La Pampa. Informe Preliminar. *Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras*, Actas III:1449-1457, Olavarría.

Malán, J.M. y Schulz, C. 1988. Estudio hidrogeológico para la provisión de agua potable a Quemú Quemú, La Pampa. Segundas *Jornadas Geológicas Bonaerenses*. Actas: 567-578, Bahía Blanca.

Mariño, E.E. 2003. Sistema hidrogeoquímico de un acuífero libre en ambiente medanoso en el área General Pico-Dorila, provincia de La Pampa. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, 141 p, Córdoba (inédito).

Mariño, E.E y Bonorino, A.G. 1996. Estimación de la infiltración eficaz en un acuífero en ambiente medanoso a partir de mediciones periódicas del nivel freático. *XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, IV:405-408, Buenos Aires.

Mariño, E.E. y Dalmaso, M.G. 2003. Análisis de la información básica para la gestión del acuífero que abastece a General Pico, La Pampa, Argentina. Memorias del *III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en hidrología subterránea*, Tomo 1: 209-218, Rosario.

Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Reprinted from the Geographical Review, XXXVIII (1): 55-74.

O Sistema Aquífero Tikuna: o aquífero Cretáceo da Bacia Amazônica

Fátima Ferreira do Rosário[1], Emilio Custodio[2], Gerson Cardoso da Silva Jr.[3]

[1] Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S.A., Brasil, Av. Jequitibá, 950 – Cidade Universitária – Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, Brasil
[2] Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, Jordi Girona 1-3. Campus Nord, ed. D2, Barcelona, España
[3] Universidad Federal de Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos 274. 21941-590 Rio de Janeiro, Brasil

Mail de contacto: fatimarosario@petrobras.com.br

RESUMO

As camadas aquíferas Cretáceas do Sistema Aquífero Amazonas (SAA) formam o sistema aquífero multicamada, confinado, definido como o Sistema Aquífero Tikuna (SAT). O SAT estende-se entre o Arco de Purus e o cinturão de falhas subandinas. Utilizando um modelo numérico regional foi possível observar que este sistema aquífero é recarregado através de seus afloramentos localizados a cerca de 1000 m de altitude na região do cinturão de falhas subandinas. Nas circunvizinhanças do Arco de Iquitos o fluxo é afetado por um divisor parcial de fluxo o que resulta na subdivisão do SAT em duas sub-bacias. As águas do SAT variam de doces a salobras-salinas. Devido às camadas confinantes que se sobrepõem ao SAT, o mesmo se mantém com níveis piezométricos mais elevados do que os níveis do aquífero livre Solimões, sobreposto a este. Em função disso, um gradiente piezométrico vertical ascendente é gerado, fortemente controlado pelo aquitardo que separa estes dois sistemas aquíferos.
Palabras clave: Sistema Aquífero Amazonas; Sistema Aquífero Tikuna, Sistema Aquífero Solimões, modelo numérico de fluxo regional.

RESUMEN

Las capas acuíferas cretácicas del Sistema Acuífero Amazonas (SAA) forman un sistema acuífero multicapa, confinado, que se ha definido como el Sistema Acuífero Tikuna (SAT). El SAT se extiende entre el Arco de Purus y el cinturón de fallas Subandinas. Con la ayuda de un modelo numérico regional, se pudo observar que éste se recarga a través de sus áreas de afloramiento en el borde de las fallas del cinturón Subandino, a cerca de 1000 m de altitud. Se produce una división interna parcial del flujo en las inmediaciones del Arco de Iquitos, que divide el SAT en dos sub-cuencas. Las aguas del SAT varían desde dulces a salobres - saladas. Debido a las capas de confinamiento el SAT se mantiene con niveles piezométricos mayores que los del acuífero libre Solimões sobrepuesto. Debido a esta diferencia piezométrica se genera en este sistema un gradiente piezométrico vertical ascendente, controlado por el acuitardo que separa los dos acuíferos.
Palabras clave: Sistema Acuífero Amazónico; Sistema Acuífero Tikuna, Sistema Acuífero Solimões, modelo numérico de flujo regional.

Introdução

As camadas aquíferas Cretáceas do Sistema Aquífero Amazonas (SAA), de cerca de 300 m de espessura média, formam o sistema aquífero multicamada confinado, definido em Rosário (2011) como o Sistema Aquífero Tikuna (SAT). O SAA em sua porção Oeste (WSAA) carecia de estudos hidrogeológicos básicos que permitissem a ordenação e sistematização de suas unidades hidrogeológicas.

A compilação, organização e análise de dados geológicos, hidrogeológicos, geofísicos e outros dados correlatos, como dados palinológicos e hidrológicos, publicados e outros até então inéditos foram integrados em uma base geoespacial através do sistema de informações geográficas (SIG) ARCGIS. Tal integração de dados permitiu a definição dos limites hidrogeológicos do WSAA, a identificação de suas características hidrogeológicas básicas e a definição de uma nova subunidade hidrogeológica para o SAA, o Sistema Aquífero Tikuna (SAT). Um modelo de fluxo conceitual regional foi delineado e, em sequência, este foi transladado a um modelo

numérico de fluxo regional simplificado utilizando o código numérico Visual MODFLOW. Os resultados obtidos a partir deste modelo numérico de fluxo permitiram o entendimento do fluxo regional desenvolvido no WSAA e em especial no SAT.

O presente trabalho integra dados das 8 bacias sedimentares estudadas (Solimões e Acre no Brasil, Marañón e Ucayali no Peru, Madre de Díos e Beni na Bolívia, Oriente no Equador e Putumayo na Colômbia), define as subunidades hidrogeoestratigráficas do WSAA e identifica suas continuidades hidráulicas, organiza e analisa os parâmetros hidráulicos e dados hidrogeoquímicos de cada subunidade hidrogeoestratigráfica identificada, determina os limites hidrogeológicos do WSAA, calcula sua área e integra regionalmente todos os dados adquiridos em um modelo de fluxo conceitual regional baseado nos dados geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos atualmente disponíveis. Este estudo provê uma nova visão sobre a hidrogeologia do WSAA e a base para que novos estudos sejam desenvolvidos.

O WSAA está localizado na porção noroeste da América do Sul e corresponde à maior porção do Sistema Aquífero Amazonas (SAA). O SAA engloba o WSAA e estende-se ainda mais a Leste, englobando também o Aquífero Alter do Chão. Esta última porção, localizada a Leste do Arco de Purus, é denominada neste trabalho como a porção Leste do SAA (ESAA) (Figura 1).

As publicações a respeito dos grandes aquíferos mundiais (Puri and Aureli, 2009; Margat, 2007; UNESCO, 2007) apresentam o SAA como um aquífero transfronteiriço, composto por duas subunidades: o Aquífero Solimões-Içá e o Aquífero Alter do Chão, sem uniformidade nos limites hidrogeológicos adotados para o SAA (Figura 2).

Estudos geológicos mostram a ocorrência de possíveis camadas aquíferas Cretáceas em subsuperfície na área de domínio do WSAA, embora estudos hidrogeológicos ainda não houvessem se debruçado sobre este tema.

Descrição geral da área e metodologia de estudo

A área de estudo é localizada na porção noroeste da América do Sul, entre as longitudes 78ºW e 60ºW e latitudes 3ºN a 13ºS (Figura 1). A topografia da área se modifica abruptamente na direção W-E, variando de altitudes ao redor de 1000 m snmm até cerca de 250 m na região Subandina. Desta última região em direção ao Leste, por uma extensão de cerca de 2700 km, as altitudes decrescem regularmente através da planície Amazônica até atingirem altitudes em torno de 20 m snmm no limite Leste da área, definida pelo Arco de Purus (Figura 1). Os limites Norte e Sul da bacia são definidos pelos Escudos das Guianas e Brasileiro, respectivamente, onde as altitudes observadas também excedem em muito aquelas observadas na porção central da bacia.

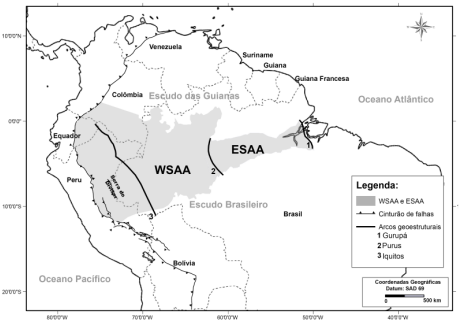


Figura 1. Localização do Sistema Aquífero Amazonas (SAA), suas porções Oeste (WAAS) e Leste (EAAS) e principais feições geoestruturais.

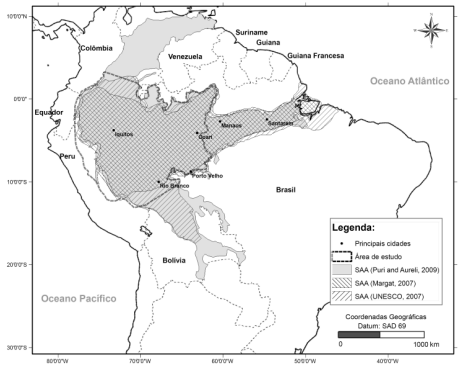


Figura 2. Localização da área de estudo e área designada para o SAA a partir de várias publicações sobre os maiores aquíferos mundiais.

O fato de o WSAA estar localizado na porção mais remota da região Amazônica implica em ser uma das regiões mais preservadas e a mais desconhecida do ponto de vista científico em geral, incluindo o hidrogeológico. Um grande esforço foi empreendido para a obtenção do máximo de dados geológicos e hidrogeológicos sobre a região de estudo. Após uma etapa de levantamento, análise e interpretação de

informações publicadas, uma fase de compilação de informações foi iniciada onde, através de permissão para acesso aos dados da base da Empresa Brasileira de Petróleo (PETROBRAS) foram obtidos dados fundamentais.

Baseando-se em estudos anteriores realizados para outros aquíferos regionais (Welsh, 2000; Sefelnars, 2007; Vives et al., 2009) foi possível definir os limites hidrogeológicos do WSAA, suas subunidades hidrogeológicas, parâmetros hidráulicos, hidrogeoquímica e modelo conceitual de fluxo regional.

O estudo foi conduzido através de uma sequência de interações de informações, primeiro em escala regional até escala de detalhe, embora o resultado final seja apresentado em escala regional. Estas interações foram iniciadas através da análise integrada das colunas geológicas das bacias sedimentares existentes na área.

O segundo passo compreendeu: organização dos dados em uma base de dados geoespacial utilizando o Sistema de Informações Geográficas (SIG) ARCGIS, interpretação e análise de cerca de 600 perfis de poço e seus respectivos perfis geofísicos, generalização dos perfis de poços e elaboração de vários perfis geológicos por toda a área utilizando o programa Visual Groundwater 3.0. O resultado foi a identificação dos limites hidrogeológicos do WSAA e suas subunidades hidrogeoestratigráficas.

O terceiro passo englobou a interpretação, cálculos e tratamento gráfico de parâmetros hidráulicos, dados hidrogeoquímicos e hidrogeológicos. Os dados hidrogeoquímicos foram organizados e analisados utilizando as ferramentas clássicas. Perfis de resistividade, condutividade de fluidos e gamma-ray foram utilizados para estimar comparativamente o grau de mineralização da água subterrânea. A condutividade hidráulica e porosidade foram calculados baseados em resultados de ensaios de campo e também nas características litológicas dos estratos.

Ao redor de 200 registros de níveis piezométricos foram compilados e aproximadamente a mesma quantidade de dados de nível d'água de rios (pontos de controle) foram utilizados para a elaboração manual do mapa piezométrico regional do Sistema Aquífero Solimões (SAS).

Para o Sistema Aquífero Tikuna (SAT) foram obtidos poucos dados piezométricos, o que impossibilitou a elaboração de seu mapa piezométrico. Apesar disso, dados piezométricos importantes foram obtidos para este sistema aquífero, corrigidos em função da salinidade. O resultado desta etapa, baseada na interpretação integrada de todos os dados analisados, foi a elaboração do modelo de fluxo conceitual regional do SAA.

O quarto passo consistiu na elaboração de um modelo numérico de fluxo utilizando o software Visual MODFLOW e outros softwares auxiliares, como o SURFER e o GLOBAL MAPPER. Foi elaborado o modelo digital do terreno (MDT) a partir do mosaico de imagens SRTM 3-arc segundos, que foi utilizado como primeira camada do modelo numérico de fluxo. Foi utilizada interpolação por krigagem para a elaboração das demais camadas do modelo numérico de fluxo (topo do aquitardo e topo do SAT) a partir de dados de profundidade do topo destas camadas definidas a partir dos perfis de poço. Desta forma, esta etapa resultou na elaboração do modelo numérico de fluxo que, então, integrou todos os dados adquiridos e possibilitou a compreensão das principais feições de fluxo do SAT, a relação entre o SAT e o SAS e, consequentemente, o entendimento do fluxo regional no WSAA.

Arcabouço geológico e modelo hidrogeológico conceitual

Desde o Cretáceo inferior as bacias estudadas vêm evoluindo de forma muito similar, resultando em depósitos sedimentares contínuos e litologicamente similares, apesar de algumas apresentarem particularidades.

Os sedimentos Cretáceos desta porção foram depositados sobre sequências sedimentares do Paleozóico ou do Mesozóico superior, compostos principalmente por evaporitos e rochas carbonáticas finas, rochas do embasamento cristalino e rochas ígneas intrudidas e extrudidas da fase diastrófica ocorrida durante o Mesozóico, que afetou principalmente as bacias do Acre e Solimões. Neste tempo, um mosaico de ambientes sedimentares, variando do fluvial ao marinho raso, foram estabelecidos nesta região, de acordo com o sistema de paleo-drenagem do Amazonas na direção E-W. Os depósitos sedimentares resultantes são compostos predominantemente por arenitos médios a grossos intercalados principalmente com argilitos e em menor proporção ocorrem intercalações com conglomerados e siltitos. Os depósitos Cretáceos ocorrem desde o Arco de Purus até o cinturão de falhas subandinas entre cerca de 250 a 750 m de profundidade e variam entre 250 m a 700 m de espessura (média 300 m). O Cretáceo foi um período de relativa

estabilidade tectônica até que devido ao deslocamento para Oeste da Placa Tectônica Sul Americana o processo de subducção da margem pacífica desta Placa (re)ativou o Arco de Iquitos.

Durante o Mioceno, quando a elevação da Cordilheira Andina finalmente interceptou o sistema de drenagem do paleo-Rio Amazonas, instalou-se um grande sistema lagunar na região entre a proto-Cordilheira Andina e o Arco de Purus (Lago Pebas). O Arco de Purus atuou como uma barreira geológica à sedimentação Terciária para o Leste. Neste ambiente fluvial meandrante-lagunar foram depositados os sedimentos predominantemente argilosos das Formações Terciárias. Em geral, os depósitos Terciários mostram uma sequência gradacional, onde as camadas superiores possuem um caráter areno-argiloso e as sequências basais são quase que essencialmente argilosas.

Na porção estudada os depósitos Quaternários são muito similares às sequências Terciárias superiores. Baseado nas similaridades das características hidrogeológicas resultantes das similaridades litológicas citadas anteriormente, os depósitos Quaternários e Terciários superiores foram considerados como uma só unidade.

Resultados

As sequências Cretáceas e Terciárias, além de serem internamente litologicamente muito semelhantes e muito distintas entre elas, são contínuas ao longo da porção estudada.

A continuidade das sequências Cretáceas é dada através das Formações Cretáceas das bacias estudadas.

Até então ainda não havia sido definida uma subunidade hidrogeoestratigráfica para o Cretáceo do WSAA. Esta nova subunidade recebeu o nome de Sistema Aquífero Tikuna, em homenagem aos indígenas que habitam às margens do Rio Solimões.

A subunidade hidrogeoestratigráfica Terciária do WSAA, similarmente ao que ocorre com a subunidade Cretácea, é formada por um conjunto de Formações Terciárias. Uma vez que a maior proporção desta subunidade hidrogeoestratigráfica é formada pela Formação Solimões, decidiu-se manter a denominação de Sistema Aquífero Solimões (SAS).

As camadas superficiais do SAS são principalmente areno-argilosas, contrastando com suas camadas basais essencialmente argilosas. Esta constatação levou à subdivisão do SAS em um aquífero superior, o Aquífero Solimões, e em um aquitardo basal.

O SAS possui uma espessura média de 250 m, apesar de poder atingir até cerca de 2 km de espessura nas proximidades do cinturão de falhas subandinas. Nas proximidades do Arco de Purus esta camada vai adelgaçando para Leste até desaparecer.

A espessura média do Aquífero Solimões é de cerca de 50 m apesar de poder atingir até cerca de 150 m de espessura em alguns locais. O Aquífero Solimões é explotado em várias pequenas cidades da Amazônia Ocidental através de poços rasos, e alguns poucos poços mais profundos, tanto para uso residencial como industrial. Os níveis piezométricos deste aquífero são geralmente rasos, de alguns poucos metros a cerca de 20 m de profundidade, em média. Tanto instalações sanitárias inapropriadas como a disposição de resíduos sem controle são fontes para sua contaminação.

A água do Aquífero Solimões é do tipo Na–K–HCO3 e possui condutividade elétrica variando entre 38 e 180 µS/cm. O pH de suas águas pode variar de ácido na Bacia Solimões (mediana 5,8), a básico na Bacia Marañón (mediana 9). Para este aquífero foram encontradas concentrações de sílica variando entre 8 e 62 mg/L (mediana 40 mg/L) e concentrações de ferro total de 0,1 mg/L (mediana). A temperatura de suas águas fica ao redor de 28°C.

Dados piezométricos do Aquífero Solimões, juntamente com dados do nível d'água dos principais rios da região obtidos através de imagens SRTM 3-arc segundos foram usados como pontos de controle e permitiram a elaboração manual do mapa piezométrico regional do Aquífero Solimões (Figura 3). Isto foi possível pelo fato de que o Aquífero Solimões encontra-se muito bem conectado aos corpos de água superficiais.

Dados dos parâmetros hidráulicos para o Aquífero Solimões são muito escassos e indicam que sua condutividade hidráulica horizontal pode variar de valores negligenciáveis até cerca de 20 m/d.

As camadas do Sistema Aquífero Tikuna (SAT) variam entre cerca de 300 m e 700 m de espessura. Nas bacias subandinas as camadas do SAT estão associadas a reservatórios petrolíferos.

A porosidade total do SAT é de cerca de 0,20 e sua condutividade hidráulica horizontal varia entre 0,01 m/d a 1,7 m/d (média de 0,26 m/d) (Yinfu et al, 2010; Mathalone e Montoya, 1995).

Este sistema aquífero é explotado através de poços rasos nas regiões de seus

afloramentos, contudo não há evidências de sua utilização em outras áreas. O SAT contém água doce nas proximidades de seus afloramentos, porém nas regiões mais internas das Bacias Oriente, Ucayali, Marañón e Solimões é formado por água salobra a salina, eventualmente formando salmouras.

Os limites hidrogeológicos do WSAA são formados pelo Arco de Purus a Leste, pelas áreas cratônicas (Escudos das Guianas e Brasileiro) juntamente com divisórias de fluxo a Norte e Sul e pelo cinturão de falhas subandinas a Oeste (Figuras 1 e 3).

A elaboração do modelo de fluxo regional do WSAA (Figura 4) permitiu a visualização e integração gráfica das principais feições que controlam e influenciam no fluxo regional deste grande sistema aquífero. Tanto no modelo conceitual gráfico como no modelo numérico de fluxo elaborado o SAS é representado, do topo para a base, pelas duas primeiras camadas do modelo. A primeira refere-se ao Aquífero Solimões e a camada imediatamente abaixo deste é o aquitardo basal do SAS. O Aquífero Solimões está restrito aos primeiros 50 m do WSAA, é recarregado diretamente pela chuva e encontra-se intimamente conectado aos corpos de água superficiais.

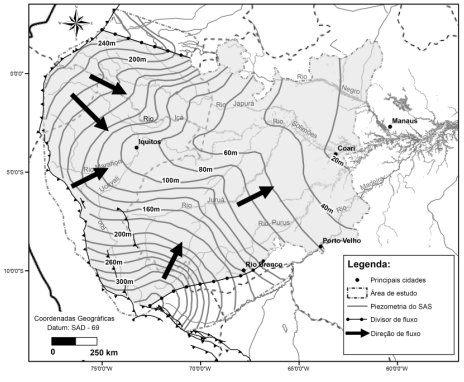
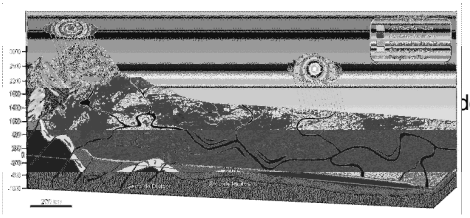


Figura 3. Mapa piezométrico do Aquífero Solimões.

O aquitardo basal do SAS confina o SAT subjacente em praticamente toda a sua extensão, exceto por duas áreas onde o SAT aflora: porções do cinturão de falhas subandinas e da Serra do Divisor e algumas porções vizinhas a esta Serra. As zonas de recarga do SAT estão localizadas em seus afloramentos que ocorrem em altitudes de cerca de 1000 m snmm na região do cinturão de falhas subandinas. Na Serra do Divisor, a cerca de 300 m de altitude, este sistema aquífero também é aflorante, contudo provavelmente trata-se de uma zona de descarga parcial, como sugere a antiga sondagem surgente chamada pelos locais de "Buraco da Central". Nas proximidades deste local algumas fontes também são encontradas. Estas podem estar atuando também como pontos de descarga local, mas o que parece mais provável é que atuem como pontos de descarga do aquífero mais profundo através de fraturas.

A principal zona de descarga do WSAA está localizada no Arco de Purus, onde o SAT surge em superfície e se converte no aquífero livre Alter do Chão.

Utilizando um modelo numérico de fluxo simplificado composto por 3 camadas com células regulares de 10 km x 10 km, de diferenças finitas e densidade homogênea (água doce), foi possível a simulação preliminar de várias hipóteses de funcionamento do WSAA (Figura 5). Como resultado, as principais feições com relação às zonas de recarga e descarga e direção de fluxo puderam ser analisadas. Os resultados obtidos se ajustam bem ao modelo conceitual proposto. Contudo, alguns aspectos novos foram indicados através do modelo numérico de fluxo. Foi possível observar que o SAT é afetado pela existência de um divisor de fluxo parcial de direção quase N-S, localizado nas proximidades do Arco de Iquitos. Como consequência, o SAT é dividido em duas sub-bacias. A subbacia Oeste possui um padrão de fluxo radial que se inicia nas áreas de recarga localizadas no cinturão de falhas subandinas e termina nas zonas de descarga da Serra do Divisor. A subbacia Leste é maior do que a subbacia Oeste e sua direção de fluxo principal é W-E, iniciando nas zonas de recarga situadas nos extremos noroeste e sudoeste do cinturão de falhas subandinas e cuja principal área de descarga está localizada no Arco de Purus.



do Sistema Aq

Figura 4. Modelo hidrogeológico conceitual de fluxo no WSAA.

Conforme mostrado através do modelo numérico (Figura 5), o confinamento imposto

pelo aquitardo basal do SAS e as zonas de recarga topograficamente muito elevadas mantêm o nível piezométrico do SAT acima do SAS, o que gera um gradiente piezométrico ascendente a partir do SAT para o SAS e que, em algumas áreas, pode ser maior do que 100 m de diferença piezométrica. Registros de poços exploratórios de petróleo na região documentam estas notáveis condições de confinamento impostas ao SAT.

Discussão

Os resultados hidrogeológicos obtidos são preliminares. Eles são o que se pode obter razoavelmente a partir dos dados escassos e pobremente distribuídos de uma área muito grande, praticamente desabitada; contudo, utilizando de forma hábil os dados geológicos disponíveis, resultados preliminares importantes puderam ser alcançados. Desta forma, as principais contribuições aportadas se referem à compilação, análise e interpretação de dados públicos e alguns dados confidenciais aos quais se obteve acesso, através de permissão, e formulação de um modelo hidrogeológico conceitual validado através da modelagem numérica preliminar. Os resultados do modelo numérico foram apresentados de forma a auxiliar o modelo conceitual proposto, embora este primeiro não seja aqui desenvolvido. Este modelo é composto por um aquífero livre, um aquitardo (que funciona quase como um aquicludo) e um aquífero confinado, o qual é recarregado em alguns pontos da região subandina e descarga mais a Leste, na região do Arco de Purus.

O uso do nível d'água dos principais rios como pontos de controle para a elaboração do mapa piezométrico do aquífero livre Solimões é uma aproximação da superfície freática real, levando-se em consideração a boa conexão hidráulica rios-aquífero. Tal aproximação é mais realista quanto mais próximos estão os rios uns dos outros.

O modelo numérico resultante é muito sensível a mudanças nas condições de contorno e nos parâmetros hidráulicos, conforme discutido em Rosário (2011). Este fato indica a consistência dos resultados. Conforme mencionado, os primeiros resultados do modelo indicaram algumas anomalias com respeito ao que era esperado. Pesquisas complementares de dados confirmaram que tais anomalias eram devido a situações reais, contribuindo desta forma como uma validação indireta do modelo numérico. Os resultados do modelo numérico de fluxo regional foram muito importantes na definição da Serra do Divisor como uma área de descarga parcial do WSAA, na identificação de um divisor de fluxo parcial nas proximidades do Arco de Iquitos e na confirmação das condições de confinamento impostas pelo aquitardo basal do SAS sobre o SAT.

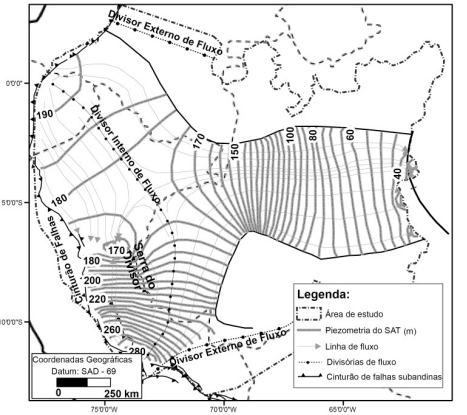


Figura 5. Resultado da simulação de fluxo no SAT através do modelo numérico de fluxo.

Um dos resultados mais pobres refere-se aos dados hidrogeoquímicos e à qualidade da água e não permitem a identificação da origem da salinidade da água do SAT.

Dados hidráulicos apontam para tempos de fluxo da água subterrânea no SAT de até ou inclusive superiores a 1 milhão de anos.

Conclusões

O presente trabalho é baseado em dados disponíveis os quais, embora algumas vezes escassos, outras vezes muito espalhados e outras, concentrados em pequenas áreas, permitiram a identificação dos limites hidrogeológicos do WSAA, a definição de suas subunidades regionais, de suas principais feições hidrogeológicas, de suas características hidrogeológicas básicas, incluindo suas características hidráulicas e hidroquímicas, assim como o padrão do sistema de fluxo regional do WSAA.

Dados provenientes da atividade exploratória de petróleo constituíram a maior parte dos dados geológicos e hidrogeológicos usados para interpretar e estimar as propriedades hidrogeológicas regionais do WSAA. A base de dados do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) coordenada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) também proveu dados importantes, principalmente sobre o Aquífero Solimões.

A continuidade e homogeneidade das sequências Terciárias e Cretáceas foram confirmadas tanto em escalas de bacia como em escala de poço. Este tipo de abordagem foi muito útil e proveu as principais evidências de que o WSAA é um sistema aquífero multicamada transfronteiriço formado por sequências sedimentares Cretáceas e Terciárias.

O fato das sequências Cretáceas (principalmente arenosas) e Terciárias (principalmente areno-argilosas e argilosas) serem muito distintas entre elas ajudou muito na separação destas duas subunidades durante as análises dos perfis litológicos e dos perfis geofísicos de poço. Além disso, tais distinções influenciaram diretamente no ponto de vista hidrogeológico.

A definição dos limites hidrogeológicos do WSAA foi auxiliada pela presença de 3 principais feições geológicas: os Escudos das Guianas e Brasileiro que definem a posição da maior extensão dos limites Norte e Sul do WSAA e o cinturão de falhas subandinas que define seu limite hidrogeológico Oeste.

Não obstante, a definição completa dos limites hidrogeológicos Norte e Sul somente ocorreu após a elaboração do mapa piezométrico do Aquífero Solimões, quando dois divisores de fluxo foram identificados, complementando e fechando os limites Norte e Sul já parcialmente definidos pelas regiões cratônicas. Baseado nos limites hidrogeológicos definidos para o WSAA, parece que o SAA é um dos maiores sistemas aquíferos do mundo, compreendendo uma área total de $2{,}7x10^6$ km^2. Os limites hidrogeológicos definidos para o WSAA coincidem regularmente bem com os contornos propostos em Margat (2007), resultando em uma área de $2{,}0x10^6$ km^2. O SAS cobre uma área similar à área total do WSAA e o TAS possui uma área menor, de $1{,}5x10^6$ km^2.

A descrição de uma nova subunidade do SAA, o Sistema Aquífero Tikuna, provê uma nova abordagem para a explicação de alguns aspectos do Aquífero Alter do Chão, a porção aflorante do SAT, explicando, por exemplo, a ocorrência de água salobra na cidade de Iranduba. Esta nova subunidade hidrogeoestratigráfica modifica, a partir deste momento, a idéia de que o SAA é composto somente pelos Aquíferos Solimões e Alter do Chão e também estende a área coberta pelo Aquífero Solimões e adiciona a definição do aquitardo do SAS.

A condutividade hidráulica e porosidade do SAT indicam que este é um bom reservatório de água e apesar de preenchido principalmente por água salobra a salina, que limita seu uso, pesquisas futuras podem ser desenvolvidas para identificar outros usos possíveis.

O aquífero Solimões parece conter água doce em toda a sua extensão. As condutividades hidráulicas e porosidades variáveis deste aquífero devem-se, provavelmente, ao retrabalhamento de seus depósitos pela água superficial. A água subterrânea flui regionalmente de Oeste para Leste, controlada pela topografia e pela rede hidrográfica, que interagem intimamente.

Embora os processos que atuam sobre o WSAA sejam mais complexos do que o que pode ser representado em um modelo conceitual regional, a elaboração de um modelo conceitual foi essencial para a integração e visualização dos dados, auxiliando no entendimento do sistema de fluxo como um todo. Os resultados do modelo numérico de fluxo foram valiosos na definição da Serra do Divisor como uma área de descarga, na identificação do divisor de fluxo existente nas proximidades do Arco de Iquitos e na confirmação das condições de confinamento impostas pelo aquitardo basal do SAS sobre o SAT

Este modelo conceitual de fluxo regional para o WSAA, embora tenha sido gerado a partir de exaustiva compilação e integração de dados em diversos formatos, escalas e temas, os autores estão cientes de suas limitações, uma vez que os dados são escassos e não estão homogeneamente distribuídos por toda a área de domínio. Mesmo assim, os resultados obtidos mostram boa concordância com as mais notáveis feições hidrogeológicas regionais da área e com os dados reais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS S/A pelo patrocínio desta pesquisa, à Universidade Politécnica da Catalunha pela orientação acadêmica e esforço no desenvolvimento deste projeto em suas instalações e pelo apoio técnico de seus pesquisadores (em parte apoiado pelo projeto MICINN CGL–2009–12910–C03–01 sobre procesos de recarga e descarga de acuiferos), e à Universidade Federal do Rio de Janeiro por aceitar e orientar este desenvolvimento.

Referências

Margat, J., 2007. Great aquifer systems in the world. In: Aquifer Systems Management: Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage. Chery, L. e de Marsily, G. (eds) p. 107-113.

Mathalone, J.M.P. e Montoya R., M., 1995. Petroleum geology of the sub-Andean basins of Peru, in A. J. Tankard, R. Suárez S. e H.J. Welsink, Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62, p. 423-444.

Puri, S. e Aureli, A., 2009. Atlas of transboundary aquifers. Global maps, regional cooperation and local inventories, UNESCO.

Rosário, F. F., 2011. O sistema aquífero cretáceo multicamada Tikuna: subunidade do sistema aquífero Amazonas. Tese do Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 185 p.

Sefelnars, A.M., 2007. Development of groundwater flow model for water resources management in the development areas of the western desert, Egypt. Dissertation Faculty of Natural Sciences III, Martin Luther University.

UNESCO, 2007. Sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas – Evaluación preliminar.

Vives, L., Rodríguez, L., Gómez, A., Cota, S.D.S., 2009. Avance del conocimiento del sistema acuífero Guarani. Modelo numérico regional. Aportes de La hidrogeologia al conocimiento de los recursos hídricos. p. 513-521.

Welsh, W.D., 2000. GABFLOW: A steady state groundwater flow model of the Great Artesian Basin. Bureau of Rural Sciences, Canberra.

Yinfu, X., Jihancheng, Yongdi, S., Ying, H. 2010. Petroleum geology and exploration potential of the Oriente-Marañón Basin. Petrol. Explor. Develop., v. 37, n.1 p. 51-56.

El Complejo Acuífero Profundo de Arauco, provincia de La Rioja

Esteban Tálamo[1], Federico Moya Ruíz[1], Rodolfo García[1], Verónica Rocha Fasola[1] y Francisco R. López[1]

[1] CONHIDRO S.R.L., Tomás Vergara 1556, (4700) San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca, Argentina.

Mail de contacto: conhidrocat@arnetbiz.com.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es dar a conocer el descubrimiento en la zona de la localidad de Arauco, departamento homónimo, provincia de La Rioja, Argentina, de un reservorio de agua subterránea profundo con gran importancia para el abastecimiento de agua potable como así también para el riego de plantaciones de olivos que se practican en la región. Este importante reservorio fue localizado a partir de estudios de prospección geofísica y por pozos de exploración y explotación que alcanzaron profundidades de hasta 440 metros. Las facies sedimentarias del Complejo Acuífero Arauco están conformadas por arenas gruesas a gravas muy gruesas, polimícticas y subyacen a un potente manto de arcillas plásticas. Se estima que las unidades sedimentarias profundas podrían corresponderse con las facies basales de la Formación Las Cumbres (Pliopleistocenas) que afloran en las inmediaciones de la ciudad de Aimogasta y los Bordos de Mervil.

Palabras clave: Arauco, Complejo Acuífero, La Rioja, Hidrogeología.

ABSTRACT

The aim of this paper is present the discovery of a deep groundwater reservoir in Arauco town area, homonymous department, in La Rioja province, this reservoir have a great importance for drinking water supply as well as for the olive plants irrigation. This significant reservoir was located after the realization of geophysical studies and construction of exploration and production wells which reached depths up to 440 meters. The sedimentary facies of the Complejo Acuífero Arauco, are made up by coarse sands and polymictic gravel that underlie below a very thick plastic clay layer. It is estimated that the deep of sedimentary units could correspond to the basal facies of Las Cumbres Formation (Pliopleistocenas) that outcrop near of the city of Aimogasta and Bordos of Mervil.

Keywords: Arauco, Complejo Acuífero, La Rioja, Hydrogeology.

Introducción

En el presente trabajo tiene por objetivo dar a conocer la existencia de un reservorio de agua subterránea profundo, descubierto mediante exploración geofísica y perforaciones exploratorias realizadas en el establecimiento olivícola Palas Atenea, situado a 11 kilómetros al este de la Ciudad de Aimogasta, Departamento Arauco, Provincia de La Rioja. Argentina. (**Figura 1**).

A consecuencia de los buenos resultados obtenidos (hidráulicos e hidroquímicos) en esta región, en los últimos años se realizaron al menos nueve perforaciones con objetivos profundos, encontrando en todos los casos las facies sedimentarias gravosas, que son definidas en este trabajo como Complejo Acuífero Profundo de Arauco (CAPA). Se ha optado por definirlo como un complejo, debido a que la cantidad de información disponible, no es suficiente como para determinar sus límites, sus características funcionales, zonas de recarga y descarga, su vínculo con el ciclo hidrológico actual, etc.

La zona de referencia del descubrimiento soporta una extensa actividad olivícola, regada casi en su totalidad por un sistema de goteo, que utiliza como fuente el agua subterránea captada por pozos cuyas profundidades se encuentran entre 150 y 200 metros. Las unidades acuíferas en este intervalo están compuestas por facies arenosas medianas a finas con abundantes intercalaciones de materiales finos (limos y arcillas) y "toscas" (limos con cemento calcáreo). Los rendimientos específicos alcanzados históricamente en estas obras de captación, oscilan entre 2 y 9 $m^3/h/m$, para caudales de bombeo de 150 a 220 m^3/h.

La rotura de varios pozos de la zona, por colapso de filtros, motivó la ejecución de estudios geofísicos que recomendaron explorar mediante perforaciones a mayores profundidades. Durante los trabajos de control

geológico de los primeros pozos exploratorios profundos, los autores determinaron que las probables causas de los colapsos de los pozos de la zona obedecían a que casi todos, ponían en producción los mencionados niveles de "toscas", que tienen una respuesta eléctrica similar a las arenas en los perfilajes eléctricos. Evidentemente, esta formación, al ser sometida a bombeos intensivos ha liberado las partículas de limo agregadas con cemento calcáreo, generando sistemas de cavernas en el entorno de la zona filtrante y de esta forma, al perder sustento, se derrumban, aplastando, deformando y rompiendo los filtros de los pozos.

En los nuevos pozos profundos, dirigidos por nuestro grupo de trabajos, solo se han puesto en producción aquellas facies clásticas, conformadas por arenas en la parte superficial y las gravas del CAPA, motivo del presente trabajo. Los resultados hidráulicos e hidroquímicos obtenidos bajo esta nueva concepción de diseño de los pozos, han permitido la obtención de agua de buena calidad para riego con rendimientos específicos variables entre 9,5 y 24,5 $m^3/h/m$, para caudales de bombeo de 260 a 290 m^3/h.

Descripción física del área

La zona de estudio se desarrolla en una superficie situada entre el río Salado (al norte), La Sierra de Velasco (al oeste), sierra de La Punta (al sur) y sierra de Mazán (al este). En esta región la precipitación media anual es de aproximadamente 150 mm (medidos en diferentes estaciones meteorológicas (Pinchas, Aminga, Anillaco, etc.); mientras que la evapotranspiración potencial anual podría alcanzar los 1600 o 1800 mm, con un marcado déficit hídrico (García, 1998).

Geológicamente, la comarca estudiada pertenece a la Provincia Geológica Sierras Pampeanas Noroccidentales, limitada por bloques de basamento cristalino elevados por fallas inversas, que han generado depresiones que luego fueron rellenadas por sedimentos neógenos.

Las rocas del basamento cristalino de las sierras de Mazán son granitos, granitos migmatíticos y migmatitas. La sierra de Velasco contiene rocas graníticas al oeste, de edad Paleozoica Inferior y una faja milonítica al este, de edad Proterozoica. (Toselli et al., 2005). (**Figura 1**).

El Neógeno, está representado por la Formación Sálicas (Sosic, 1973) de edad Mioceno Superior - Plioceno y una potente secuencia Plio/Pleistocena conocida como Formación Las Cumbres. Estas formaciones sufrieron posteriormente el alcance de la tectónica moderna, encontrándose pequeños afloramientos de los mismos en los Bordos de Arauco, Bordos de Updinango, Bordos de Talacán, Cerro Colorado y en las inmediaciones de Santa Teresita, rodeando los afloramientos de la Sierra de Mazán. Existen también importantes secuencias holocenas y recientes, representadas por depósitos de conos aluviales, fluviales, planicies aluviales, eólicos y de barreales.

Litología del Neógeno

Se describe brevemente la composición litológica de las formaciones del Neógeno, por su implicancia hidrogeológica y porque podría explicar la presencia del Complejo Acuífero Profundo de Arauco, descubierto mediante perforaciones profundas.

Las sedimentitas terciarias de la Formación Sálicas, están conformadas por una arenisca de grano muy fino, en partes limosa y limolitas pardo rojiza a pardo amarillenta, friables, yesíferas. En algunos sectores se observa una pequeña capa de arenisca gruesa a conglomerádica, con rodados del basamento cristalino (Socic, 1973). Mediante discordancia, se disponen los sedimentos cuaternarios (Pleistoceno) conformados por conglomerados poco consolidados de rocas graníticas, migmatitas y cuarzo, aglutinadas por una matriz de arena gruesa a conglomerádica, donde se intercalan pequeños bancos de arenas y limos. Estos depósitos podrían ser equivalentes a la Formación Las Cumbres (Socic, 1973).

Los afloramientos de la Formación Las Cumbres existentes en el Cerro Colorado, a la latitud de la localidad de Villa Mervil, se inician con conglomerados finos a medianos, asignados a canales fluviales labrados sobre el techo de la Formación Sálicas (Bossi et al., 2007). Bossi menciona también que estos conglomerados no superan los 30 metros de espesor y que el resto de las unidades superiores, está dominado por cuerpos macizos de limos pardos acompañados por calcretos nodulares y finas venillas de calcita. La secuencia conglomerádica basal de la Formación Las Cumbres, posee un gran parecido con las gravas muestreadas en los pozos profundos perforados en la zona, y que conforman el CAPA.

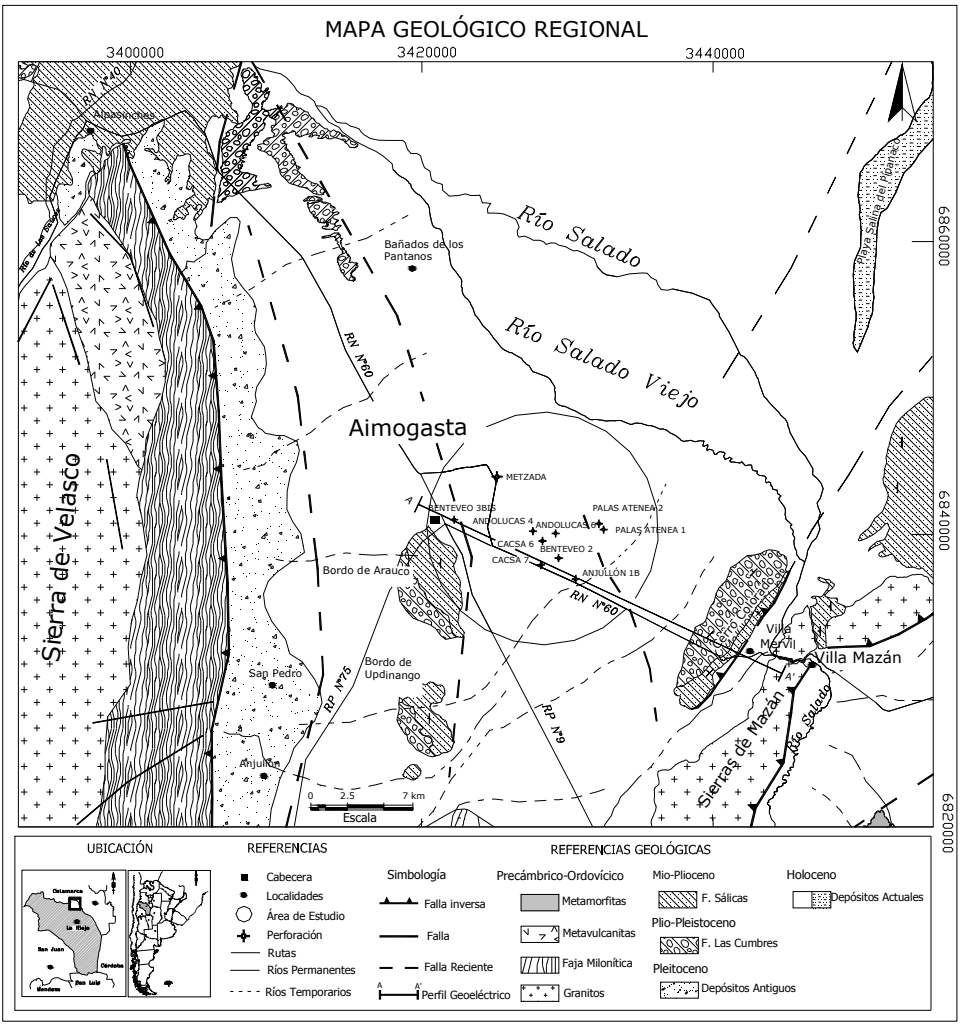


Figura 1. Mapa geológico y de ubicación de la zona de estudio.

Perfil geofísico y Correlación de electrofacies

A Los fines de comprender la disposición de las facies gravosas que componen el CAPA, se confeccionó un perfil geológico/geoeléctrico que muestra las variaciones faciales en un corte de rumbo general NO – SE, que incluye información brindada por algunos de los pozos profundos realizados en la zona.

Como puede observarse en la **Figura 5**, existe una Unidad Conductiva inferior, interpretada como la presencia de la Formación Sálicas (Plioceno). Suprayaciendo a ésta, se detecta una Unidad Semi Conductiva representando a los depósitos Plio/Pleistocenos de la Formación Las Cumbres. Por último se encuentra una Unidad Resistiva a Semiresistiva, que agrupa a facies Holocenas y Recientes.

En el mismo perfil puede observarse el estilo estructural que podría afectar al conjunto y explicar la presencia de los conglomerados profundos, que luego afloran en Villa Mervil.

En la **Tabla 1** se listan los pozos que interceptaron los niveles gravosos, la profundidad de exploración alcanzada en cada caso y el techo y base de los niveles conglomerádicos encontrados.

Tabla 1. Profundidades a las que se detectaron las gravas profundas

Perforación	Profundidad Exploración (m)	Techo y base de secuencia de gravas
Metzada 1	440	370/432
Andolucas 4	407	334/404*
Andolucas 6	408	305/382
CACSA 6	400	355/400*
CACSA 7	406	357/404
Palas Atenea 1	394	237/358
Palas Atenea 2	375	237/375
El Benteveo 2	412	295/385
Anjullón B 1	392	256/374

(*) Probablemente no se alcanzó la base.

La Potencia de las facies gravosas que componen el CAPA, en aquellos pozos donde se presume que fueron atravesadas en su totalidad, alcanza un promedio de 117 metros. Podría existir una disminución del espesor en sentido SE-NO y también E-O.

Para poder apreciar el gran contraste existente entre las facies Holocenas y las gravas de la Formación Las Cumbres, se presenta un ejemplo gráfico del Pozo Palas Atenea 1 (CONHIDRO S.R.L., 2004), con su correspondiente descripción litológica, incluyendo las curvas de Resistividad Normal Corta y Normal Larga del electroperfilaje y su diseño constructivo **(Figura 6)**. En la **Figura 7**, se muestra un corte transversal logrado mediante la correlación de estas facies gruesas, utilizando la información de las perforaciones en una línea de rumbo general NO-SE.

Características Hidráulicas e Hidroquímicas del CAPA

Desde un punto de vista hidráulico, al no existir pozos de observación, lamentablemente no se pudieron establecer los parámetros fundamentales como Coeficiente de Almacenamiento, Transmisividad y Permeabilidad del CAPA. Solo pueden mencionarse algunos valores de Transmisividad, estimados durante los ensayos de recuperación, luego de las pruebas de bombeo, que oscilan entre 1039 y 666 m^2/día (Conhidro S.R.L.).

El CAPA conformaría un acuífero confinado que podría estar fuertemente controlado por el sistema de fallas que afecta a la región.

En la **Tabla 2**, se muestran los niveles estáticos (obtenidos de los legajos originales) con el año de la medición y los valores de caudal ensayado y caudal específico logrado en cada caso.

Si bien no hay herramientas ni información suficiente como para establecer el vínculo entre los acuíferos superiores (explotados históricamente) y los profundos (CAPA), puede señalarse que no existirían grandes diferencias piezométricas.

Mediciones de control realizadas en algunas fincas, permiten afirmar que se observan grandes descensos anuales en los niveles estáticos, tanto de los pozos antiguos (que producen de niveles superiores) como de aquellos que pusieron en producción el denominado CAPA.

Tabla 2. Caudales específicos

Perforación	Q (m^3/h)/ qe (m^3/h/m)	Nivel estático (m) /año
Metzada 1	271/5.23	39.88/2007
Andolucas 4	265/9.5	41.32/2009
Andolucas 6	239/9.45	27.89/2009
CACSA 6	261/9.45	37.12/2004
CACSA 7	257/10.82	54.35/2010
Palas Atenea 1	288/14.62	15.86/2004
Palas Atenea 2	268/14.29	12.65/2004
El Benteveo 2	272/24.46	51.03/2010
Anjullón B 1	254/14.31	43.95/2006

Geoquímicamente, las aguas obtenidas en los pozos profundos, se clasifican como cloruradas y/o sulfatadas y/o bicarbonatadas sódicas, a excepción del pozo de Metzada, que es definidamente bicarbonatada sódica, probablemente por la mezcla con niveles superiores o bien, por algún error analítico. **(Figura 2)**.

Las aguas de los pozos que captan el CAPA, poseen una buena aptitud para uso agrícola siendo el 100 % de las muestras obtenidas, clasificadas como C2-S1, indicando un Moderado Peligro de Salinidad y un Bajo Riesgo de Alcalinidad o Sodicidad.

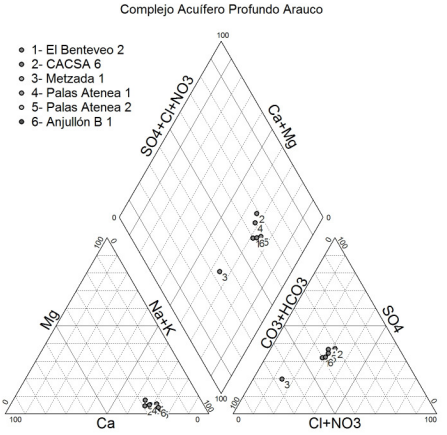


Figura 2. Clasificación de las aguas del CAPA en un diagrama de Piper.

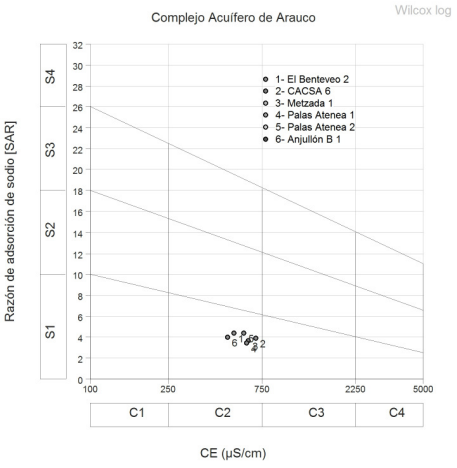


Figura 3. Clasificación de las aguas del CAPA según Wilcox.

Modelo Conceptual del CAPA

Resulta complicado establecer un modelo conceptual del Complejo Acuífero Profundo de Arauco, principalmente porque la información disponible, en algunos casos, proviene de la mezcla de los acuíferos superiores y los del CAPA, ya que se han colocado filtros en niveles permeables de ambas unidades. Además no existen datos suficientes que permitan observar la evolución de los niveles piezométricos de la zona en la última década. Nuestro grupo de trabajo ha realizado un monitoreo hidráulico en finca CACSA, donde se han podido medir descensos en la piezometría, que superan, en algunos casos los 2.6 metros por año (CONHIDRO, 2011)..

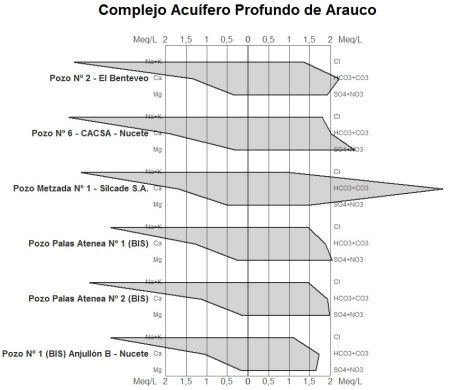


Figura 4. Diagramas de Stiff de las aguas del CAPA.

En el caso particular de esa finca y por contar con datos de niveles piezométricos instantáneos, se pudo determinar que la dirección de flujo del agua subterránea es de Sudoeste a Noreste. Obviamente, esta piezometría surge de niveles estáticos combinados, medidos luego de un tiempo de 24 horas de inactividad en los pozos (CONHIDRO S.R.L., 2011).

Existe una subdivisión de cuencas subterráneas propuestas por el Centro Regional de Aguas Subterráneas (Sánchez, 1995), donde se define la Subcuenca de La Costa (entre la Sierra de Velasco y la falla que eleva la sierra de La Punta y los Bordos de Updinango y Arauco) y la Subcuenca Oriental, entre la falla antes mencionada y la Sierra de Mazán.

El descubrimiento del CAPA se restringe en este trabajo a la Subcuenca Oriental, siendo la posible zona de recarga, el agua proveniente de la Subcuenca de La Costa (tanto superficialmente como por trasvase subterráneo) y por infiltración directa del río Salado o Colorado en las inmediaciones de Bañado de Los Pantanos. A esta recarga, se puede agregar el aporte que proviene de las sedimentitas neógenas, que podrían tener una conexión hidráulica, sobre todo cuando se las vincula mediante las perforaciones profundas y por fallas.

La zona de descarga sería probablemente la planicie aluvial del sistema del río Salado, sobre todo su viejo cauce, en las proximidades de los paraje de La Chilca y Santa Teresita.

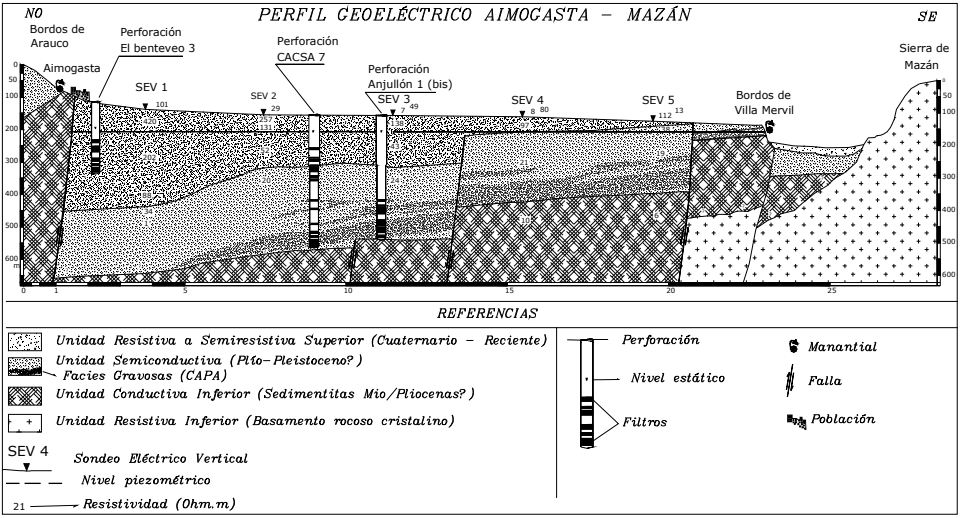


Figura 5. Perfil geoeléctrico geológico A-A'.

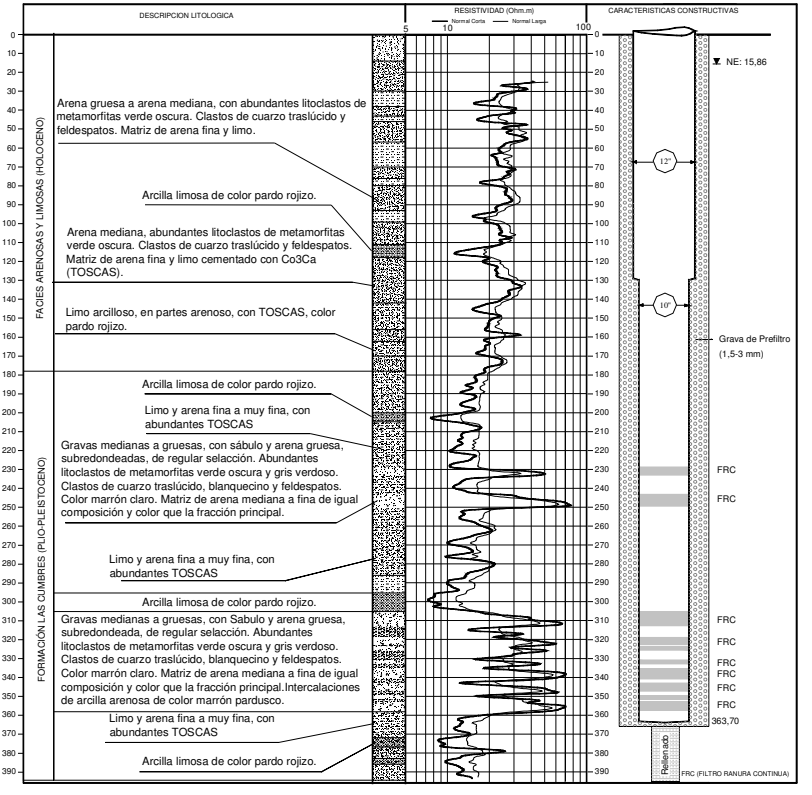


Figura 6. Perfil integrado del Pozo profundo Palas Atenea 1.

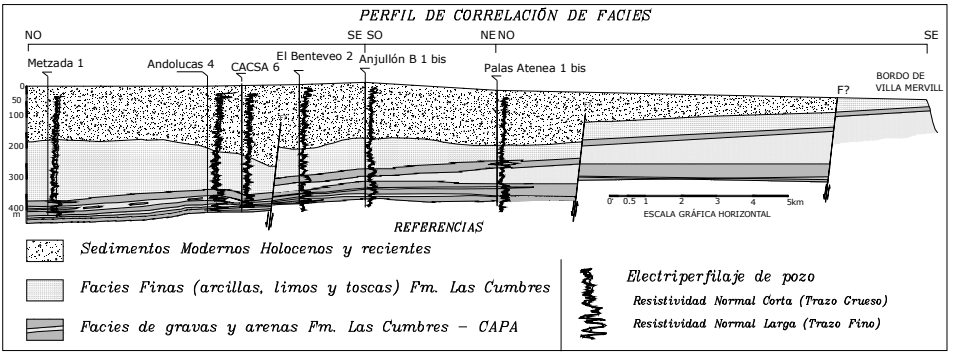


Figura 7. Perfil de correlación de facies y perfilajes eléctricos de pozos.

Conclusiones

Se define en este trabajo el Complejo Acuífero Profundo de Arauco (CAPA), integrado por facies de gravas y arenas gruesas polimícticas encontradas a profundidades variables entre 237 y 370 metros, en todas las perforaciones profundas realizadas en un área aproximada de 64 km^2.

Estos conglomerados profundos, podrían representar la base de la Formación Las Cumbres, de edad Plio/Pleistocena, la cual es elevada sucesivamente en bloques, por fallas inversas, hasta aflorar en el Cerro Colorado y Villa Mervil.

El comportamiento hidráulico de los pozos que han puesto en producción el CAPA de manera exclusiva, o bien combinando estas facies con niveles acuíferos arenosos superiores, ha permitido duplicar y hasta triplicar los rendimientos específicos que existían hasta el momento en la zona. El agua obtenida posee una buena calidad para ser utilizada en el riego de plantaciones (siendo en este caso, exclusivamente para el riego de olivares, bajo un sistema presurizado de goteo).

Se considera que en el futuro, deberían realizarse estudios isotópicos que permitan determinar el vínculo o interrelación entre las aguas captadas en los pozos que producen de los acuíferos arenosos superiores y aquellas provenientes de las gravas y conglomerados del CAPA.

Se destaca la necesidad de instalar una red de monitoreo que permita definir una piezometría regional. Sería conveniente confeccionar modelos numéricos que permitan la realización de balances de agua actuales y futuros, en virtud del uso intensivo del agua subterránea que existe en la comarca.

Agradecimientos

Se agradece al Geólogo Rubén Ottonello por brindar información hidrogeológica local. Al Dr. Sergio Andrés Bea, del Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff”, por sus observaciones en aspectos hidroquímicos.

Referencias

Bossi G.E.; Georgieff S.M. y Vides, M. E. 2007. Arquitectura y paleoambientes de los depósitos fluviales gravosos de la Formación Las Cumbres (Neógeno), en Villa Mervil, La Rioja, Argentina. Latin A merican Journal of Sedimentology and Basin Analysis, Vol. 14 (1) 53-57.

Bossi G.E.; Georgieff S.M., Muruaga C.M., Ibáñez L.M. y Sanuaga J.G. 2009. Los conglomerados sintectónicos de la Formación Las Cumbres (Plio-Pleistoceno), Sierras Pampeanas de La Rioja y Catamarca, Argentina. Andean Geology. Revista Geológica de Chile. 36 (2) 172-196.

CONHIDRO S.R.L. 2004. Informe Técnico Dirección Técnica Pozo Palas Atenea N° 1 (bis), Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Inédito.

CONHIDRO S.R.L. 2004. Informe Técnico Dirección Técnica Pozo Palas Atenea N° 2 (bis), Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Inédito.

CONHIDRO S.R.L. 2005. Informe Técnico Dirección Técnica Pozo CACSA 6 (bis), Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Inédito.

CONHIDRO S.R.L. 2006. Informe Técnico Dirección Técnica Pozo Agropecuaria Anjullón B N°1 (bis), Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Inédito.
CONHIDRO S.R.L. 2006. Informe Técnico Estudio Geoeléctrico Finca SILCADE S.A., Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Inédito.
CONHIDRO S.R.L. 2007. Informe Técnico Dirección Técnica Pozo Metzada 1 – Silcade S.A., Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Inédito.
CONHIDRO S.R.L. 2009. Informe Técnico Inspección Técnica Pozo Andolucas N°6 – Andolucas S.A., Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Inédito.
CONHIDRO S.R.L. 2009. Informe Técnico Inspección Técnica Pozo Andolucas N°4 – Andolucas S.A., Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Inédito.
CONHIDRO S.R.L. 2010. Informe Técnico Dirección Técnica Pozo El Benteveo N°2 – Agroaceitunera S.A., Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Inédito.
CONHIDRO S.R.L. 2010. Informe Técnico Electroperfilaje Pozo N°7 CACSA, Departamento Arauco, provincia de La Rioja. Industrias Metalúrgicas Ferrer Hermanos S.A.. Inédito.
CONHIDRO S.R.L. 20110. Informe Técnico Monitoreo de Pozos en Finca CACSA, Departamento Arauco, provincia de La Rioja.. Inédito.
García, R.F. 1998. Estudio de identificación y evaluación de fuentes de agua en Bañado de Los Pantanos, Departamento Arauco, Provincia de La Rioja. Consejo Federal de Inversiones, Programa Desarrollo de Pequeñas Comunidades.
Sánchez V., Gianni R., Di Chiacchio J, Victorio J., Pellegrino J., Mercado N. y Guimaraes R. 1995. Evaluación Hidrogeológica General del Área Colonias Machigasta – Bañado de los Pantanos, La Rioja. IT CRAS N° 166 – San Juan.
Sosic M.V.J. 1973 – Descripción Geológica de la Hoja 14 e, Salar de Pipanaco, Provincias de Catamarca y La Rioja. Servicio Nacional Minero Geológico – Subsecretaría de Minería de La Nación.
Toselli, .A.J., Rossi J. N., Báez M., Grosse P., López J.P. y Bellos L. 2005. Las rocas graníticas y metamórficas de la sierra de Velasco. INSUGEO Serie de Correlación Geológica, 19: 211-220.

Acuíferos terciarios y cuaternarios. Provincia de Entre Ríos. República Argentina

María Santi[1], Guillermo Bianchi[2] y Graciela Rezzónico[3]

[1] División Aguas Subterráneas, Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos, Córdoba 641, (3100) Paraná, Entre Ríos, Argentina.
[2] Facultad de Ingeniería (UNLP), Calle 1 y 47, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, Argentina.
[3] Consultoría en Ingeniería Hidráulica y Ambiente, Boulevard Moreno 265, (3100) Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Mail de contacto: geologamariasanti@gmail.com

RESUMEN

Entre Ríos se sitúa en el borde sur de la cuenca Chaco-Paranaense, la que tiene desarrollos someros hacia el sureste de la provincia y profundizaciones hacia el oeste y noroeste. La cuenca sedimentaria traspasa los límites provinciales y nacionales. Tipificada como de intraplaca y no vinculada a procesos de subducción, alberga sedimentitas continentales y marinas de edades comprendidas entre el Paleozoico Medio y el Cuaternario. Las Formaciones acuíferas terciarias y cuaternarias, objeto del presente trabajo, son cuatro: Formación Paraná (Bravard, 1858) (Mioceno Medio a Superior), formada por depósitos de origen continental y marino. Es un acuífero semiconfinado. Formación Ituzaingó (De Alba, 1953) (Plioceno Medio a Superior), constituida por depósitos fluviales del río Paraná. Es un acuífero semiconfinado. Formación Salto Chico (Rimoldi, 1963) (Pleistoceno Inferior) y Formación El Palmar (Iriondo, 1980) (Holoceno), son depósitos fluviales del río Uruguay. Salto Chico es un acuífero semiconfinado y El Palmar, un acuífero libre.
Palabras clave: Entre Ríos, Agua subterránea, Acuífero Ituzaingó, Acuífero Salto Chico.

ABSTRACT

Entre Ríos is situated on the southern edge of the Chaco-Paraná Basin, which has shallow developments to the southeast of the province and deeper stratigraphies to the west and northwest. The sedimentary basin crosses state and national boundaries. Classified as intraplate and not linked subduction processes, with continental and marine sedimentary hosts aged Middle Paleozoic and Quaternary. The tertiary and quaternary aquifer formations subject of this work, are four: Paraná Formation (Bravard, 1858) (Middle to Upper Miocene), formed by deposits of continental and marine origin. It is a semiconfined aquifer. Ituzaingó Formation (De Alba, 1953) (Middle to Upper Pliocene), consisting of fluvial deposits of the Paraná River. It is a semiconfined aquifer. Salto Chico Formation (Rimoldi, 1963) (Pleistocene) and El Palmar Formation (Iriondo, 1980) (Holocene) are fluvial deposits Uruguay River. Salto Chico is a semiconfined aquifer and El Palmar, is an unconfined one.
Keywords: Entre Ríos, Groundwater, Ituzaingó aquifer, Salto Chico aquifer.

Introducción

El objeto del presente trabajo es la delimitación y distribución de las Formaciones acuíferas terciarias y cuaternarias explotadas en la provincia de Entre Ríos, para consumo humano, animal, uso industrial y riego.

La delimitación y distribución de las cuatro Formaciones involucradas, se definió a partir del análisis y procesamiento de información hidrogeológica de campo, geología de superficie y cortes litológicos de perforaciones aportados a la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos, por instituciones públicas y privadas. Los cuatro acuíferos, independientemente de sus características particulares, constituyen un sistema interconectado.

Ubicación

La Provincia de Entre Ríos, dentro de la República Argentina, forma parte de la Mesopotamia.

Se encuentra situada entre los 30º 09' y 34º 02´, de latitud sur y entre los 57º 48' y 60º 47´ de longitud oeste. Limita al norte con la provincia de Corrientes, al oeste con la provincia de Santa Fe; al sur con la provincia de Buenos Aires, y al este con la República Oriental del Uruguay. La superficie total es de 78.781 km². (Figura 1).

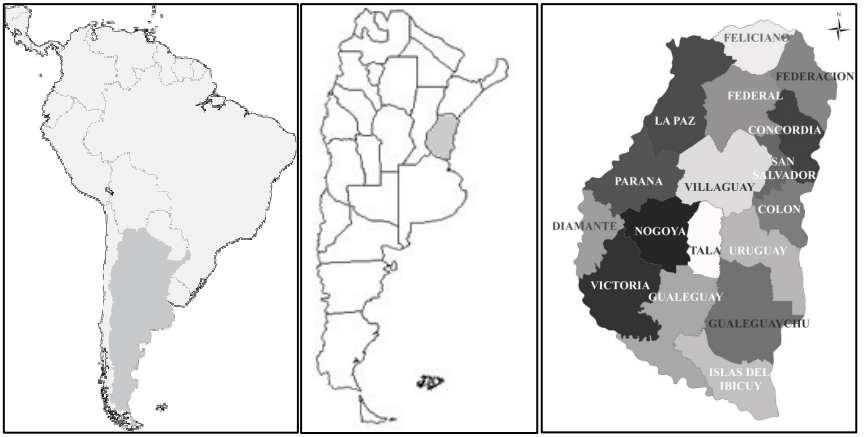


Figura 1. Ubicación de la Provincia de Entre Ríos.

Geomorfología

Entre Ríos es una llanura suavemente ondulada. Su topografía es ondulada a llana. La máxima altitud sobre el nivel del mar (s.n.m.) es de 119 m. La geomorfología está en función del sustrato, y hay una relación directa entre morfología, hidrología superficial e hidrología subterránea. Se distinguen 7 (siete) regiones geomorfológicas (Figura 2):

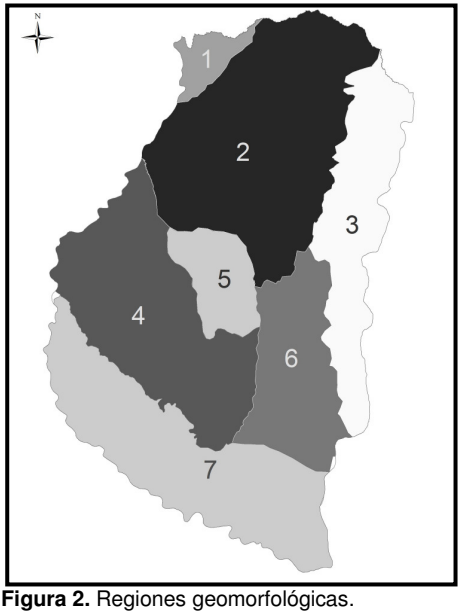


Figura 2. Regiones geomorfológicas.

1) Depósitos antiguos del río Paraná o Bañados o bajos del Yacaré: son geoformas fluviales, terrazas, pantanos y bañados y geoformas eólicas (dunas). 2) Superficie Feliciano-Federal: área plana, con morfología eólica, distribuida de manera irregular entre cotas IGN 65 a 70 m. Se destacan dentro del área, los "bañados de altura" en el sector nordeste a cota 75 m.s.n.m. Su morfología es plana, sin ningún tipo de pendiente. 3) Faja arenosa asociada al río Uruguay: son terrazas de acumulación dejadas por el río Uruguay y sedimentos de origen eólico 4) Lomadas loéssicas de Crespo: es el área más alta de la provincia (119 m IGN); por encima de la cota 80 m IGN, la zona está cubierta por una capa de loess de 2 a 4 m de espesor. Conforma un paisaje ondulado a suavemente ondulado 5) Área de Tala: es un área de avenamiento donde los cauces de los arroyos se desarrollan en varias direcciones, sin rumbos preferenciales 6) Colinas de Gualeguaychú: son colinas suavemente onduladas. Dentro de esta área, la parte noroeste es más elevada que la sudeste y 7) Complejo deltaico: constituido por varias unidades geológicas que pertenecen a fases de su evolución: fluvial, marina, estuárica y fluvio deltaica.

Suelos

Los suelos en el territorio firme de Entre Ríos, a nivel de orden son cuatro: Vertisoles (1), ocupan un 34,5 % del total provincial y se desarrollan sobre una planicie ondulada a muy suavemente ondulada. Los materiales originarios son limos calcáreos de origen palustre o lacustre. Las características vérticas se refieren a aquellas inherentes al alto

contenido de arcillas expandibles. Los Molisoles (2), ocupan un 20 % del área provincial, se encuentran en una planicie ondulada con pendientes de gradiente elevado; el material madre es loess. Los Alfisoles (3), equivalen al 11 % y se ubican en áreas altas planas a muy suavemente onduladas del centro y centro norte. Los Entisoles (4), corresponden a un 8% del territorio provincial, localizándose a lo largo de la margen derecha del río Uruguay en un ancho variable de 2 a 30 Km. Son suelos arenosos pardos y rojizos. Complejo deltaico (5). (Figura 3).

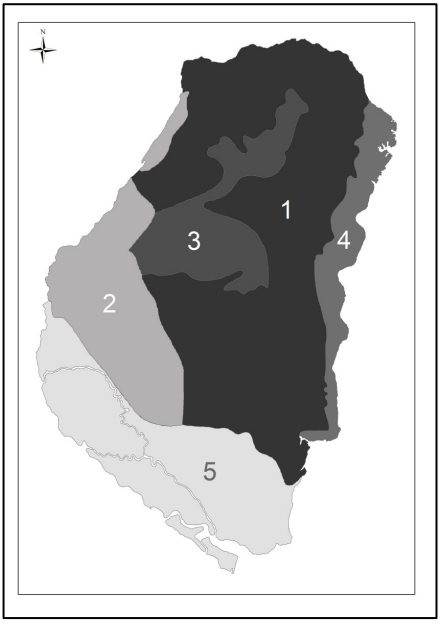


Figura 3. Suelos a nivel de orden (INTA, 1979).

Geología e hidrogeología

Entre Ríos pertenece a la Provincia geológica de la Mesopotamia (Leanza, 1958). Se sitúa en el borde sur de la cuenca Chaco-Paranaense, la que tiene desarrollos someros hacia el sureste de la provincia y profundizaciones hacia el oeste y noroeste. La cuenca sedimentaria traspasa los límites provinciales y se desarrolla en su mayor extensión en las provincias de Santa Fe, Chaco, Córdoba, Formosa, resto del Litoral y países vecinos. Tipificada como de intraplaca y no vinculada a procesos de subducción o de formación de geosinclinales, alberga sedimentitas continentales y marinas de edades comprendidas entre el Paleozoico Medio y el Cuaternario. Una potente formación efusiva basáltica de edad Cretácica (basaltos Serra Geral con intercalaciones de areniscas), vinculada al desmembramiento, a partir del Mesozoico, del continente Gondwana, es explotada, en algunas localidades de la Provincia, para recreación y turismo, con bajos caudales y salinidad media a alta. Debajo de la Formación Serra Geral, en el noreste provincial, se encuentra la Formación Misiones que aloja el denominado Acuífero Guaraní, explotado también para recreación y turismo, con grandes caudales y baja salinidad.

Las Formaciones acuíferas terciarias y cuaternarias, objeto del presente trabajo, son cuatro: Formación Paraná, Formación Ituzaingó, Formación Salto Chico y Formación El Palmar. Las tres primeras alojan acuíferos semiconfinados. La última, es un acuífero libre.

Con excepción del borde Este (margen derecha del río Uruguay) y el Delta, Entre Ríos se caracteriza por presentar una cubierta superior limo arcillosa (integrada en un 90% por la Formación Hernandarias (Pleistoceno Medio). En los sectores más elevados (Cota 119 m IGN, altitud máxima de Entre Ríos), ésta cubierta alcanza una potencia de 70 m. Los espesores menores (4 a 6 m), se encuentran en las proximidades de los valles de ríos y arroyos. Suprayacentes a Hernandarias, las Formaciones arenosas (algunas con elevado contenido de grava y canto rodado), alojan acuíferos semiconfinados. La Formación Paraná (Bravard, 1858), depositada en el Mioceno Medio a Superior es producto de una ingresión marina que se extendió desde el NE de la Patagonia cubriendo parte de las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Corrientes, Misiones y sectores en las Repúblicas Oriental del Uruguay y Paraguay. Está compuesta por arcilitas gris verdosas, oscuras, poco micáceas, algo calcáreas, compactas, que suelen contener yeso, restos carbonosos, intercalaciones tobáceas y abundante contenido fosilífero. Mediante análisis sedimentológicos y evidencias faunística, se determinó un ambiente de depositación nerítico proximal. Acumulaciones marinas someras y litorales distinguen a la Formación Paraná, en una faja de 70 Km. de ancho extendida a la vera del río homónimo, desde la ciudad de Corrientes hasta la ciudad de Victoria en Entre Ríos (Herbst *et al*., 1985). La Formación Paraná, acuífero semiconfinado, con una transmisividad dentro del rango 500 - 800 m²/día y con caudales de extracción de hasta 100 m³/h, es explotado en el suroeste de la provincia. La composición iónica del agua es bicarbonatada sódica dominante y cálcica subordinada en un 80% (Densidad de muestreo:

1 muestra cada 60 km²), el 20 % restante es clorurada y/o sulfatada sódica. Posee en algunos sectores, serias limitaciones en la calidad debido al exceso en las concentraciones de dureza, sulfatos, cloruros y sodio.

Formación Ituzaingó (De Alba, 1953), fue depositada por el río Paraná, entre el Plioceno Medio a Superior. Está compuesta por arenas ocráceas, blancas, rojizas, con intercalaciones pelíticas de tonos verdosos y grises, de composición mineralógica predominantemente cuarzosa con cantidades menores de feldespatos, micas, magnetita y otros máficos. Esta unidad presenta diversos grados de compactación, desde totalmente suelta a medianamente friable y hasta sumamente dura debido a la infiltración de óxidos e hidróxidos de hierro y sílice. El espesor máximo, fue registrado en Corrientes con 150 m, disminuyendo hacia el sur hasta llegar a 8-10 m en las cercanías de la ciudad de Paraná. El parámetro hidráulico más representativo del acuífero, es la transmisividad. Los valores dominantes, acusan una variabilidad dentro del rango 500 – 1.500 m²/día (valor medio regional de 1.000 m²/día). Los caudales de extracción no superan los 130 m³/h. En relación al grado de confinamiento, donde la cubierta superior (Formación Hernandarias, acuitardo), es de menor potencia (10 a 15 m) el coeficiente de almacenamiento posee valores del orden de 0,001, mientras que, para una potencia mayor de Hernandarias (50 m) es de 0,0002. Se explota en el sector noroeste de la provincia. La composición iónica del agua es bicarbonatada sódica dominante y cálcica subordinada (85 %) (1 muestra cada 60 km²), y un 15%, clorurada y/o sulfatada sódica. La calidad está limitada en algunos sectores por exceso de sulfatos y sodio.

Formación Paraná, si bien subyace a Ituzaingó, en parte de la provincia, ambas formaciones se contactan lateralmente, distribuyéndose en un rango hipsométrico de 37 a 40 m IGN. El conocimiento de este pasaje lateral, se dificulta por falta de información de subsuelo, fundamentalmente, en el centro oeste de la provincia. Este pasaje vertical y lateral, hidrogeológicamente es importante a la hora de determinar calidad y cantidad de agua. Mas allá de variaciones particulares, se verifica regionalmente que en ambos Acuíferos, existe recarga diferida proveniente del acuitardo suprayacente.

En la Figura 4 se muestra la traza de los perfiles hidrogeológicos. En las Figuras 5 y 6, (perfiles hidrogeológicos de rumbo SW-NE), se puede observar el contacto entre las Formaciones Paraná e Ituzaingó.

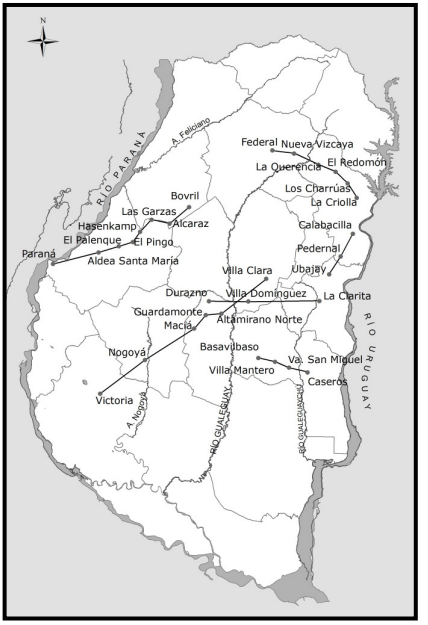


Figura 4 . Traza de perfiles hidrogeológicos.

La Formación Salto Chico (Pleistoceno Inferior) (Rimoldi, 1963), depositada por el río Uruguay, está compuesta por arenas cuarzosas gruesas, medianas y finas de color amarillo y rojo, arcillas verdes y estratos irregulares de rodados finos y gruesos. Posee un estrato de 0,5 a 2 m de arcilla arenosa blanquecina en la base. Se extiende en el subsuelo, en una franja irregular de varios km de ancho en el sector oriental de la provincia. El espesor máximo se estima en el orden de los 60 m. Es un acuífero semiconfinado explotado en el sector oriental de la provincia. Los cuatro acuíferos forman parte de un sistema interconectado. En la Figura 7 puede observarse a la izquierda del río Gualeguay, el acuífero Ituzaingó y hacia la derecha el acuífero Salto Chico. Denominado también “acuífero arrocero” por su intensivo uso en el riego de ese cultivo, en la época de riego, entre noviembre y marzo, los niveles hidráulicos descienden en algunos sectores debido a la extracción, la que varía entre 250 y 600 m³/h por pozo. Esta observación, fue realizada en el censo hidrogeológico de los años 1986/1987 y en censo hidrogeológico 2000/2001 (Auge e*t al.*, 2002). La situación mencionada, deja al acuífero expuesto a un grado de mayor vulnerabilidad, al pasar de su condición de semiconfinado a libre (Figuras 8 y 9). Los niveles se recuperan en épocas donde la demanda para riego es menor.

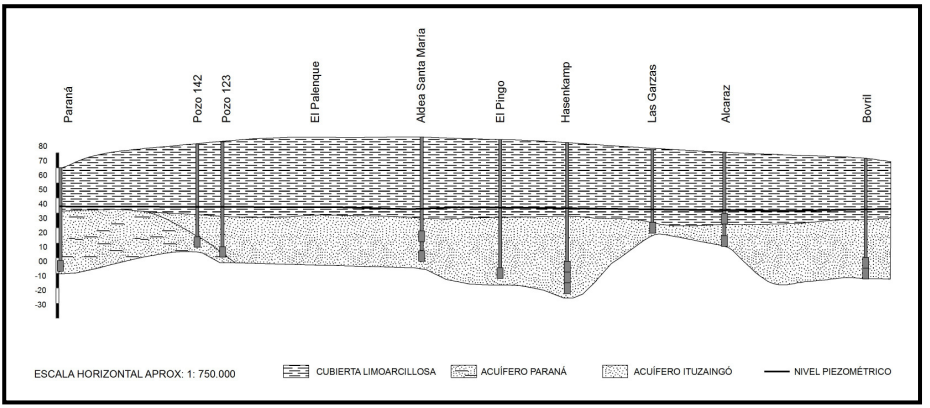


Figura 5. Perfil hidrogeológico Paraná-Bovril.

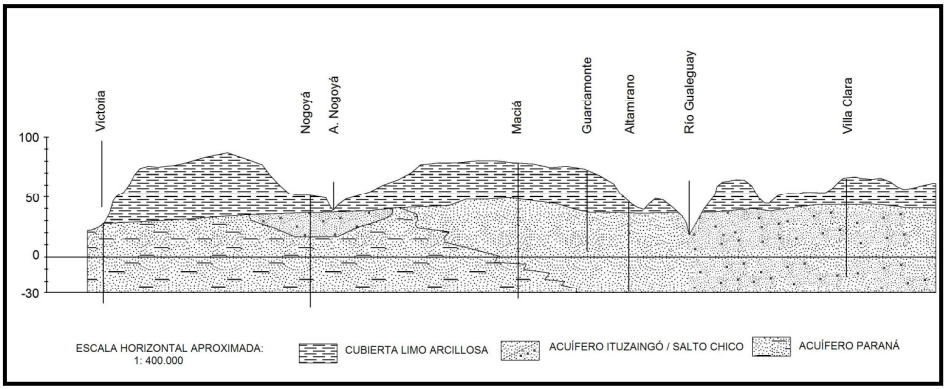


Figura 6. Perfil hidrogeológico Victoria-Villa Clara (Santi, 2002).

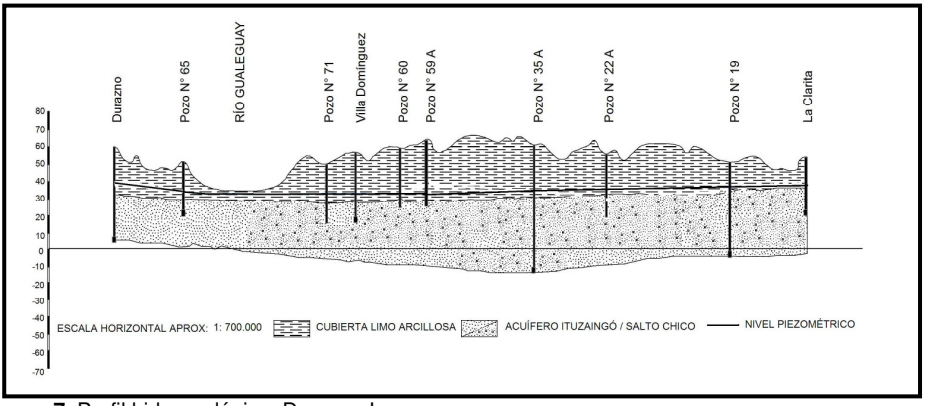


Figura 7. Perfil hidrogeológico Durazno-La Clarita.

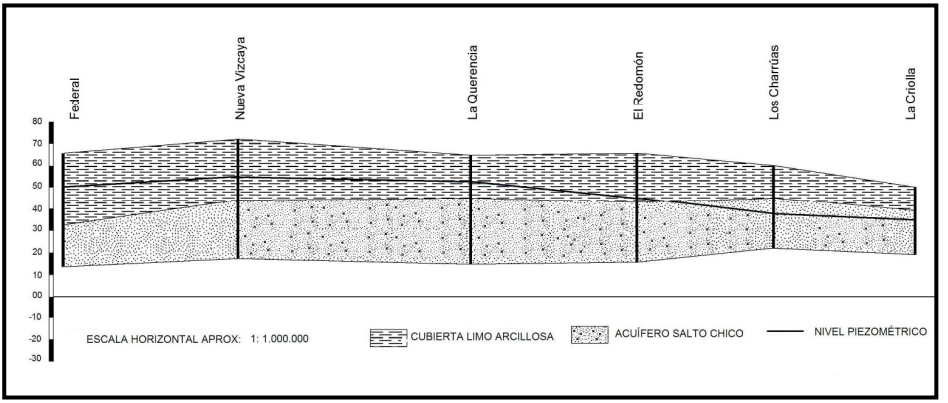


Figura 8. Perfil hidrogeológico Federal-La Criolla (Santi *et al*., 2009a).

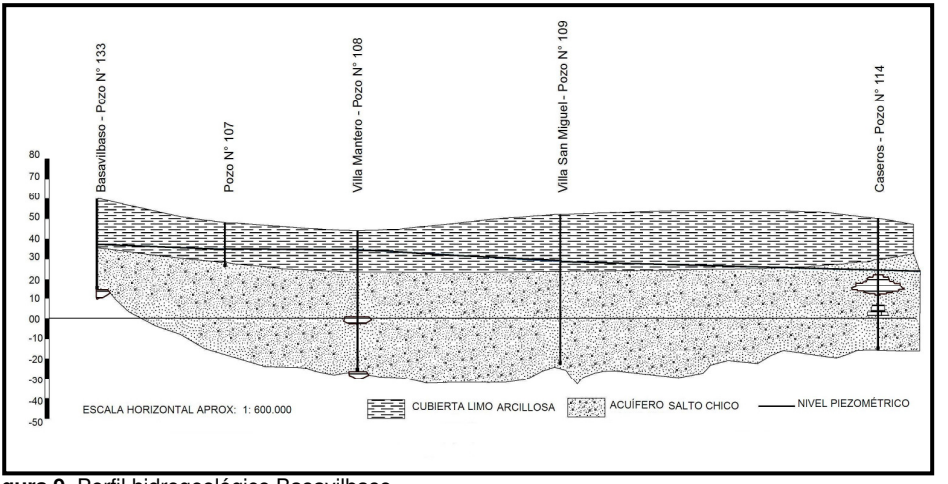


Figura 9. Perfil hidrogeológico Basavilbaso – Caseros (Santi *et al*., 2004).

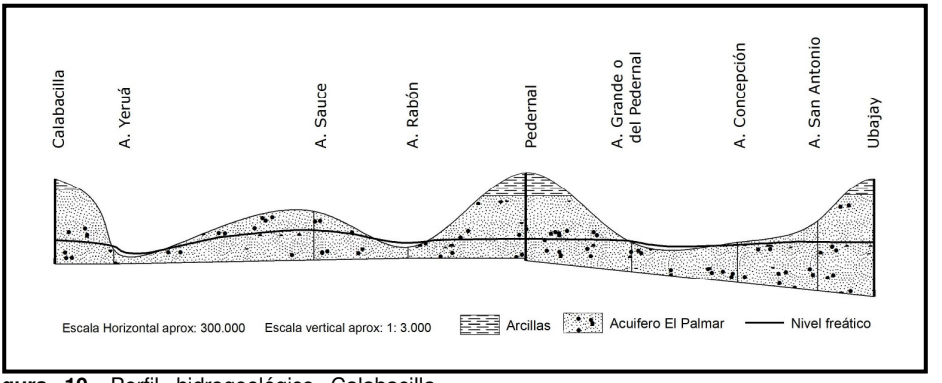


Figura 10. Perfil hidrogeológico Calabacilla-Ubajay (Santi, 1982).

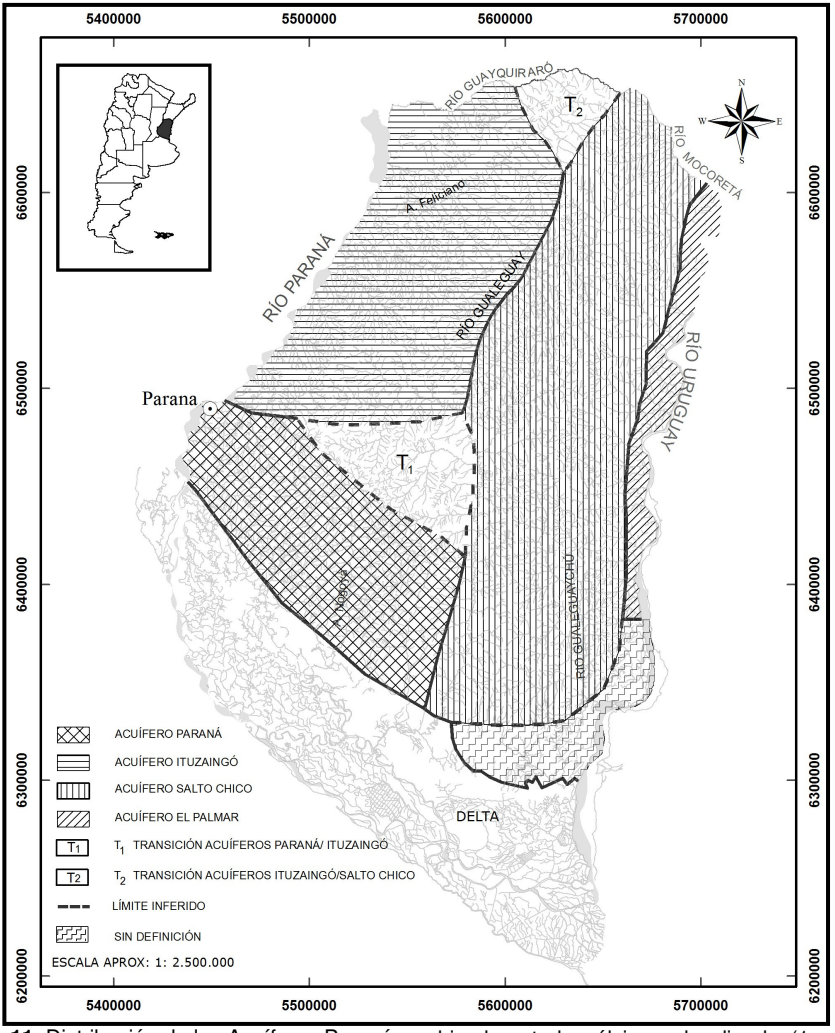


Figura 11. Distribución de los Acuíferos Paraná, Ituzaingó, Salto Chico y El Palmar (Santi *et al*., 2010, 2011)

La transmisividad dominante se estima dentro del rango 1500 - 2500 m²/día. El coeficiente de almacenamiento arroja valores medios entre 0,001 y 0,004. Se destaca un mayor confinamiento en los pozos que se utilizan para riego, donde la transmisividad media supera los 2.500 m²/día. El valor obtenido de la permeabilidad vertical, del orden de 10^{-3} cm/s, es alto, indicando que existe una fuerte recarga proveniente del acuitardo suprayacente (Formación Hernandarias). El agua, clasificada como bicarbonatada sódica dominante y bicarbonatada cálcica subordinada (1 muestra cada 60 km²), es de buena calidad para diversos usos entre los que se destaca el riego.

En el borde Este, la Formación El Palmar (Holoceno) (Iriondo, 1980), es una terraza depositada por el río Uruguay. Compuesta por arenas de cauce con grandes lentes de gravas y cantos rodados; presenta facies arenosas de inundación y de albardón. Forma una faja de 4 a 15 km. de ancho a lo largo de la margen derecha del río Uruguay aflorando desde la provincia de Corrientes hasta Concepción del Uruguay (Entre Ríos). Contiene un acuífero libre. (Figura 10). Los caudales de extracción no superan los 50 m³/h, la transmisividad dominante varia dentro del rango 500 - 1.500

m²/día, con valor medio regional de 1.000 m²/día. El embalse de Salto Grande favorece la recarga de los pozos en explotación ubicados en las proximidades del Lago. El agua es bicarbonatada sódica dominante y cálcica subordinada (1 muestra cada 60 km²).

Conclusiones

La delimitación y distribución de las Formaciones acuíferas terciarias y cuaternarias en Entre Ríos, se definió a partir del análisis y procesamiento de información hidrogeológica de campo, geología de superficie y cortes litológicos de perforaciones. Los acuíferos explotados para consumo humano, uso industrial y riego, son cuatro: Formación Paraná, acuífero semiconfinado, explotado en el suroeste de Entre Ríos; Formación Ituzaingó, acuífero semiconfinado explotado en el noroeste; y Formaciones Salto Chico y El Palmar, acuíferos semiconfinado y libre, respectivamente, explotados en la mitad oriental de la provincia. Cada acuífero se diferencia entre sí, por sus particularidades en lo referido a composición litológica, calidad y cantidad de agua, aunque regionalmente, forman un sistema interconectado.

Teniendo en cuenta la magnitud de la recopilación efectuada, el gran número de perforaciones analizadas y las descripciones estratigráficas realizadas por diversos autores, aún quedan vacíos de conocimiento en el pasaje vertical y en los contactos laterales de las Formaciones Paraná, Ituzaingó y Salto Chico. Existen dos áreas de transición, una, entre las Formaciones Paraná e Ituzaingó en el centro oeste, y otra, entre Ituzaingó y Salto Chico en el nor-noreste. Como los acuíferos están vinculados, este contacto lateral, como así también, el pasaje vertical de una Formación a otra, es importante al momento de diagnosticar calidad y cantidad de agua, ya que es lo que determina su aprovechamiento o limitación, para diversos usos. En el sudeste de la provincia, un sector de poca extensión, queda aún por definir hidrogeológicamente.

Referencias

Auge M. y Santi M. 2002. Disponibilidad de agua subterránea para la producción arrocera de la Provincia de Entre Ríos. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones. (CFI)*. Buenos Aires.

Bravard A. 1858. Monografía de los terrenos marinos terciarios de las cercanías del Paraná. *Imprenta del Registro Oficial. Paraná.* Reimpreso: Imprenta del Congreso de la Nación, 1995. Buenos Aires.

De Alba E. 1953. Geología del Alto Paraná en relación con los trabajos de derrocamiento entre Ituzaingó y Posadas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 8: 3, 129-161.

Herbst R. y Santa Cruz J. 1985. Mapa litoestratigráfico de la Provincia de Corrientes. *Revista D'Orbignyana*, Corrientes, 2: 1-51.

INTA. 1979. Suelos y Erosión de la Provincia de Entre Ríos. Tomo I y II. *Plan Mapa Suelos de la Provincia de Entre Ríos.* INTA Paraná.

Iriondo M. 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, 11: 125-141. Santa Fe.

Leanza A. 1958. Geología Regional. La Argentina Suma de Geografía. 1: 3, 217-349. Editorial Peuser. Buenos Aires.

Rimoldi H. 1963. Aprovechamiento del Río Uruguay en la zona de Salto Grande. Estudio geológico-geotectónico para la presa de compensación proyectada en el Paso Hervidero (provincia de Entre Ríos). *1as. Jornadas Geológicas Argentina*, Actas 2: 287-310, Buenos Aires.

Santi M. 1982. Estudio de acuíferos en zonas de riego. Departamentos Federación, Concordia, Colón, Uruguay. Provincia de Entre Ríos. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos*. Paraná, Entre Ríos.

Santi M. 2002.Estudio de agua subterránea en el sudoeste de la Provincia de Entre Ríos. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones. (CFI).* Buenos Aires.

Santi, M. y Bianchi G. 2004. Estudio de Aguas Subterráneas en la región sudeste de la Provincia de Entre Ríos. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones. (CFI).* Buenos Aires.

Santi, M. Bianchi G. y Rezzónico G. 2009a. Agua subterránea en el noreste de Entre Ríos. Actas *VI Congreso Argentino de Hidrogeología. Planificación y gestión de aguas subterráneas, 63-72.* Santa Rosa. La Pampa. Argentina.

Santi, M., Bianchi G. y Rezzónico G.2010. "Hidrogeología de la región noreste de Entre Ríos. República Argentina". *Revista Latino-Americana de Hidrogeología.* V 7: 33-45. Montevideo. República Oriental del Uruguay

Santi M. y Bianchi G. 2011. Mapa Hidrogeológico. Síntesis de la Provincia. Entre Ríos. Alcance I y II. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones. (CFI).* Buenos Aires.

Avance en el conocimiento hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en el sector sur

Leticia Rodríguez[1], Pablo Gamazo[2], Andrés Mira[3], Juan Nittmann[1,4], Julián Ramos[2], Luis Vives[3],Jorge Santa Cruz[5], Jorge de los Santos[6] y Gerardo Veroslavsky[7]

[1] Universidad Nacional del Litoral, Centro de Estudios Hidroambientales. Ciudad Universitaria CC 217 Ruta Nacional 168 Km 472.4, (3000) Santa Fe, Argentina.
[2] Universidad de la República, Regional Norte, Departamento del Agua, Uruguay.
[3] Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff", UNCPBA-CIC. Azul, Argentina.
[4] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina.
[5] Subsecretaría de Recursos Hídricos. Esmeralda 255, C1035ABE, CABA, Argentina.
[6] Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, IMFIA, Uruguay.
[7] Universidad de la República Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas. Uruguay.

Mail de contacto: Leticia@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

El carácter regional del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG) no permitió analizar en detalle sectores subregionales como el área sur del sistema. Los estudios de detalle en el sur se circunscribieron a las áreas piloto de Concordia/Salto en la frontera argentino-uruguaya y Rivera/Santana en la frontera brasileño-uruguaya.

En este trabajo se presentan los resultados del primer proyecto de investigación del Plan Nacional Federal de Aguas Subterráneas financiado por el Consejo Hídrico Federal (COHIFE) a través de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, que tiene el objetivo de avanzar en el conocimiento hidrogeológico en el sector sur del SAG. Por un lado, el trabajo presenta una recopilación de todos los avances logrados luego de la finalización del PSAG y, por el otro, plantea un modelo geológico e hidroquímico del área de estudio. Se verificó el modelo hidrogeoquímico válido para el SAG y se identificó una potencial zona de descarga regional.

Palabras clave: Sistema Acuífero Guaraní, Dominio sur, Geología, Hidroquímica e Hidrogeología

ABSTRACT

Because of the regional character of the Project for the Environmental Protection and Sustainable Developement of the Guaraní Aquifer System (PSAG), it was not possible to analyze sub-regional features of the system such as the Southern sector, in detail. Local studies in the south were limited to the pilot areas of Concordia/Salto in the border between Argentina and Uruguay, and Rivera/Santana in the border between Brasil and Uruguay.

This work presents the results of the first research project of the Plan Nacional Federal de Aguas Subterráneas financed by the Consejo Hídrico Federal (COHIFE) through Subsecretaría de Recursos Hídricos of Argentina, which has the objective the advancement of the hydrogeologic knowledge in the southern sector of the Guaraní Aquifer System-GAS. On the one hand, a compilation of all advances accomplished after completion of PSAG is presented and, on the other hand, a geological and a hidrogeochemical model of the study area are proposed. The regional GAS hidrogeochemical model was verified and a potential regional discharge area was identified.

Keywords: Guaraní Aquifer System, Southern domain, Geology, Hydrochemistry and Hydrogeology.

Introducción

Por su carácter regional, el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG, 2004-2009) abarcó todo el sistema y sólo cuatro sectores locales llamados pilotos, pero no analizó en detalle sectores subregionales como ser la zona sur del sistema. En él se trabajó en detalle en las áreas piloto Salto/Concordia en la frontera argentino-uruguaya y Rivera/Santana en la frontera brasilero-uruguaya. En ellas se

desarrollaron estudios de campo y modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos de escala local, sin que se profundizara el análisis a escala subregional del sistema acuífero. Tanto en el modelo hidrogeológico regional como en los locales, aún persisten incertidumbres por ejemplo respecto a la localización, extensión y papel de las estructuras en el movimiento del flujo de agua subterránea, el comportamiento del acuífero en condiciones transitorias, las zonas de descarga en el sector sur, entre otros interrogantes.

En consecuencia, se planteó un estudio cuyo objetivo es avanzar en el conocimiento hidrogeológico del SAG en el sector sur integrando información antecedente con información generada con posterioridad al PSAG, proponiendo una actualización del modelo hidrogeológico conceptual. Asimismo, el estudio serviría para identificar vacíos de información que sería necesario cubrir para reducir las incertidumbres del modelo conceptual.

El área de estudio comprende el llamado dominio sur del SAG (Gatsmans et al., 2012), incluyendo desde la zona aflorante del SAG en Uruguay y Paraguay, el SO de Brasil y las provincias de Misiones, Entre Ríos y Corrientes en Argentina, con énfasis en estas dos últimas y el sector uruguayo (Figura 1).

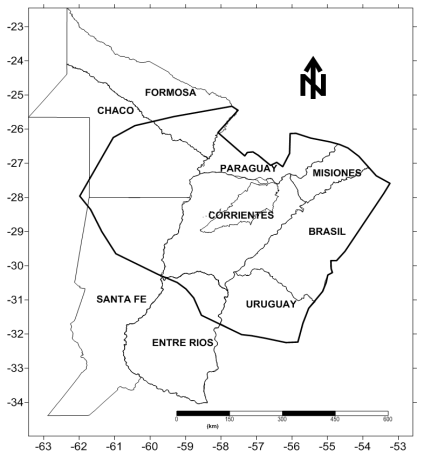


Figura 1. Área de estudio.

El proyecto, que recibe el apoyo del Consejo Hídrico Federal, se encuadra en una de las acciones de corto plazo previstas en el Plan Federal de Aguas Subterráneas de la República Argentina, es la continuación de estudios en el SAG y permite la participación en diversas acciones sobre acuíferos transfronterizos.

A partir de la nueva información recopilada y generada, en este trabajo se presenta una descripción de los principales rasgos geológicos del área, se plantean las facies hidroquímicas identificadas y se analiza la piezometría del SAG en el sector sur trazando una posible relación con los acuíferos superficiales en busca de potenciales zonas de conexión hidráulica entre las diferentes formaciones que componen la columna estratigráfica.

Materiales y métodos

Además de contar con la información recopilada, procesada y analizada en el PSAG, se realizó una exhaustiva búsqueda de nueva información. Desde la finalización del PSAG se han ejecutado unas pocas perforaciones en el sector sur que ayudan a mejorar la definición de la columna estratigráfica. En Argentina, se tienen las perforaciones de Monte Caseros y Curuzú Cuatiá (Corrientes), de las que se dispuso la columna estratigráfica y el perfilaje a través de los basaltos en la perforación de Curuzú Cuatiá (Geól. Angeleri, comunicación personal). Fuera del límite del SAG finalizó recientemente la perforación Villa Elisa 2 en Entre Ríos (Geól. Mársico, comunicación personal). Mársico (2013) reporta nuevos SEV´s en Entre Ríos ubicados en las localidades de Federal y Ubajay, entre otras. En Uruguay, entre la zona aflorante de Rivera y Salto, se ejecutaron cuatro perforaciones: Pepe Núñez, Quintana 1, 2 y 3. Además, la Administración Nacional de Combustibles, Alcoholes y Portland, ANCAP, de Uruguay, puso a disposición la estratigrafía de los pozos arriba mencionados, el perfilaje y la estratigrafía del pozo Belén, y los perfilajes de las perforaciones Gaspar, Salto y Yacaré. En oficinas de ANCAP se realizó una revisión de varias secciones sísmicas que fueron interpretadas in situ con ayuda del software Kingdom. Asimismo, se obtuvieron valores de resistividad eléctrica (de ensayos AMT-MT) para cada litología presente en la zona de estudio deducidos de perfilajes de sondeos y parametrizados para los ensayos AMT realizados por Corbo et al. (2012). El Departamento del Agua, Regional Norte, Universidad de la República realizó sondeos en las perforaciones Belén y Daymán.

En relación a análisis de muestras de aguas recientes en Uruguay, Obras Sanitarias del Estado (OSE), la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), y la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) realizaron un muestreo de pozos de OSE en los que se analizaron: pH, C.E., Dureza, Alcalinidad,Cl, NO3, NO2, NH4,

SO4, F, Fe, Mn, Zn, Na, Pb, As, Cd, C , Se, Cu. En Argentina, en 2012, en el marco del Plan Nacional Federal de Aguas Subterráneas-COHIFE-Subsecretaría de Recursos Hídricos, el Centro de Tecnología de Usos del Agua-CETUA muestreó perforaciones profundas en Entre Ríos y en Misiones, en las que se determinaron δ2H, δ18O (efectuados por el INGEIS) y se realizaron análisis químicos completos. En Concordia 1, 2 y 3, Elisa 1, Federación, Chajarí, Oberá y Posadas se midieron parámetros físico-químicos in situ. El informe del CETUA incluye análisis químicos completos en Concordia 1, 2 y 3, Villa Elisa, Federación y Chajarí.

Por otro lado, Vives et al. (2010) y Manzano et al. (2011, 2012) realizaron un exhaustivo estudio hidroquímico/isotópico abarcando el sector centro-sur de la provincia de Misiones, la provincia de Corrientes y parte del norte de Entre Ríos, muestreando y analizando aguas superficiales en lagunas y arroyos del Sistema Iberá, los ríos Arapey, Miriñay y Uruguay, y aguas subterráneas en perforaciones de diferente profundidad, además de realizar medidas in situ de 222Rn tanto en aguas superficiales como subterráneas.

Con respecto a niveles piezométricos y nuevas determinaciones de parámetros hidrogeológicos, prácticamente no se ha generado nueva información desde la finalización del PSAG. Se desconoce si OSE realizó monitoreos recientes en sus perforaciones.

Toda la información antecedente y recopilada para este estudio fue integrada en la definición de un modelo geológico, un modelo hidrogeoquímico y un modelo hidrogeológico que se apoya en los dos primeros.

Resultados

Modelo geológico

Desde el punto de vista geológico el SAG se encuentra ubicado en las cuencas Chacoparanense y Paraná, que han sido rellenadas con hasta 7000 m de espesor de rocas ígneas y sedimentarias que abarcan todo el registro fanerozoico, con importantes variaciones tanto verticales como laterales en las facies sedimentarias. Este hecho ha producido muchas veces una duplicidad de nomenclatura en las distintas formaciones o una diferente delimitación de las mismas. Esta configuración geológica se complica con la componente tectónica que, a lo largo de la historia geológica, ha condicionado la estructuración y desarrollo de los sedimentos en las cuencas. En el PSAG se acordó una tabla cronoestratigráfica, que fue recientemente revisada por Mira (2012). El SAG estaría constituido por rocas sedimentarias arenosas de estas cuencas, situadas entre una discordancia regional Permo-triásica, y los basaltos confinantes del Grupo Serra Geral. Incluiría las formaciones Tacuarembó, Misiones, Guará y Botucatú del Jurásico y Cretácico inferior, y Caturrita, Pirambòia y Santa María del Triásico. Descansan sobre formaciones continentales detríticas como Fm. Buena Vista y Rio do Rastro, entre otras.

Para comprender la estructuración geológica del área de estudio se trazaron cuatro perfiles o cortes geológicos, de carácter regional, basados en la información geológica descrita, además de información de sondeos magnetotelúricos tipo MT y AMT (Oleaga, 2002; Corbo et al., 2012; Santa Ana et al., 2008) y el modelo geológico-gravimétrico (Mira, 2012). La Figura 2 muestra la ubicación de los perfiles trazados sobre el mapa geológico de la región. Los perfiles respectivos, uno longitudinal N-S y tres transversales, se aprecian en la Figura 3.

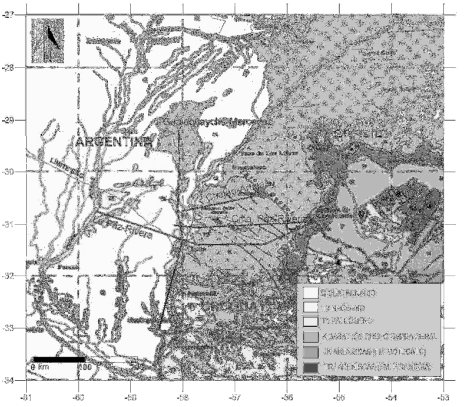


Figura 2. Mapa geológico (modificado de Schobbenhaus y Bellizzia, 2001). Ubicación de la traza de los perfiles geológicos.

En el perfil longitudinal se identifica la disminución de la profundidad al basamento entre las perforaciones de Gualeguaychú y Colón/San José, y una profundización significativa del basamento en torno a Concordia, estimada a partir del modelo gravimétrico. En torno a Chajarí el modelo gravimétrico indicaría una profundidad al basamento de aproximadamente 2200 m y

habría un espesor de sedimentos SAG algo mayor al estimado por Mársico (2013), de unos 450 m, siendo más potentes los sedimentos paleozoicos. En Monte Caseros puede interpretarse un espesor de SAG de 243 m. Cabría esperar un valor similar en Curuzú Cuatiá, que debe verificarse con datos adicionales. Entre La Paz y Concordia 1 se interpreta un aumento del espesor de basaltos en concordancia con una profundización del basamento, rasgo que también es interpretado por Mársico (2013) en su perfil La Paz- Chajarí.

Se construyeron una serie de mapas que apoyan los perfiles geológicos anteriores y ayudan a comprender la estructuración geológica de la zona de estudio. Para su elaboración se dispuso de los perfiles litológicos de las principales perforaciones profundas. También se integraron las estimaciones de profundidad al basamento resultantes del modelo geológico-gravimétrico de la provincia de Corrientes propuesto por Mira (2012). Hay que tener en cuenta que dicho modelo no discrimina entre los distintos sedimentos prebasálticos, de ahí que el mapa de espesor del SAG solo se circunscriba a Uruguay y su límite con Entre Ríos.

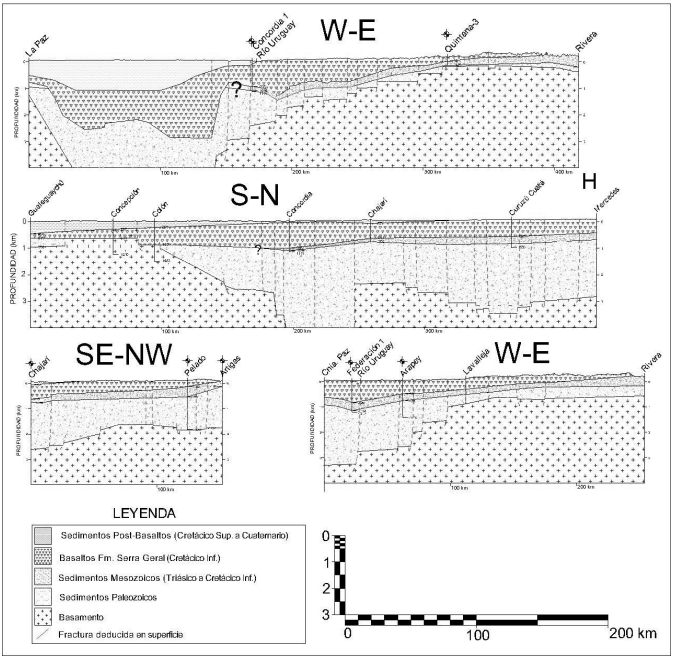


Figura 3. Perfiles geológicos regionales**.**

Se elaboró un mapa de profundidad al Basamento (Figura 4), otro de profundidad al piso de los basaltos (Figura 5) y un mapa preliminar de las formaciones constituyentes del SAG. Las menores profundidades al basamento se encuentran en Uruguay; dentro de la Cuenca Norte existen dos zonas hacia el este donde aflora el basamento cristalino compuesto por rocas Precámbricas. Luego se profundiza notoriamente en dirección NW encontrando su máxima profundidad estimada de unos 5000 m en el entorno del límite sur del SAG en el norte de Entre Ríos, mostrando un pronunciado escarpe por debajo del río Uruguay. Esta importante discontinuidad estructural ya había sido identificada por Corbo et al. (2012). En la Figura 4 se destaca una franja de profundidades menores a 2000 m que atraviesa diagonalmente la provincia de Corrientes de SE a NW, que conformaría un alto estructural dibujando la traza de la Dorsal de Asunción-Río Grande corroborando una existencia que ya fue sugerida por Rossello et al. (2006), aunque se encontraría desplazado hacia el oeste unos 200 km de lo sugerido por esos autores.

Notoriamente la profundidad al piso de los basaltos (Figura 5) es mínima a lo largo de la transición entre la zona de afloramiento en

Uruguay y el inicio de las coladas basálticas, y también en un sector del noreste de la provincia de Corrientes profundizándose hacia el oeste, aunque con gradientes suaves. En cambio en Entre Ríos, acompañando la discontinuidad estructural del basamento, la base de los basaltos muestra importantes gradientes.

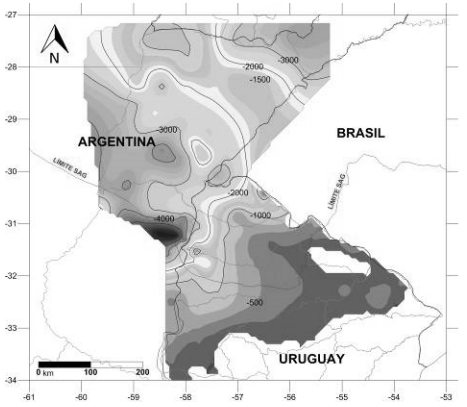


Figura 4. Profundidad al basamento.

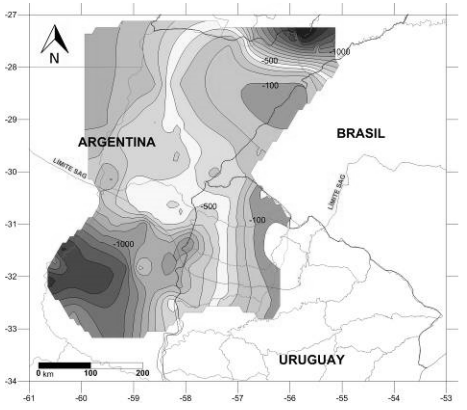


Figura 5. Profundidad al piso de los basaltos.

Modelo hidrogeoquímico

La metodología de análisis fue la planteada por Manzano y Guimaraens (2009) en el estudio hidrogeoquímico realizado en el PSAG.

Los análisis químicos obtenidos se agruparon en tres grupos de acuerdo a su ubicación geográfica y a su posición en la red de flujo. La identificación de facies que se realiza se basa en las definidas por Manzano y Guimaraens (2009) para todo el SAG.

Zona 1: Rivera-Santana/Tacuarembó (zona de recarga regional y corto tiempo de tránsito en el acuífero).
Facies A (Rivera Tacuarembó): aguas entre Ca-HCO3 y Mg-HCO3 (siendo mayores los contenidos de Ca en la formación de Tacuarembó), muy poco mineralizadas (CE <250 mS/cm), con valores de pH entre 4 y 8, valores de la relación Cl/SO4 >> 1.

Zona 2: Litoral Río Uruguay (zona de confinamiento y de largo tiempo de tránsito en el acuífero).
Facies B (Litoral Río Uruguay): aguas de tipo Na-HCO3, con mineralización entre baja y media (CE = 500 a 2000 mS/cm), valores de pH entre 7 y 10, valores de la relación Na/Cl >> 1, valores de la relación Cl/SO4 cercanos a 1 (aunque a veces Cl>SO4 y otras Cl<SO4).
Facies C (Litoral Río Uruguay Salobre): aguas de tipo Na-Cl Na-SO4 Tienen mineralización alta (CE = >6000 mS/cm), valores de pH entre 7 y 9, valores de la relación Na/Cl ≈ 1, valores de la relación Cl/SO4 cercanos a 1.

Zona 3: Artigas-Cuaraí (zona de recarga local, y tiempo de tránsito medio)
Facies A' (Artigas Cuaraí) aguas entre Ca-HCO3, poco mineralizadas (CE <700 mS/cm), con valores de pH entre 5 y 7.5, valores de la relación Cl/SO4 > 1 (aunque a veces Cl<SO4)

El modelo conceptual hidrogeoquímico propuesto para el SAG por Manzano y Guimaraens (2009) es también adecuado para explicar la evolución hidrogeoquímica del área de estudio. La modelación hidrogeoquímica realizada por estos autores apoya la hipótesis que las aguas de la Facies A son principalmente, el resultado de la recarga de agua meteórica (más excedentes de riego), que disuelve CO2 y carbonatos de Ca y Mg. Estos autores proponen una evolución de las aguas de la Facies A, hacia aguas de la Facies B considerando procesos de mineralización leve e intercambio de Mg y Ca por Na. Proponen que la Facies C es el producto de la mezcla de aguas de la Facies B con otras aguas más salinas y de procedencia profunda.

En la zona de estudio se observa una clara tendencia a la pérdida de Mg conforme aumenta el tiempo de tránsito en el acuífero. Por razones de espacio, sólo se presenta el diagrama de Piper correspondiente a la Facies B (Figura 6).

Para estudiar la viabilidad del modelo conceptual se realizó la modelación mediante el programa Phreeqc considerando aguas con una composición promedio para cada Facies,

incluyendo los minerales Halita, Calcita, Dolomita e intercambio catiónico para Na, Mg y Ca. La modelación se realizó admitiendo una incertidumbre de hasta 30 % en las concentraciones y por lo tanto los resultados deben considerarse a nivel cualitativo y a los únicos efectos de evaluar la viabilidad del modelo conceptual. El programa presentó cuatro posibles combinaciones de procesos. En todos ellos se observó un aumento de Na por intercambio catiónico y disolución de Halita, consumo de Mg por intercambio o precipitación de Dolomita y consumo de Ca por intercambio o precipitación de Calcita.

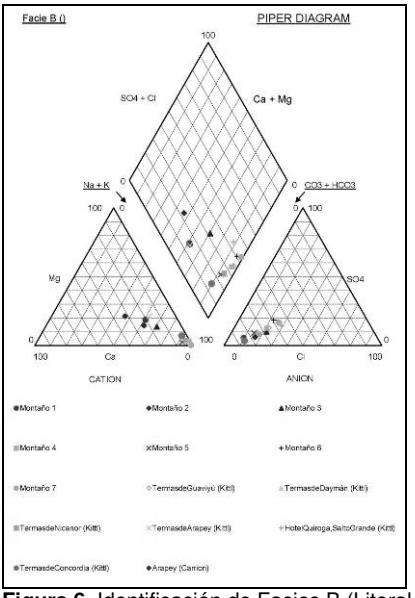


Figura 6. Identificación de Facies B (Litoral Río Uruguay).

Modelo hidrogeológico

Desde la finalización del PSAG no se realizaron nuevas mediciones de niveles piezométricos que permitan actualizar el mapa trazado por Gastmans et al. (2012), pero sí pueden hacerse reinterpretaciones del comportamiento hidrogeológico subregional con el apoyo de los modelos geológico e hidrogeoquímico aquí presentados. Se elaboró un mapa piezométrico del sector sur del SAG (Figura 7). Debido a la falta de datos de niveles hacia el oeste, las curvas piezométricas interpoladas en ese sector no deberían considerarse. Nótese que en la figura se han incluido los lineamientos superficiales identificados en la provincia de Corrientes, que están siendo evaluados en otros proyectos en ejecución junto con los análisis hidroquímicos e isotópicos, con el fin de explicar los patrones hidroquímicos detectados en aguas de perforaciones con profundidades mucho menores a las del SAG en el sector oriental de la Provincia de Corrientes, entre los esteros del Iberá y el río Uruguay.

A nivel subregional, dentro del área comprendida en el rectángulo indicado en la Figura 7, se confirmarían las direcciones de flujos divergentes desde la zona de afloramiento y recarga en Rivera (UY)/Santana (BR) hacia el sector centro-oriental de la provincia de Corrientes, con direcciones NE-SW, y E-W hacia el norte de la provincia de Entre Ríos. Se sugiere un posible flujo saliente a través del límite sur del SAG. Esta posibilidad deberá ser validada en el futuro mediante información de campo adicional y/o simulaciones numéricas.

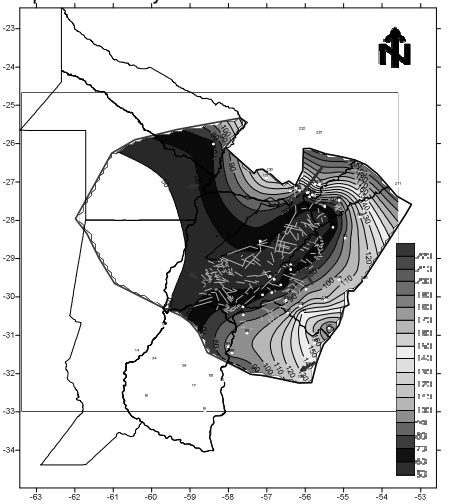


Figura 7. Mapa potenciométrico del SAG en el sector sur superpuesto con los lineamientos (Mira, 2012). Niveles en msnm.

Un sistema de flujo similar fue planteado por Oleaga (2002) para el sector uruguayo aunque con menor detalle. Los niveles máximos son del orden de 190 msnm en zonas no afectadas por los campos de bombeo en Rivera/Santana, descendiendo a cerca de 90 m en cercanías del río Uruguay. El gradiente hidráulico disminuye en el sentido de flujo hacia el oeste. Cercano a la zona de afloramiento es del orden de 5,5 x 10^{-4}, en el centro de Uruguay es del orden 4,20

x 10^{-4} y en las inmediaciones del río Uruguay desciende a alrededor de 1,5 x 10^{-4}.

El gradiente es muy pronunciado en el NE, identificándose un flujo en dirección NE-SW en coincidencia con la dirección regional de escurrimiento subterráneo del SAG. Se identifica ingreso de flujo desde la zona aflorante ubicada en el sur de Paraguay, identificada como tal en los estudios del SAG-PY (2007), donde los gradientes hidráulicos son similares a los de la zona aflorante en UY.

En el centro de la provincia de Corrientes habría una zona de muy bajo gradiente y flujo convergente, aunque la piezometría es muy escasa en todo el sector occidental de la provincia. En la figura se han superpuesto los lineamientos mapeados en superficie, cuya relación con la hidrogeología y la hidroquímica son aún motivo de estudio.

Las zonas aflorantes en Uruguay y Paraguay constituyen zonas de recarga del dominio sur del SAG. En el PSAG se había marcado una zona potencial de recarga directa en el centro de Corrientes en coincidencia con la meseta de Mercedes. A la luz de los avances del conocimiento geológico en la zona (Mira, 2012; Mira et al., este volumen), este área quedaría descartada como de recarga directa por tratarse posiblemente de un afloramiento del miembro Solari (intertrap entre basaltos Serra Geral) y no de areniscas del SAG.

Tramos de los ríos Uruguay y Paraná, las formaciones infrayacentes, zonas de fracturamiento de los basaltos, entre otros, podrían constituir posibles zonas de descarga (o recarga). A los fines de explorar esta posibilidad, se construyó un mapa piezométrico preliminar de las formaciones acuíferas suprayacentes a los basaltos en territorio argentino, sin detenerse en su origen sedimentológico y al sólo efecto de su posterior comparación con la piezometría del SAG (Figura 8). Los valores de niveles corresponden a una ventana temporal de aproximadamente los últimos 12 años. Para definir el nivel de base del acuífero superficial, la piezometría se complementó con información de escalas hidrométricas ubicadas en la red de drenaje principal y secundaria, tanto en ríos como en lagunas, cuya ubicación se muestra en la Figura 8. En la Mesopotamia Argentina se identifica claramente la divisoria de aguas subterráneas que separan el flujo subterráneo hacia el río Paraná y el río Uruguay, los que constituyen las vías de descarga del acuífero superficial. Los gradientes bajos acompañan la topografía.

La Figura 9 muestra el resultado, a nivel preliminar, de sustraer al mapa piezométrico del SAG el mapa piezométrico superficial. Valores positivos indicarían la potencialidad de flujos ascendentes.

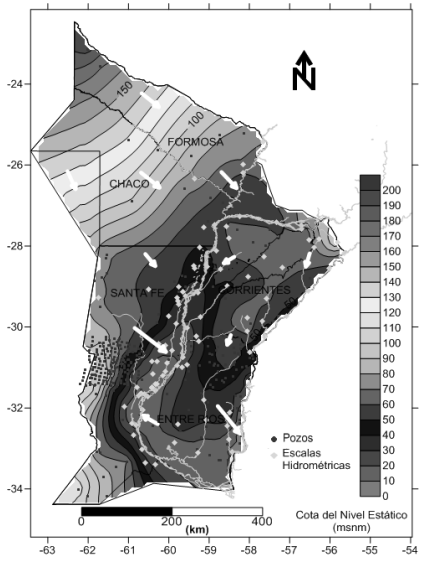


Figura 8. Piezometría superficial

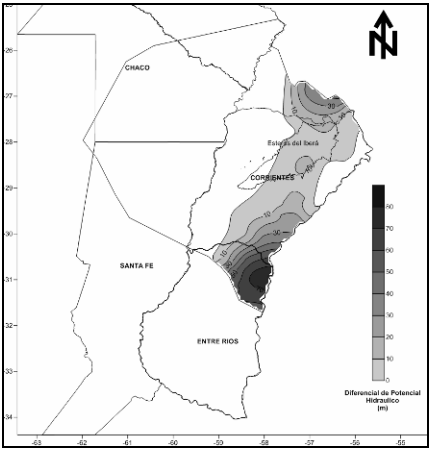


Figura 9. Diferencia entre la piezometía del SAG con la del acuífero superficial.

El sector oeste se ha eliminado de la figura teniendo presente la falta de datos del SAG. A lo largo del río Uruguay existiría una franja de aproximadamente 70-80 km en la cual se presentarían gradientes positivos.

Si se analizan en conjunto los mapas presentados se observa la presencia de una zona de escasos 100 m de profundidad al techo

del SAG en el centro-este de Corrientes, cercana al río Uruguay, donde también habría gradientes hidráulicos positivos. Asimismo, la zona se caracteriza por numerosos lineamientos superficiales, cuya continuidad en profundidad no es conocida aunque es probable que afecte a toda la serie sedimentaria (Mira, 2012). De existir fracturamiento de los basaltos confinantes, podría producirse la conexión hidráulica entre los sedimentos infrabasálticos y las capas superiores.

Conclusiones

En este trabajo se han presentado los avances del conocimiento hidrogeológico en el dominio sur del SAG, destacándose las principales conclusiones:

- Se detectó un sector del noreste de la provincia de Corrientes con escasa profundidad al piso de los basaltos.
- Se verificó la importante discontinuidad estructural en el límite Uruguay/Argentina en torno al área piloto Salto-Concordia
- Se verificó en el sector de estudio la validez del modelo conceptual hidrogeoquímico propuesto para el SAG por Manzano y Guimaraens (2009) que explica la evolución hidrogeoquímica del área de estudio.
- Se identifica una zona de potencial descarga regional del SAG en el centro-este de Corrientes, entre los esteros del Iberá y el río Uruguay.

Agradecimientos

Se agradece el aporte de información a los Geólogos Daniel Mársico y José Luis Ageleri, y ANCAP, OSE, DINAMA y DINAGUA (Uruguay).

Referencias

Corbo, F., Arzate, J., and Oleaga, A., 2012. Structure of the Guarani Aquifer in the surroundings of the Uruguay River from magnetotelluric soundings *Geofisica Internacional*, 51(1):17-37.

Gastmans, D., Veroslavsky, G., Kiang Chang, H., Caetano-Chang, M. R., y Nogueira Pressinotti, M. M. 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión, *Boletín Geológico y Minero*, 123, 249–265.

Manzano, M. y Guimaraens, M. 2009. Hidroquímica regional del SAG. Estudio del origen de la composición química de las aguas subterrâneas del Sistema Acuífero Guaraní. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero.

Manzano, M., Rodríguez, L., Ortega, L., Vives, L., Heredia, J., Mira, A., Nittmann, J. y Valladares, A., 2012. Evaluación hidroquímica e isotópica de la hidrogeología en torno a los Esteros del Iberá, Corrientes, Argentina. *II Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie.* 23-27 abril,. Bahía Blanca, Argentina.

Manzano, M., Rodríguez, L., Heredia, J., Vives, L., Nittman, J., Zabala, M.E., Valladares, A., Agarwaal, P. and Araguás, L., 2011. Hydrochemical and isotopic assessment of the Iberá hydrogeological system in NE Argentina. *Geophysical Research Abstracts,* Vol. 13, EGU2011-6898, EGU General Assembly 2011.

Mársico, D., 2013. Aportes a la perspectiva geológica e Hidrogeológica regional en el sector centro Este de la cuenca chacopampeana. Tesis doctoral. Universidad de la Coruña, España.

Mira, A., 2012. Modelo conceptual hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní con énfasis en el sector Argentino", Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cartagena, España.

Oleaga, A.B., 2002. Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector Uruguay. Un enfoque integral. Disertación Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 119 p.

Rossello, E.; Veroslavsky, G.; Santa Ana, H.; Fúlfaro, V.J.; Fernández Garrasino, C. 2006. La dorsal Asunción-Río Grande: un altofondo regional entre las cuencas Paraná (Brasil, Paraguay, Uruguay) y Chacoparanense (Argentina). Revista Brasilera de Geociencias, 36, 181-196

SAG-PY, 2007. Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la Región Oriental del Paraguay. Informe Técnico de Cooperación entre la Secretaría del Ambiente y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR).

Schobbenhaus, C. y Bellizzia, A., 2001. Mapa geológico de América del Sur, 1:5.0000.000. CGMW - CPRM - DNPM UNESCO, Brasilia.

Vives, L., Rodríguez, L., Aggarwall, P., Araguas, L., Manzano, M. and Valladares, A., 2010. Preliminary analyses of the role of wetlands and rivers in the groundwater discharge of the Guaraní Aquifer System in NE Argentina. *The International Symposium on Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems, and Climate Change Studies*. Monaco, 27 March through 1 April. 2011.

Investigaciones Hidrogeológicas Acuífero El Zapallal (Perú)

José Bolzicco[1], Juan García[1], Raul Ortiz[1], Alex Ludeña[1], Maritza Jurado[1], Guillermo Diaz[1], Fernando Estrada[1], Felipe Huerta[1],

[1] MWH Perú, Avda. Conquistadores 6538, San Isidro, Lima Perú

Mail de contacto: jose.bolzicco@us.mwhglobal.com

RESUMEN

En el NW del Perú, entre las localidades de Piura y Chiclayo (200Km), se desarrolla un desierto costero de 100km de ancho, de baja pluviosidad y elevada evapotranspiración (300 y 1500mm/año respectivamente). El gobierno peruano ha desarrollado en la zona proyectos de riego basado en el riego con agua de trasvase (embalses Andinos) y aguas subterráneas locales, debido al bajo costo de las tierras y clima local atemperado. Se desarrollaron estudios hidrogeológicos que permitieron identificar la presencia del acuífero confinado, El Zapallal, a más de 100m de profundidad y con potencias superiores a los 100m, abarcando una superficie de más de 10000 Km^2. Con aguas aceptables para el riego (CE < 1500µS/cm) y productividad media de 30-40 l/s. Destacan como objetivos de los estudios: diseño adecuado de captaciones; planificación sustentable de explotación del acuífero; y desarrollo de planes sociales que compatibilicen las actividades de los pobladores rurales y las explotaciones industriales.

Palabras clave: acuífero confinado – sostenibilidad – sobrexplotación – sociabilidad.

ABSTRACT

In the NW of Peru, between the towns of Piura and Chiclayo (200km), we found a coastal desert of 100km wide, low rainfall and high evapotranspiration (300 and 1500mm/year respectively). In this area, the Peruvian government has developed irrigation projects with diverted water, from Andean reservoirs, and local groundwater. The low cost of land and tempered local temperatures promote the projects. Hydrogeological studies were developed identifying the presence of a confined aquifer, named El Zapallal. It is located at more than 100m deep and has a thickness of more than 100m, covering an area of more than 10000 km^2. The groundwater has a good quality for irrigation (EC <1500µS/cm) and has an average productivity of 30-40 l/s. Highlights of the study are: adequate pumping well design, planning sustainable aquifer use and social development plans to support the simultaneous use of the aquifer for rural activities and industrial agriculture.

Keywords: confined aquifer – sustainability – overexploitation - sociability

Introducción

El desarrollo de proyectos agrícolas en el NW del Perú, con el objetivo de lograr un mayor desarrollo económico del país, en búsqueda de otras alternativas comerciales diferentes a la minería, han obligado al estudio de diferentes alternativas de provisión de agua que permitan satisfacer las demandas del riego.

Estas investigaciones son de primordial importancia ya que las provincias involucradas (Piura y Lambayeque, ver Fig. 1) se caracterizan por presentar condiciones de extrema aridez, con precipitaciones inferiores a los 300mm anuales y demandas de agua atmosférica superiores a los 1500 mm anuales, a lo que se suma la ausencia de recursos de agua superficial.

Los proyectos de irrigación optan, por una parte, en disponer de agua para irrigación a partir del trasvase de aguas desde la región Andina hacia la región costera (como por ejemplo el proyecto de trasvase del Embalse El Limón para el proyecto de irrigación de Olmos).

No siempre las obras de trasvases son suficientes para satisfacer los requerimientos de agua para riego, y se deben identificar nuevas fuentes de provisión como complemento.

Ello ha contribuido a la investigación de fuentes de agua subterráneas, algunas de ellas aún sin explotar, como es el caso del acuífero el Zapallal, del cual se espera caracterizar sus propiedades hidráulicas, físico químicas y su potencialidad y sostenibilidad de explotación en el tiempo.

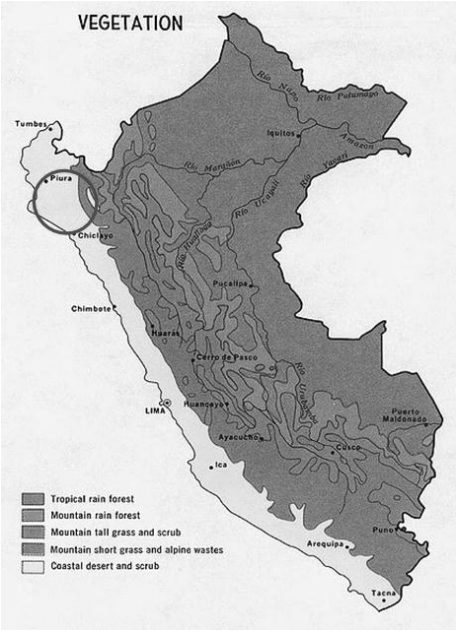


Figura 1. Ubicación de la Zona de Estudio Provincias de Piura y Lambayeque (Perú).

Los estudios se centraron en identificar los rasgo geológicos necesarios que permitieran delinear la geometría y posición del acuífero sometido a estudio. Ello con el apoyo de estudios geológicos regionales, prospección geofísica y perfiles litológicos de sondeos exploratorios.

Asimismo se ha buscado caracterizar sus propiedades hidráulicas, sus características físico químicas y su relación con otras unidades acuíferas suprayacentes así como sus posibles fuentes de recarga.

El objetivo final de los trabajos ha sido poder definir la potencialidad de este acuífero para satisfacer demandas de riego, consumo humano o industrial.

Clima

En la zona existen una serie de estaciones meteorológicas que permiten evaluar el comportamiento climático de la zona. Se produce una concentración de las lluvias entre el período de enero a mayo, en tanto que el resto del año las precipitaciones son muy escasas. Sus magnitudes varían entre 114 y 271 mm anuales (Fig. 2), aunque en año del Niño estos valores pueden ser ligeramente superiores.

La temperatura ambiente es el único elemento climático que favorece la instalación de proyectos de irrigación, se muestra muy estable y constante a lo largo del año, con valores medios diarios diurnos que oscilan entre 20 y 27ºC, aunque se registren mínimas de 10ºC y máximas de hasta 37ºC.

La evapotranspiración potencial (Eto), se ha estimado por el método Penman-Monteith y calculadas finalmente con el CROPWAT 8.0 (recomendado por la FAO). Los valores oscilan entren 1400 y 1600 mm/año, con una demanda diaria promedio de entre 4.0 y 4.5 mm.

De esta forma la deficiencia hídrica atmosférica es más que relevante en la zona, lo cual tiene un gran impacto sobre las posibilidades de encontrar recursos hídricos superficiales.

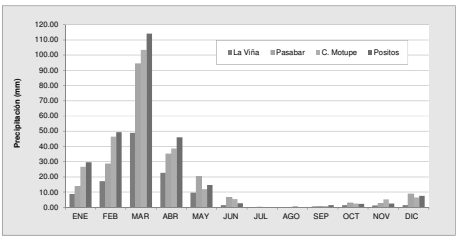


Figura 2. Precipitaciones medias mensuales (1968-1998). Provincia Lambayeque (Perú)

Hidrología

De Noreste a Sudoeste atraviesan la región bajo estudio los ríos Cascajal y Olmos (Fig. 3).

Figura 3. Cuencas Hidrográficas Provincias de Piura y Lambayeque (Perú)

El régimen hidrológico de estos ríos presenta características irregulares, de tipo torrencial, con descargas extremas y efímeras en épocas de lluvias y nulas el resto del año; se han observado caudales extraordinarios en años con fenómeno de El Niño.

La estación Pueblo registra los caudales del río Olmos (ECSA, 2011), con una descarga promedio anual de 0.9m^3/s, mínima de 0.1m^3/s y máxima de 7.6m^3/s. La estación Zapatero registra los caudales del río Cascajal (Nippon Koei, 2009), con un caudal medio de 2.4m^3/s y máximo de 16.4m^3/s. (Fig. 4)

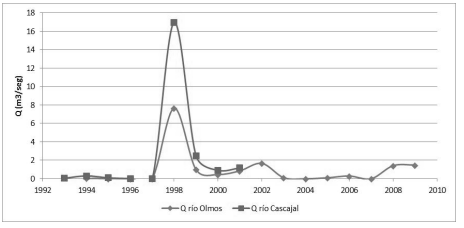


Figura 4 Caudales mensuales ríos Cascajal y Olmos. Provincia de Lambayeque (Perú)

Dada la característica intermitente y aluvional de estos ríos sus caudales (abastecidos únicamente por las escasas precipitaciones) no son aprovechables más que esporádicamente por los habitantes rurales de la región para sus necesidades de riego y eventualmente de agua potable. La mayor parte del volumen de agua que escurre por los cauces se evapora o se infiltra hacia el acuífero aluvial asociado.

Con dirección Norte- Sur, al Este de la zona de estudio, y con un régimen permanente alimentado por las altas precipitaciones de la región Andina, el río Huancabamba tiene su origen en la laguna Shimbe. Tiene una superficie de 3710Km^2 y una longitud de 151Km, las precipitaciones son variables con la altitud, registrándose valores anuales de 300mm a cota 1200 msnm y de 1500mm a 3500 msnm. El volumen de las aportaciones por lluvia es de 1500 Hm^3 que corresponde a una precipitación anual de 400mm. Es de este río desde donde se captan las aguas para realizar el trasvase a la zona de estudio y alimentar a una de las futuras zonas bajo riego.

El caudal medio anual del río en la estación el Limón es de 26.1m^3/s, con un máximo de 41.1m^3/s en el año 1971 y mínimo de 16.4m^3/s en el año 1979. (Fig. 5)

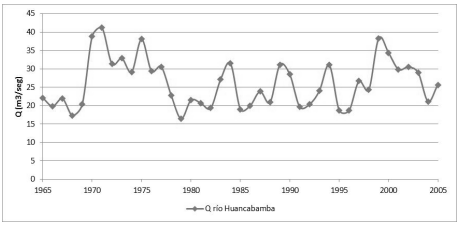


Figura 5 Caudal anual río Huancabamba. Provincias de Piura, Lambayeque y Cajamarca (Perú)

Geología

En el área de estudio se presentan afloramientos cuyas edades van desde el paleozoico hasta el cuaternario reciente. Los afloramientos están conformados por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, las que según su distribución permite identificar 3 regiones geológicas (Fig. 6):

Cordillera Occidental de los Andes, constituida por rocas sedimentarias, intrusivas, metamórficas y volcánicas, representadas por filitas, pizarras, esquistos, areniscas, cuarcitas, dacitas y tonalitas.

Macizo Costero, constituido por rocas magmáticas y metamórficas cuyas edades varían desde el paleozoico hasta el paleógeno.

Depresión Costanera, ubicada entre las dos unidades anteriores, se caracteriza por presentar un relieve suave y está caracterizada por poseer una estratificación compleja con intercalaciones de cantos rodados, gravas, arenas y arcilla.

Es dentro de esta depresión Costanera que se ubican las formaciones acuíferas que son de interés para diferentes usos, tales como los:

Depósitos Aluviales (Qpl-A), son depósitos Cuaternarios que se identifican en el cauce de los valles y quebradas, constituidos principalmente por bloques polimícticos envueltos en matriz limo arenosas poco compactas. Litológicamente están constituidos por gravas y arenas con clastos subangulosos a subredondeados y hasta redondeados en una matriz arenosa sin compactar. Estos configuran extensas zonas a manera de terrazas, por lo general son secos y solo en época de lluvias tienen la presencia de agua.

Formación Zapallal (Nmp-m), son depósitos del Mioceno, Terciario Superior, que subyacen a los materiales Cuaternarios. Litológicamente presenta tres miembros: superior, medio e inferior. El primero es una secuencia de conglomerados, lutitas y areniscas; el miembro medio constituido por areniscas cuarzosas

interestratificadas con lutitas, arcillas y areniscas calcáreas, mientras que el miembro inferior conformado por horizontes arcillosos, areniscas calcáreas y conglomerádicas. Desde el punto de vista hidrogeológico esta formación, y en especial su miembro superior, son de suma importancia debido a que constituye el reservorio acuífero de la región de Piura.

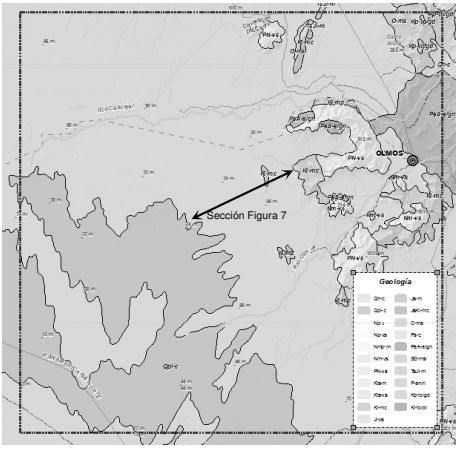


Figura 6. Geología Regional Zona de Estudio (Fuente INGEMMET) (Perú)

Hidrogeología

Los estudios hidrogeológicos se han apoyado sustancialmente en la información geológica regional y local (en base a registros litológicos de muy pocos piezómetros), así como en base a estudios geofísicos. En la Fig.7 se ha conceptualizado una sección esquemática transversal, orientada de Noreste a Suroeste, de los acuíferos de la zona de estudio, y cuya ubicación se ve en la Fig.6.

Acuífero Libre: La descripción hidrogeológica nos indica que desde superficie, y con un espesor de unos 30m, se encuentra un primer estrato de sedimentos aluviales (arenas, limos y arcillas), seguido de una capa de gravas con arenas gruesas cuyo espesor varia de 7 a 20m. Ambos niveles conformarían el acuífero superior (libre). Es el acuífero que es actualmente explotado en la región mediante pozos tubulares o excavados que no exceden los 60-70 m de profundidad. Su uso es en general para riego y en algunos casos para consumo humano. Es un acuífero de relativa buena productividad con caudales que varían entre 10 y 80 l/s. Los parámetros hidráulicos definidos en varios estudios le asignan una permeabilidad media de 50m/día y una transmisividad media de 2500m^2/día. No obstante la relativa buena productividad del acuífero, las aguas son de mediocre a mala calidad para el riego y consumo humano ya que se presentan valores de conductividad eléctrica altos a muy altos (entre 1500 a más de 8000 µS/cm). Predominan las aguas de tipo C3-S2 (diagrama salinidad RAS), pero pueden llegar a ser hasta C6-S4. Son de tipo Bicarbonatada y/o Cloruras Sódicas. La recarga de este acuífero es muy limitada, las escasas precipitaciones de la región, los retornos de riego, los caudales esporádicos de los ríos Cascajal y Olmos en época del Niño y eventualmente el agua importada de consumo humano.

Acuitardo: Posteriormente, por debajo de esta capa, se presenta una capa impermeable de arcilla y limo, con un espesor medio de unos 50-70m (acuitardo). Este material se encarga de constituirse en el material que regionalmente confina al acuífero El Zapallal.

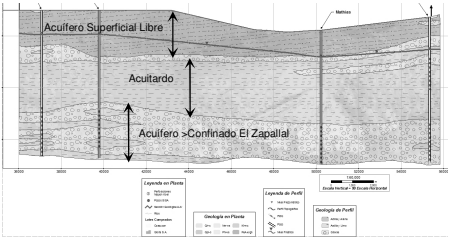


Figura 7. Conceptualización del modelo hidrogeológico acuífero El Zapallal (Fuente INGEMMET) (Perú)

Acuífero Confinado: Por debajo de este estrato impermeable y confinante se identifica un paquete de gravas con arenas de granulometría variada que se continúa hasta las profundidades máximas prospectadas (180m), dando lugar a espesores máximos de hasta 50-60m (pero que podrían ser mayores de acuerdo a la geología regional). Esta capa es el acuífero confinado El Zapallal.

Las características hidráulicas del acuífero el Zapallal se obtienen a partir de algunos ensayos de bombeo que asignan valores de Transmisividad de 400-500m^2/día y valores de Permeabilidad de 1 a 2m/día. Los caudales de bombeo aforados son del orden de 40 l/seg y se han observado depresiones en el nivel piezométrico de 50m. El coeficiente de almacenamiento se ha estimado en 1*10^{-4}. Las aguas del acuífero son del tipo Cloruradas y/o Bicarbonatadas Sódicas, del tipo C3-S2 (lo que

denota un cierto riesgo de sodificación del suelo en caso de usarse para riego) y con conductividades eléctricas inferiores a los 1200 µS/cm, lo que en general las hace aptas para el consumo humano y otros usos.

Desde un punto de vista de los volúmenes de agua almacenados en el acuífero, y basados en su geometría y parámetros hidráulicos del acuífero, se estima que el mismo alberga del orden de 10000 Hm^3 por cada 10m de espesor de acuífero y unos 30 a 60 Hm^3 actuando como acuífero confinado.

Desde este punto de vista la potencialidad volumétrica del acuífero es importante para una región que carece de recursos hídricos superficiales. No obstante ello la productividad del acuífero no es muy elevada (menos de 1 l/seg/m de depresión del acuífero) y para caudales de 40 l/seg la depresión del nivel piezométrico hace que el nivel dinámico obtenido durante las pruebas de bombeo se sitúe a no más de 15 m del techo confinante. Por lo que de desearse extraer mayores caudales de agua o aumentar la presión extractiva sobre el acuífero implicaría muy probablemente tenerlo que hacer a expensas de cambiar el régimen de funcionamiento del acuífero confinado a libre

Dos aspectos que aún deben dilucidarse de esta unidad acuífera son: 1) la base de ésta formación acuífera confinada, lo cual permitiría disponer de mayores espesores saturados para la explotación del mismo, ya que los estudios geofísicos regionales para investigación petrolera han identificado la posición de la roca madre a mas de 400m de profundidad; y 2) la recarga de la unidad acuífera, ya que debido a su extensión regional, a que no es explotado y por tal la falta de pozos exploratorios no hay posibilidad de augurar el origen de la misma y por tal el grado de reposición que podría tener como para asegurar explotaciones sostenibles en el tiempo.

Otras Consideraciones

Si bien el acuífero el Zapallal tiene un gran potencial en convertirse en una fuente de provisión de agua en la región (por su calidad y los volúmenes almacenados), se deberá definir con mayor exactitud sus real productiviodad y la sostenibilidad en el tiempo de estas acciones mediante investigaciones más exhaustivas.

Existen algunos peligros adicionales en usufructuar este recurso, más allá de los posibles problemas de sobrexplotación del mismo. Los problemas se centran en cuatro aspectos fundamentales: 1) la calidad deficiente en la construcción y diseño de los pozos de explotación, habiéndose identificado sitios en los que se ha puesto en comunicación el acuífero superficial (de mayor salinidad) con el profundo de buena calidad, generando posibles puntos de contaminación cruzada; 2) la elección de los cultivos a instaurar en las parcelas de riego, lo cual queda normalmente a elección del adquiriente de los terrenos, que busca recuperar rápidamente las inversiones, plantando por ejemplo caña de azúcar para producir biocombustibles, sin reparar en los grandes volúmenes de agua de riego necesarios parea su crecimiento; 3) la falta de diseño de sistemas de drenaje para las obras de riego en la suposición de que los niveles superiores del suelo están bien drenados, aunque la experiencia indica que rápidamente comienzan a surgir problemas de revenimiento de sales y encharcamientos dada las características salinas de los suelos superficiales, y finalmente 3) las relaciones entre comunidades e industrias agrícolas, ya que las primeras piensan que ven afectados sus derechos al uso de un recurso al que no tienen acceso por el elevado costo de las perforaciones profundas, y en tal sentido no reciben el apoyo del gobierno para poder satisfacer sus necesidades.

.

Conclusiones

No existen recursos hídricos superficiales suficientes como para satisfacer las demandas de agua local para riego y consumo, por lo que se recurre al trasvase desde cuencas Andinas y se complementa con aguas subterráneas.

El acuífero superficial si bien tiene un elevado potencial productivo, la mediocre a mala calidad de sus aguas hace que su uso sea bastante restringido al riego de cultivos resistentes a la salinidad

Se ha confirmado la presencia del acuífero Zapallal, constituido por materiales gravosos y arenosos con intercalaciones de sedimentos marinos (conchillas y material calcáreo) cuyo espesor cuantificado es de unos 100m, pero cuya potencia real podría ser al menos el doble dado los rasgos de la geología regional. Y sería el potencial acuífero a ser utilizado como complemento de las necesidades de riego.

Es un acuífero confinado, que no está en explotación, con valores de Transmisividad (T) de 400/500m^2/día, permeabilidad (K) de 4/5 m/d, espesor saturado (e) de 100 m y coeficiente de almacenamiento (S) de $1*10^{-04}$. Se estima una porosidad eficaz del 10%.

La calidad del agua es relativamente buena, con valores de CE inferiores a los 1200 µS/cm, del tipo Cloruradas y/o Bicarbonatadas Sódicas, clasificadas como C3S2, riego con precaución.

La recarga del acuífero Zapallal probablemente sea proveniente del río Piura, a mas de 100Km de distancia de la zona de estudio, donde se aprecia el afloramiento en superficie de la formación Zapallal, pero no existen suficiente información como para corroborar este aspecto.

Se identificaron deficiencias constructivas en las perforaciones exploratorias del acuífero profundo que permitirían la conexión de las aguas de mala calidad del acuífero superior con las de buena calidad del acuífero Zapallal.

El volumen de agua almacenada a presión en el acuífero confinado en toda el área que supuestamente abarca es de entre 30 y 60Hm^3.

El volumen de agua gravífica almacenada en el acuífero profundo para un espesor de explotación de 10m, y que involucre toda el área del mismo, es del orden 10000Hm^3.

No existe regulación en los tipos de cultivos a instaurar en las parcelas de riego y no se han diseñado sistemas de drenaje para recoger las aguas excedentes de riego y evitar la salinización del suelo y su anegamiento.

Acciones Futuras

Uno de los principales retos a futuro, para asegurar la sustentabilidad de la explotación de ésta unidad acuífera, es la de poder determinar, con mayor grado de certeza, la fuente de recarga y la magnitud de la misma.

Debido a que las investigaciones geofísicas no han dado buenos resultados, a que los costos de las perforaciones de investigación son elevados y a que los permisos de perforación necesarios requieren de tiempos demasiados prolongados de resolución, se propone investigar este aspecto mediante el análisis isotópico de muestras de agua del acuífero y de las potenciales fuentes de recarga (agua del río Piura, en el extremo NW de la zona de estudio; agua de las precipitaciones locales y de la zona alto andina, y agua del río Huancabamba).

El desconocimiento del espesor total del acuífero (en profundidad) y/o la posición del substrato impermeable obligan a seguir estudiando, mediante sondeos exploratorios, la geometría de la unidad acuífera, lo cual aumentaría notablemente el potencial volumen del mismo para ser explotado.

Diseñar posteriormente una red de control y monitoreo de niveles y calidad de las aguas para evaluar el comportamiento estacional.

Referencias

ARCE GEOFISICOS, 2004. Potencial Geofísico Exploratorio de los Acuíferos Regionales Terciarios del Perú. El acuífero Zapallal. Volumen Especial Nº 6, *Alberto Giesecke Matto*

ECSA Ingenieros, 2011. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto de Irrigación Olmos.

Gobierno Regional Lambayeque, 2011. Mejoramiento del Sistema ecológico de la cuenca del rio Huancabamba, tramo aguas abajo del embalse Limón- confluencia río Chotano, en la jurisdicción de los distritos de Pucará y Pomacahua, de la provincia de Jaén-Departamento de Cajamarca.

Grupo Técnico Regional del Agua Lambayeque – GTRA, 2006. *Lineamiento de Política en la Gestión de Recurso Hídricos de la Región Lambayeque*.

INGEMMET, 2011. Boletín 140 Geología del Cuadrángulo de Olmos.

INRENA, 1999. Inventario y Monitoreo de Aguas Subterráneas en el Valle de Olmos – Informe Final.

NIPPON KOEI, 2009. Estudio de Factibilidad, Preinversión y demás estudios conexos del Proyecto Obras de Conducción y Distribución de Agua de Riego de Olmos.

Universidad de Piura, 1995. Balance Hídrico Superficial de la cuenca del río Huancabamba.

Universidad de Piura, 2005. Balance Hídrico Superficial en la Cuenca del Río Cascajal.

Estudio Hidrogeológico en la Cuenca Abaucán – Colorado – Salado. Catamarca, Argentina

Carlos A. J. Torres[1], Norberto G. Bucich[1], Ernesto García Perón[1], Rubén N. Gianni[1] y Patricia S. Luna[1]

[1]Instituto Nacional del Agua, Centro regional de Aguas Subterráneas (I.N.A. – C.R.A.S.), Av. Ignacio de La Roza 125 (Este), (C.P. 5400), San Juan, Argentina.
Mail de contacto: ctorres@ina.gov.ar

RESUMEN

El área de trabajo corresponde a la Cuenca de Abaucán – Colorado – Salado, situada en el oeste de la provincia de Catamarca. Los terrenos son de origen ígneo, metamórfico y sedimentario de edad precámbrica, paleozoica, terciaria y cuaternaria. Se realizó un inventario de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca para su caracterización hidrogeológica e identificación preliminar de las áreas más favorecidas en cantidad y calidad de sus recursos. Se identificaron en el subsuelo tres unidades hidrogeológicas: basamento resistivo (rocas ígneas y metamórficas del Precámbrico – Paleozoico), relleno conductivo (terrenos del Terciario y del Cuaternario Inferior) con probables niveles acuíferos y relleno resistivo (materiales sueltos cuaternarios) con un espesor máximo interpretado de 360 m, que contiene los acuíferos más importantes. Las áreas hidrogeológicamente más cualificadas se ubican en el sector centro y sur de la cuenca, con espesores saturados promedio de 200 m y salinidad del agua subterránea moderada.
Palabras clave: unidades hidrogeológicas, áreas hidrogeológicamente cualificadas.

ABSTRACT

The study area is located in the Abaucán - Colorado – Salado basin, in western Catamarca province. The underlying rocks are igneous, metamorphic and sedimentary of Precambrian, Paleozoic, Tertiary and Quaternary ages. Work included an inventory of groundwater resources in order to identify and characterize preliminary areas for sustainable pumping. Three hydrogeologic units were defined by geoelectric surveying: an electrically resistive hydrogeologic basement (igneous and metamorphic Precambrian and Paleozoic rocks); a conductive cover comprising Tertiary and Low Quaternary sedimentary rocks and a resistive fill of loose Quaternary sediments of fluvial and alluvial origin. This fill with a maximun thickness of some 360 m includes the most important aquifer levels. The best hydrogeological areas are located in the central and southern parts of the basin, with an average saturated thickness of 200 m and moderate groundwater salinity.
Keywords: hydrogeological units, qualified hydrogeological areas.

Introducción

El área de estudio es una depresión o valle ubicado en el sector oeste de la Provincia de Catamarca. Posee orientación general norte – sur y limita al norte y al este por los relieves montañosos de las sierras de Fiambalá y Copacabana, al sur por la sierra de Copacabana y al oeste por el Cerro Negro de Rodríguez y la Sierra de Narváez, Figura 1. La parte más ancha del mismo tiene unos 35 km a la latitud del poblado de Saujil y la más angosta unos 1.2 km al sur del poblado de El Puesto. La región está surcada por el río Fiambalá o Saujil con sus nacientes en el extremo norte del valle y es de escurrimiento permanente a partir de Los Nacimientos. A la latitud de la localidad de Fiambalá recibe por su margen derecha los aportes del río Chaschuil – Guanchín, de mayor caudal, que procede desde el oeste. Aguas abajo toma el nombre de río Abaucán y más al sur, en la zona de Anillaco, recibe por su margen derecha, el río La Troya. Continúa el río Abaucán hacia el sur y luego al sureste pasando por Tinogasta y en el extremo norte de la sierra de Copacabana recibe al río de La Costa que procede del sur. Luego de pasar por las localidades de La Puntilla y Copacabana toma el nombre de Salado o Colorado y circula hacia el este en dirección a la depresión de Pipanaco. Para el presente estudio se planteó como objetivo realizar un inventario de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca, con el propósito de su caracterización hidrogeológica e identificación preliminar de las áreas potencialmente más favorecidas respecto de la

cantidad y calidad de sus recursos para fines agrícolas.

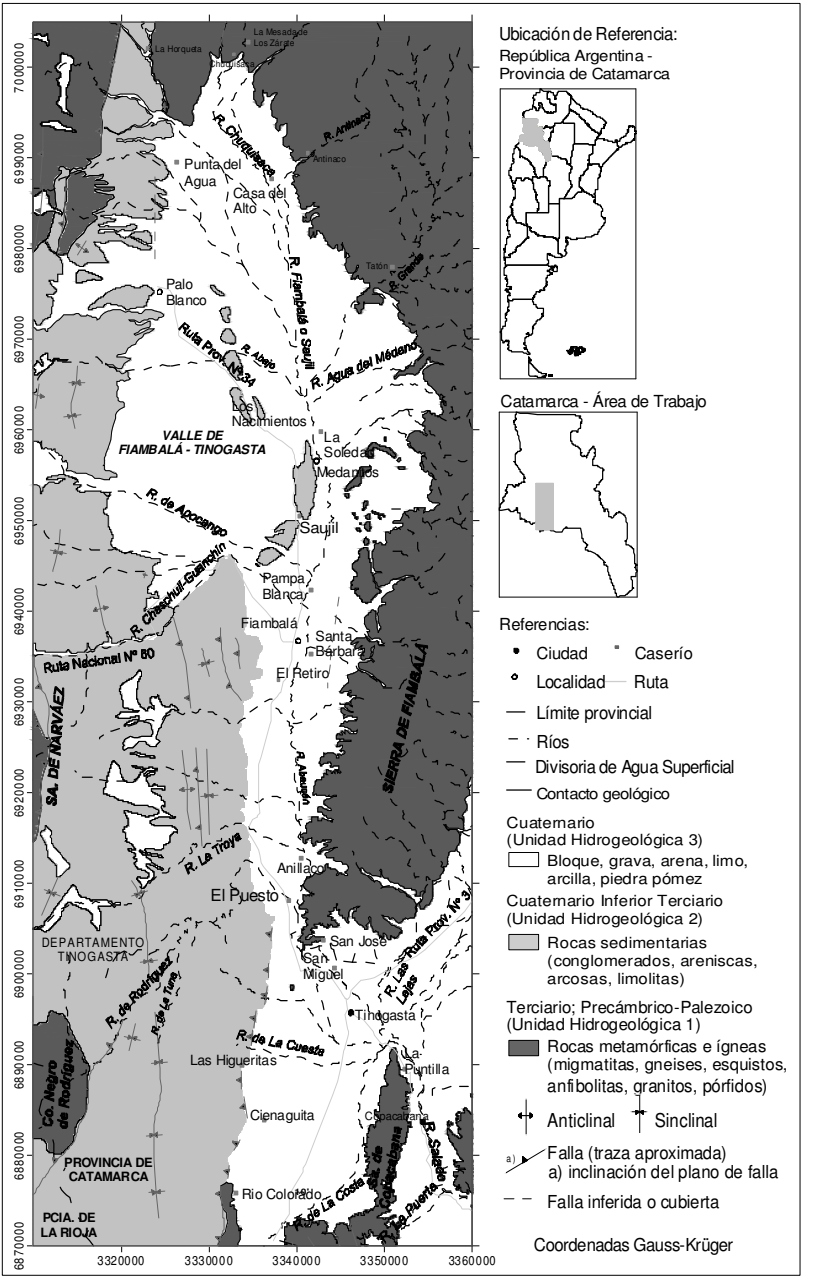


Figura 1. Ubicación y geología del área de estudio.

Material y métodos

La metodología de trabajo empleada comprendió la recopilación y evaluación de los antecedentes disponibles; el relevamiento hidrogeológico de puntos de agua; la prospección geofísica-geológica, el análisis físico – químico de muestras de agua en laboratorio y la integración de niveles de información hidrogeológica de interés en un entorno de trabajo de S.I.G. (Sistema de Información Geográfica).

En el relevamiento hidrogeológico se obtuvo información de 72 puntos de agua subterránea correspondientes a perforaciones, incluyendo las relevadas por Varela (2010). Esta información comprende la identificación del punto de agua, su ubicación, sus características constructivas, el nivel del agua subterránea, el caudal, las mediciones hidroquímicas de campo y el uso del agua. En 50 puntos se extrajeron muestras de agua para análisis físico-químicos de laboratorio, de las cuales 44 corresponden a perforaciones y 6 a fuentes de agua superficial. Los análisis incluyeron la determinación de propiedades físicas y de agregación: Conductividad Eléctrica, pH potenciométrico, Alcalinidad Total, Dureza Total y de No Carbonatos y Sólidos Disueltos Calculados; iones principales: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Carbonato, Bicarbonato, Sulfato y Cloruro; constituyentes inorgánicos menores no metálicos y metales trazas disueltos: Boro, Fluoruro y Arsénico y Nitrato, Nitrito, Amonio, Hierro y Manganeso en algunas de las muestras.

La prospección e interpretación geofísica-geológica definió preliminarmente la geometría de la cuenca sedimentaria portadora de los acuíferos. Se empleó el método geoeléctrico, registrándose un total de 60 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), Figura 2. Se utilizó un resistivímetro digital marca Prakla - Seismos, de 800 Volts de tensión máxima, con una configuración tetrapolar simétrica o configuración Schlumberger. La apertura máxima de las alas de emisión AB fue de 4000 m. En gabinete los SEV fueron procesados mediante el software Resix-Plus V 5.0. Luego se realizó la interpretación relacionando la geología con los datos numéricos de resistividad logrados mediante el método SEV, obteniéndose los cortes geofísico – geológicos de subsuelo.

Resultados

Los diversos terrenos aflorantes en el valle de Fiambalá – Tinogasta se agruparon en tres Unidades Hidrogeológicas, Figura 1. La Unidad Hidrogeológica 1 comprende rocas ígneas y metamórficas (granitos, gneises, esquistos, etc.) del Precámbrico – Paleozoico conocidas como Basamento Cristalino y conforman los relieves montañosos que bordean el valle por el norte, el este y el sur. También corresponderían a esta unidad los reducidos afloramientos de rocas volcánicas de edad Terciaria que afloran en la zona de Río Colorado. En términos hidrogeológicos, esta unidad se considera no acuífera constituyendo el basamento hidrogeológico. La Unidad Hidrogeológica 2 comprende la cubierta de rocas sedimentarias (conglomerados, areniscas, limolitas, etc.) principalmente del Terciario hasta el Cuaternario Inferior que constituyen los afloramientos rocosos que integran las elevaciones que marginan por el oeste el valle de Fiambalá – Tinogasta; en el interior del valle constituyen lomadas entre las latitudes de Saujil y Palo Blanco. Se estima que los terrenos de la Unidad Hidrogeológica 2 pueden contener niveles acuíferos pero estos serían menos importantes o de menor productividad y rendimiento que los acuíferos presentes en los sedimentos asignados al Cuaternario. Además, la presencia de sales en estos terrenos contribuye a la mineralización del agua contenida. La Unidad Hidrogeológica 3 corresponde a los materiales sueltos (bloque, grava, arena, limo - arcilla) de edad Cuaternaria que contienen los acuíferos más importantes explotados en la región.

Se confeccionó un mapa de isopiezas en sectores de la cuenca con información, identificándose el sentido regional de flujo subterráneo como noroeste –sureste a norte – sur, Figura 2. La recarga a la cuenca de agua subterránea del valle de Abaucán – Colorado está relacionada con las sierras que marginan la depresión, especialmente las del borde occidental por donde egresan los río Chaschuil – Guanchín, La Troya, etc. El agua procedente de las sierras y transportada por los cauces fluviales se infiltra en los sedimentos permeables del piedemonte y se mueve subterráneamente hacia la parte mas baja del valle donde escurre en dirección al sur y finalmente egresa del área de estudio por la zona de La Puntilla – Copacabana.

Siguiendo la cuenca en sentido norte – sur, la profundidad del nivel de agua subterránea en la zona de Los Nacimientos – Medanito – Saujil varía entre 0 m y 10 m; en Fiambalá está comprendida entre unos 35 m y 84 m; en Anillaco – El Puesto es inferior a los 16 m; en Tinogasta se ubica entre los 26 m y 106 m y finalmente en Copacabana varía entre 6 m y 23 m de profundidad. En la zona de Saujil y El

Puesto existen algunos pozos con nivel piezométrico elevado sobre la superficie del terreno (pozos surgentes).

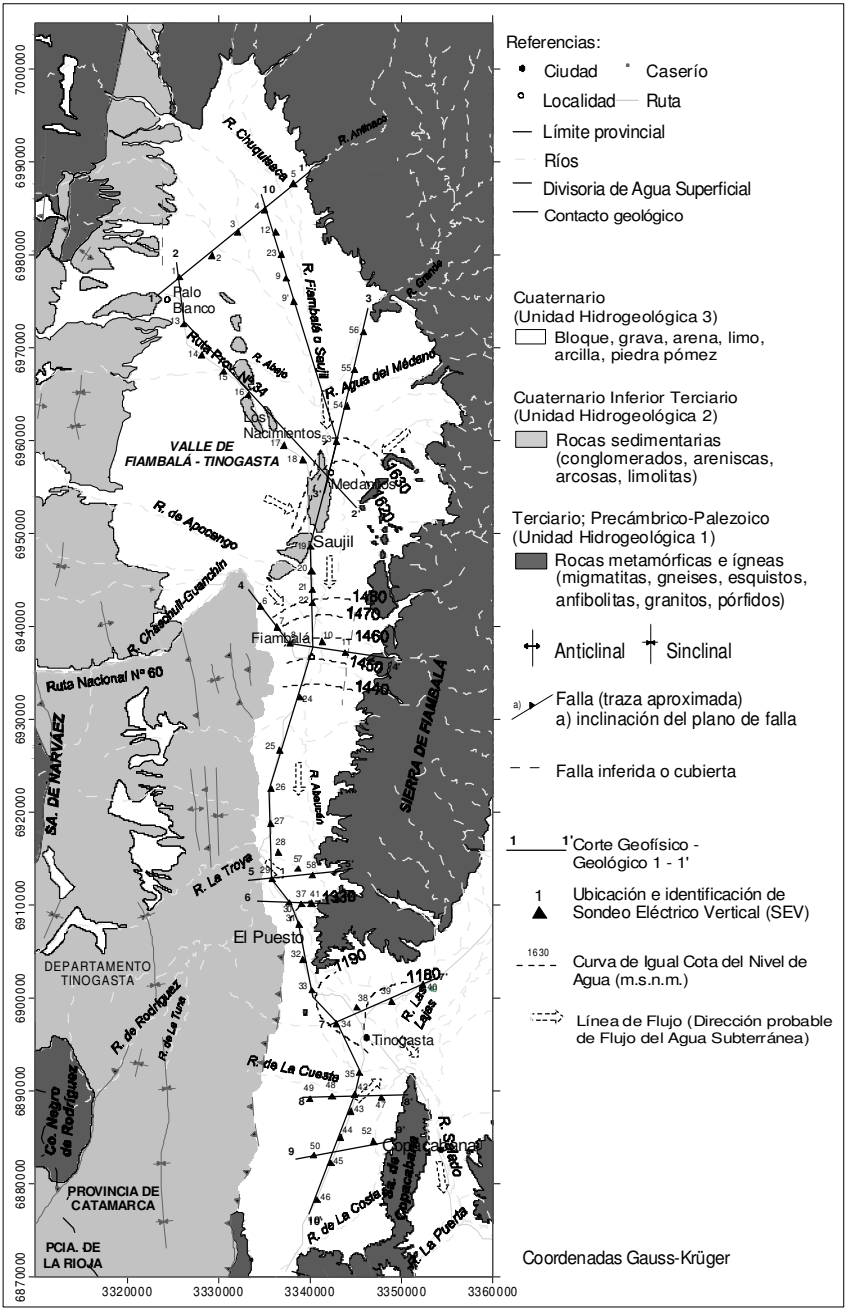


Figura 2. Ubicación de SEV, cortes geofísico – geológicos e Isopiezas (Año 2010).

Como resultado de la interpretación geofísico-geológica se diferenciaron en el subsuelo, desde abajo hacia arriba, las siguientes unidades: Basamento Resistivo; Relleno Conductivo y Relleno Resistivo. El Basamento Resistivo es una capa eléctrica cuya resistividad varía entre 100 ohm.m hasta unos 3000 ohm.m; se pudo detectar en la mayoría de los SEV y se correlaciona con la Unidad Hidrogeológica 1. La menor profundidad a la que se localiza es del orden de los 80 m - 90 m en Anillaco y aguas abajo de El Puesto, mientras que las profundidades mayores superan los 500 m en las zonas localizadas al norte de Medanitos y en Tinogasta – San Miguel. Las rocas que integran esta unidad poseen porosidad y permeabilidad secundaria debido a las fracturas (fallas y diaclasas) que las afectan, donde el agua puede ser almacenada y circular pero a los fines prácticos y con criterio económico, se consideran no acuíferas y constituyen el basamento hidrogeológico. El Relleno Conductivo presenta valores de resistividad más frecuentes comprendidos entre unos 10 ohm.m y 30 ohm.m y geológicamente se correlaciona con la Unidad Hidrogeológica 2.

Fue detectado en la mayoría de los SEV registrados constituyendo un paleorelieve irregular desde una posición aflorante – subaflorante al noroeste y suroeste de Saujil – Medanitos hasta profundidades máximas del orden de los 360 m al norte de Medanitos; al sur de Fiambalá y al norte de Tinogasta. El Relleno Resistivo incluye capas eléctricas con resistividades más frecuentes entre unos 20 ohm.m y más de 2000 ohm.m y geológicamente se correlaciona con los terrenos de la Unidad Hidrogeológica 3. Presenta una zona superior de materiales no saturados (entre unos 120 ohm.m y más de 2000 ohm.m) y una zona inferior de terrenos saturados con los acuíferos más importantes para ser explotados en el área (principalmente valores de 24 ohm.m a 290 ohm.m). La cuenca sedimentaria rellena por los materiales cuaternarios de la Unidad Hidrogeológica 3, presenta espesores variables dentro del valle de Fiambalá – Tinogasta. Al norte de Medanitos, en la parte central del valle, se interpretaron espesores máximos de unos 360 m. En Medanitos – Los Nacimientos se origina el escurrimiento superficial del río Fiambalá a partir de la descarga o emergencia natural de agua subterránea; fenómeno éste debido a la reducción de la sección de paso del flujo de agua subterráneas procedente del norte del valle. La zona de Fiambalá, Figura 3, presenta un importante desarrollo de relleno cuaternario portador de acuíferos que son explotados actualmente por los pozos de la región. El espesor total es del orden de los 220 m a 260 m y cabe mencionar el pozo 15 de la Empresa Frutos de Fiambalá de 162 m de profundidad que tiene sus unidades filtrantes distribuidas entre los 78 m y 150 m y extrae un caudal de 253 m^3/h con un rendimiento específico de 27.8 m^3/h/m.

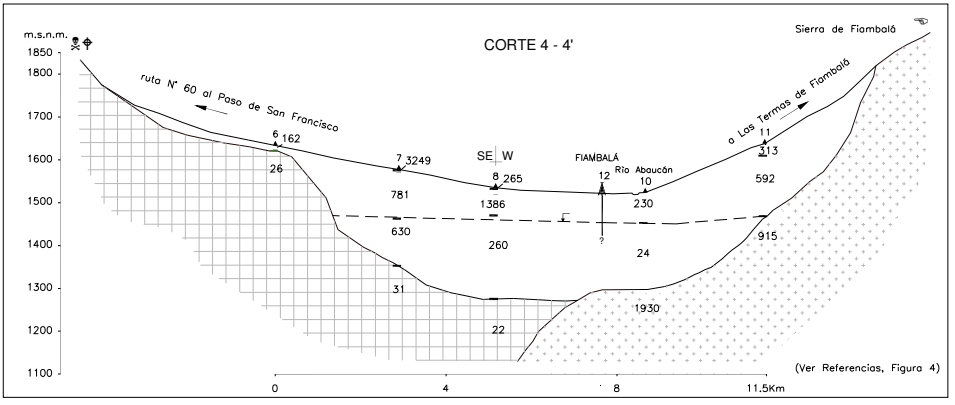


Figura 3. Corte geofísico – geológico 4 -4'.

En la zona de Anillaco – El Puesto, Figura 4, se registraron espesores máximos de la Unidad Hidrogeológica 3 del orden de los 200 m. Los acuíferos contenidos son explotados por pozos cuyas profundidades llegan a superar los 160 m y extraen caudales que alcanzan los 350 m^3/h con rendimientos específicos de 18 m^3/h/m.

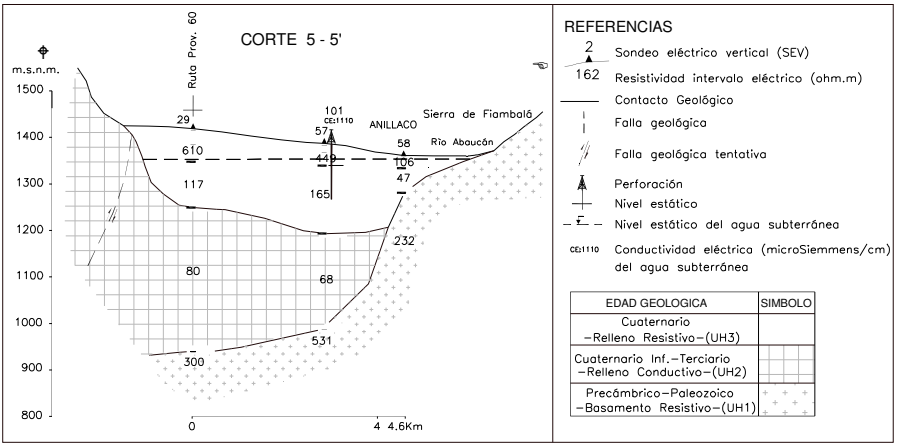


Figura 4. Corte geofísico – geológico 5 -5'.

En la región de El Puesto la Dirección Nacional de Geología y Minería perforó varios pozos; el de mayor profundidad atravesó 197.5 m de relleno sedimentario cuaternario y un solo pozo tiene características de surgente con un nivel máximo de surgencia de 3.10 m sobre el nivel del terreno para el acuífero más profundo ensayado (entre 137.3 m y 144 m de profundidad). En la región de Tinogasta, Figura 5, se verifica un incremento en el espesor de la cuenca de agua subterránea, con un máximo de aproximadamente 300 m. Los pozos tienen profundidades de unos 260 m y extraen caudales del orden de los 200 m^3/h con un rendimiento específico de 20 m^3/h/m.

En la zona Las Higueritas – Cieneguita que corresponde al ambiente hidrogeológico desarrollado al oeste de la sierra de Copacabana, los espesores máximos de relleno cuaternario interpretado son de unos 160 m.

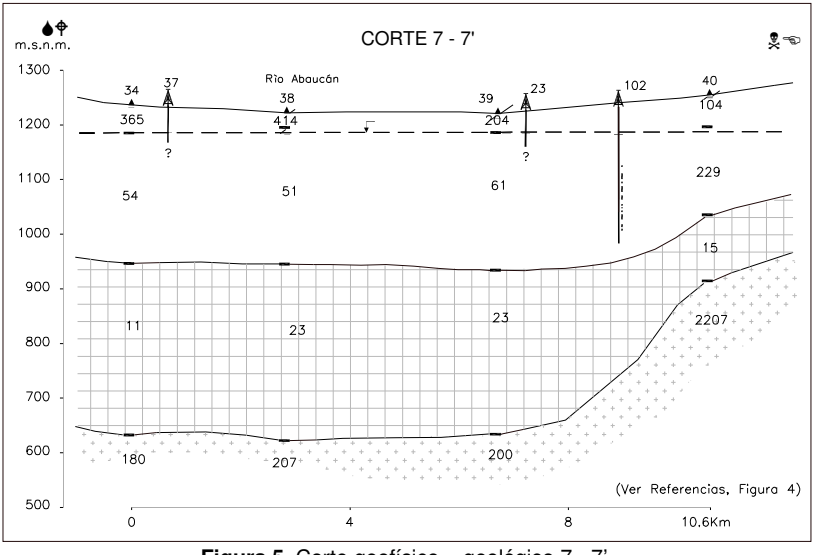


Figura 5. Corte geofísico – geológico 7 -7'.

El agua de los pozos muestreados en Medanitos - Saujil presenta una salinidad variable entre 450 y 880 µS/cm; el pH es de 7.7 a 8 unidades y tiene características sódicas bicarbonatadas a bicarbonatadas sódicas. El tenor de Fluoruro esta comprendido entre 0.3 y

0.7 mg/l y el de Boro varía entre 0.08 y 0.85 mg/l. El Arsénico alcanza un valor de 0.003 a 0.013 mg/l.

Aguas abajo, en la zona de Fiambalá, el agua es de características sódicas bicarbonatadas; presenta una salinidad superior, variando la conductividad eléctrica entre 810 µS/cm y 985 µS/cm y el pH está comprendido entre 7.6 y 7.7 unidades. El Nitrato presenta una concentración que varía de 2.1 a 6.1 mg/l; el Fluoruro entre 0.8 y 1.3 mg/l y el Boro entre 0.65 y 1.30 mg/l. El contenido de Arsénico es variable entre 0.014 y 0.020 mg/l.

En la región de Anillaco – El Puesto, las muestras de agua analizadas presentan una salinidad variable entre los 752 µS/cm y 1560 µS/cm y el pH es claramente básico o alcalino con valores que varían entre 7.9 y 8.0 unidades.

El Nitrato varía entre 1.7 y 2.9 mg/l; el Fluoruro entre 0.4 y 1.4 mg/l; el Boro oscila entre 0.5 y un máximo de 2.6 mg/l y el tenor de Arsénico está comprendido entre 0.008 y 0.023 mg/l. El tipo de agua de esta zona es principalmente sódica bicarbonatada y menos frecuente sódica bicarbonatada sulfatada, sódica sulfatada y sódica clorurada.

En la región de Tinogasta la salinidad total del agua varía entre1140 µS/cm y 2820 µS/cm; es decir aumenta respecto a los valores determinados aguas arriba de la cuenca y también aumenta el contenido relativo de cloruros. En la mayoría de las muestras analizadas el agua es de características sódica clorurada. El pH está comprendido entre 7.1 y 7.9 unidades, el tenor de Nitrato varía entre 1.3 y 24 mg/l, el Fluoruro entre 0.6 y 1.5 mg/l, el Boro entre 0.66 y 3.5 mg/l y el Arsénico entre 0.010 y 0.014 mg/l.

Finalmente, en la zona de Copacabana al agua alcanza los mayores valores de salinidad, variando entre 853 µS/cm y 3400 µS/cm y el pH entre 7.10 y 7.80 unidades. El agua es de características sódica clorurada y solo en dos casos es sódica sulfatada. El contenido de Fluoruro está comprendido entre 0.8 y 2.5 mg/l; el Boro entre 0.52 y 2.9 mg/l y el Arsénico (no analizado en todas las muestras) entre 0.002 y 0.006 mg/l y en tres muestras no fue detectado.
En función de los parámetros analizados, el boro y arsénico generalmente supera los niveles guía establecidos por el Código Alimentario Argentino para consumo humano. En la zona de Copacabana existen casos donde además también supera los niveles guía el tenor de sulfato, cloruro, sólidos disueltos totales y fluoruro. En Anillaco – El Puesto y en la zona de San Miguel – Tinogasta se detectaron en algunos casos tenores de nitrito y/o amonio que indican una contaminación reciente

La salinidad del agua de los 6 ríos muestreados varía entre 640 µS/cm y 1290 µS/cm para los ríos Fiambalá y Chaschuil respectivamente. La concentración de arsénico en el río Chaschuil es de 0.420 mg/l y resulta la mayor de todas las fuentes superficiales y subterráneas analizadas.

Para la identificación de las áreas más favorecidas en sus condiciones hidrogeológicas, Figura 6, se establecieron como condiciones una conductividad eléctrica menor a 2250 µS/cm (considerada como salinidad máxima aceptable para el uso de agua subterránea para riego) y la presencia de un espesor de sedimentos cuaternarios saturados igual o superior a 100 m. Debe señalarse que corresponde considerar otros indicadores hidroquímicos tales como RAS (Relación de Adsorción de Sodio), CSR (Carbonato de Sodio Residual) y contenido de Boro, para la valoración de posibilidades de riego de cultivos en particular.

Conclusiones

Se reconocen en el área de estudio tres Unidades Hidrogeológicas. La Unidad Hidrogeológica 1 comprende rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrico – Paleozoico – Terciario, que conforman los relieves montañosos que bordean el valle por el norte, este y sur, y constituyen el basamento hidrogeológico. La Unidad Hidrogeológica 2 son rocas sedimentarias principalmente del Terciario hasta el Cuaternario Inferior; constituye los afloramientos que integran las elevaciones que marginan por el oeste el valle y algunas lomadas interiores. Podrían contener niveles acuíferos pero de menor productividad y rendimiento que los presentes en los sedimentos del Cuaternario. La Unidad Hidrogeológica 3 está integrada por materiales sueltos (bloque, grava, areno, limo –arcilla) de edad Cuaternaria que contienen los acuíferos más importantes explotados en la región. La profundidad medida del nivel de agua subterránea es máxima en el sector centro y sur del valle (Fiambalá y Tinogasta) con 26 m a 106 m; mientras que en el sector norte (Los Nacimientos, Medanitos, Saujil) es inferior a los 10 m ; en Anillaco – El Puesto es inferior a los 16 m; en el sector sur (Copacabana) se ubica entre 6 m y 23 m y existen casos de pozos surgentes en la zona de Saujil y El Puesto.

Los pozos relevados extraen caudales que llegan a superar los 250 a 300 m^3/h y poseen rendimientos de hasta 28 m^3/h/m. La salinidad del agua subterránea aumenta en el sentido general de escurrimiento superficial norte – sur, el cual también se asume como probable para el flujo de agua subterránea. El intervalo de salinidades está comprendido entre un mínimo de 450 µS/cm en Medanitos - Saujil y un máximo de 3400 µS/cm en la zona de Copacabana. Es de característica sódica bicarbonatada en el sector norte y centro y sódica clorurada en el sector centro – sur y sur de la cuenca de agua subterránea.

Las áreas identificadas en los sectores norte, centro y centro – sur del valle son las más favorecidas en su condición hidrogeológica cumpliendo las condiciones de espesor de sedimentos cuaternarios saturados igual o superior a 100 m y conductividad eléctrica del agua subterránea menor a 2250 µS/cm considerada como la salinidad máxima aceptable para el uso de agua subterránea para riego. Tal identificación resulta de interés particular para el área identificada como favorable al norte del valle e inmediatamente al oeste de la lomas de Saujil y que actualmente no se encuentra explotada en su recurso de agua subterránea.

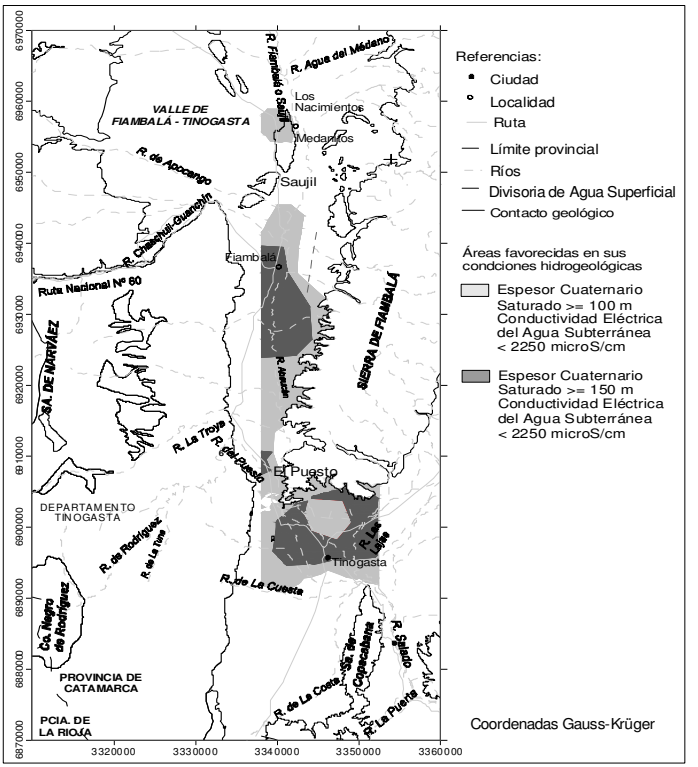


Figura 6. Ubicación de áreas favorecidas en sus condiciones hidrogeológicas.

Referencias

Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos; Gobierno de Catamarca, 2010. Antecedentes hidrogeológicos de perforaciones.

Fauqué, L., Caminos, R. 2006. Hoja Geológica 2969 – II Tinogasta, (Provincias de La Rioja, Catamarca y San Juan). Escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino.

Rubiolo, D., Seggiaro, R., Hong, F., Martínez, L., González, O. Hoja Geológica 2769 – IV Fiambalá, (Provincias de Catamarca y La Rioja). Escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino (Inédita).

Varela, N. 2010. Relevamiento Hidrogeológico de perforaciones en el valle de Fiambalá – Tinogasta. Provincia de Catamarca.

Caracterización hidrogeológica de la ciudad de Río Tercero y entorno rural, Córdoba

David Palacio[1,2], Mario Aguirre[1] y Héctor Frontera[1]

[1] Cátedra de Hidrogeología, Dpto. de Geología Aplicada, F.C.E.F y N, U.N.C. Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba.
[2] Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba. H. Yrigoyen 401, Córdoba.
mail de contacto: davidhpalacio@gmail.com

RESUMEN

La zona de estudio incluye la ciudad de Río Tercero y su entorno rural, abarcando un área de 434 km^2. En la zona se emplaza el polo industrial más importante de la provincia, que se abastece del recurso hídrico subterráneo como la población urbana y rural. El sistema subterráneo es de carácter multiacuífero. Se reconocen dos unidades hidrogeológicas principales: la superior contiene el nivel freático y se extiende hasta los 85 a 100 m de profundidad; y la inferior con cierto grado de confinamiento. Hay diferencias significativas entre la calidad del agua de ambas unidades particularmente en la zona urbano – industrial; donde el acuífero freático ha sido antrópicamente afectado, evidenciado por la presencia de aguas del tipo cloruradas inmersas en un área de aguas bicarbonatadas asociadas a la faja fluvial. Los resultados obtenidos permiten concluir que existe una estrecha relación entre la geomorfología, dinámica y calidad del agua subterránea.
Palabras clave: Hidrogeología, Hidroquímica, Geomorfología, Río Ctalamochita.

ABSTRACT

The study area includes the city of Rio Tercero and its rural surroundings, covering an area of 434 km^2. In the region stands the main industrial area of the province, which supplies groundwater resource as the urban and rural population. The system consists of multiple aquifers. Two main hydrogeological units are reconigzed: the top units contains the water table aquifer and extends to the 85-100 m depth. And the lower one with a certain degree of confinement. There are significant differences between the water quality of both units in the urban-industrial area, where the phreatic aquifer has been anthropogenically affected, evidenced by the presence of chloride-type water immersed in a bicarbonate type area, associated with the river. There is a close relationship between the geomorphology, dynamics and groundwater quality.
Keywords: Hydrogeology, Hydrochemical, Geomorphology, Río Ctalamochita

Introducción

La zona de estudio se ubica en el centro de la provincia de Córdoba (departamento Tercero Arriba) entre las coordenadas geográficas: 32° 06´ y 32° 15´ latitud Sur y 64° 15´ y 64° 00´ longitud Oeste, abarcando un área de 434 km^2 (Figura 1).

El área estudiada incluye a la localidad de Río Tercero en el sector central. Las actividades socio-económicas más importantes que se desarrollan son: la industrial (petroquímicas) en el área urbana, la agricultura en el sector rural (Cultivos de soja, maíz, entre otros) y en forma subordinada la ganadería. Para sustentar estas actividades y para los restantes usos, los habitantes del área se abastecen exclusivamente del recurso hídrico subterráneo.

El agua proveniente del acuífero freático es la más importante ya que es la utilizada por la mayor parte de los habitantes rurales de la zona, aun desconociendo en algunos casos su calidad.

El agua de los acuíferos semiconfinados y confinados es usada en el ámbito urbano de Río Tercero, especialmente por las industrias petroquímicas y la Cooperativa que presta el servicio de agua potable a la población de la ciudad, procedente de una serie de perforaciones profundas que captan agua de capas acuíferas ubicadas entre 100 y 200 m, y que poseen cierto grado de confinamiento.

El objetivo del presente trabajo es avanzar en el conocimiento de las características hidrogeológicas del área, a fin de determinar los condicionantes que influyen en la dinámica y calidad del agua subterránea.

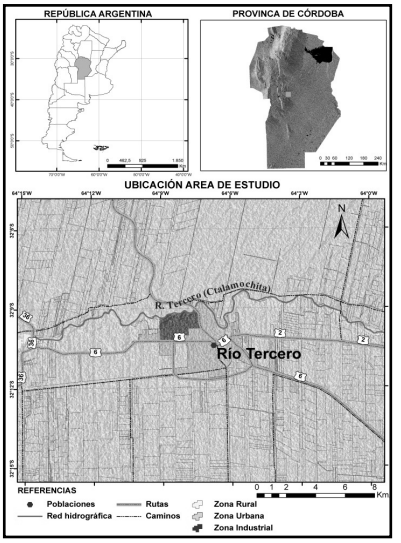


Figura 1. Localización del área de estudio

Metodología de Trabajo

En primera instancia se llevó a cabo una minuciosa recopilación de antecedentes, tanto bibliográficos como de información hidrogeológica específica consistente en registros de perforaciones, perfilajes eléctricos, entre otros.

En tareas de gabinete, se identificaron las perforaciones y pozos a muestrear en función de la delimitación del área de estudio definida y siguiendo un criterio de uniformidad en la distribución de las muestras.

Una vez definidos los puntos se planificaron las campañas de muestreo o censo de pozos, donde se relevaron las características técnicas de las captaciones, mediciones de nivel piezométrico, toma de muestra para análisis físico – químico, uso del agua y descripción del entorno inmediato.

Se relevaron más de 180 perforaciones y se procesaron aproximadamente 1500 análisis físico –químicos entre información existente y generada, lo que permitió la elaboración de una base de datos, con la cual se han realizado mapas hidrodinámicos, hidroquímicos, de aptitud de uso, entre otros. Por otra parte, se confeccionó un mapa geomorfológico en base a imágenes satelitales y corroboración en campo.

Las determinaciones físico – químicas se realizaron en el laboratorio de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

Durante el lapso de tiempo que duró el estudio, se presenciaron las tareas de ejecución de varias perforaciones, realizadas entre los años 2010 a 2012; en donde se recolectaron y analizaron recortes de perforación, perfilajes eléctricos y análisis físico – químicos.

En la realización de los mapas de aptitud de uso del agua, se tomaron como base: para consumo humano, el Código Alimentario Argentino (CAA); para ganadería, la clasificación de Bavera (2001), y para riego, se utilizó la clasificación de FAO (Ayers y Westcott, 1985)) que se considera más adecuada, dado que tiene en cuenta que aguas de muy baja salinidad (por debajo de 200 µS/cm) pueden originar problemas de infiltración debido a que tienden a lavar las sales solubles del suelo especialmente el calcio. Sin embargo, se presenta también la clasificación de Riverside (Richards, 1954) porque es muy usada en el país, aunque el riesgo de sodificación en función de la salinidad del agua es considerado en forma inversa.

Descripción del Entorno de Trabajo

Geología y Geomorfología

Hacia occidente, fuera del área de estudio, afloran los complejos ígneos-metamórficos que conforman las sierras de Las Peñas y el extremo sur de la sierras Chicas, constituyendo el basamento de la región y la base de la columna estratigráfica donde se apoyan el complejo sedimentario y volcánico del Grupo Los Cóndores. Por último, se ubican los sedimentos terciarios y cuaternarios, siendo estos los de mayor importancia, ya que componen los principales acuíferos de la zona.

Los sedimentos aflorantes, hacia el norte y sur del área de estudio, son principalmente loess (de texturas franco arenosa fina) de espesores variables, con cementaciones localizadas de carbonato de calcio (tosca) e intercalaciones de limos arcillosos y paleosuelos; incrementándose la presencia de materiales gruesos relacionados a los depósitos recientes del río hacia las proximidades del mismo. En el extremo centro oeste del área de estudio se encuentran pequeños afloramientos basálticos de edad cretácica.

Geomorfológicamente la zona se encuentra inmersa en un ámbito de planicie de agradación eólica característico de gran parte de la llanura oriental de la provincia de Córdoba, modificada por el paleoabanico aluvial del río Ctalamochita. En este contexto el ambiente fluvial, por pulsos climáticos y/o procesos de neotectónica,

presenta tres niveles principales de terrazas: el nivel superior antiguo, nivel medio (sub-reciente) y el nivel inferior reciente (Figura 2).

El desarrollo lateral y en profundidad del paleoabanico aluvial del río, junto a la sedimentación reciente y subreciente del mismo, definen en profundidad las características hidrogeológicas de las distintas unidades acuíferas para el área de estudio y las condiciones químicas del agua subterránea.

Hidrogeología

Dinámica del Agua Subterránea

El sistema subterráneo es de carácter multiacuífero; los sedimentos permeables son difícilmente correlacionables entre las distintas perforaciones debido a su escaso desarrollo areal, por lo que se intentó diferenciar en subsuelo la presencia de distintas unidades hidrogeológicas, que se asumen como espesores sedimentarios con características hidrogeológicas propias.

Los límites en profundidad de estas unidades hidrogeológicas son aún imprecisos, debido a los escasos datos hidráulicos y sedimentarios con que cuentan las perforaciones relevadas; por lo que se definieron de forma estimativa y están sujetos a revisión.

Se diferencian dos unidades hidrogeológicas (Figura 3):

La unidad superior que contiene el nivel freático o libre, y se extiende hasta aproximadamente los 85 a 100 m de profundidad, posee un predominio de sedimentos gruesos con respecto a la unidad subyacente. Los niveles acuíferos podrían tener carácter de semiconfinados. Esta unidad aporta rendimientos específicos significativos y generalmente mayores a la unidad infrayacente que pueden superar los 30-55 m^3/h/m.

La unidad inferior, con predominio de sedimentos más finos, aporta rendimientos específicos menores rondando los 10 m^3/h/m como rendimientos máximos y con valores normales menores a 5 m^3/h/m. Los niveles acuíferos pueden tener carácter de confinados debido a la existencia de importantes espesores de materiales arcillosos que actuarían como niveles acuícludos.

De acuerdo a los datos físico – químicos recabados y procesados, se observan variaciones importantes entre las características físico-químicas de las aguas de las dos unidades hidrogeológicas definidas, principalmente en las áreas fabriles y urbanas debido al mayor nivel de confinamiento de los niveles permeables de la unidad inferior, que normalmente no se encuentran influenciados por las aguas antrópicamente afectadas de los niveles acuíferos superiores.

La dirección dominante del flujo subterráneo es Oeste - Este, observándose un comportamiento mixto en relación al río Ctalamochita; con una estrecha relación entre el río y las dos unidades hidrogeológicas superior e inferior. Las curvas de la Figura 4, muestran como el río Ctalamochita es de carácter mixto, en algunos tramos es influente, en otros es efluente, dependiendo que tramo de margen se considere. Sin duda estas variaciones, también dependen del nivel (caudal) que presente el río en el momento considerado.

Son para destacar las anomalías que presenta el flujo subterráneo en la zona urbana e industrial, debido a la intensa explotación del acuífero libre (Figura 4).

Por otra parte, se observa que las menores profundidades del nivel freático se encuentran asociadas a la faja fluvial del río Ctalamochita, aumentando hacia el Norte y Sur, con valores máximos de 80 a 87 m al Norte del área de estudio.

Hidroquímica

El acuífero freático presenta variaciones en sus características químicas, las cuales se encuentran condicionadas por la geomorfología. Las aguas más dulces (Conductividad Eléctrica (CE) <1500 µS/cm) se hallan asociadas a la faja fluvial del río Ctalamochita, mientras que las aguas más saladas (CE>1500 µS/cm) se ubican donde predominan los sedimentos loéssicos, relacionados a un ambiente eólico (Figura 5).

En la Figura 5, se observan varias zonas diferenciadas en cuanto a la conductividad eléctrica del agua de la unidad superior. Existe una amplia zona con valores bajos de conductividad asociada directamente al río Ctalamochita. En tanto, hacia ambas márgenes del río aparecen zonas con conductividad creciente. Es de destacar que dentro del área urbana, en la unidad hidrogeológica superior, se encuentran valores de conductividad eléctrica elevada con zonación concéntrica, producto de la actividad antrópica.

En la zona sur, se puede establecer que, coincidente con el área urbana, las zonas se estrechan pasando en un corto espacio de valores bajos de conductividad a valores que superan los límites de potabilidad; y dentro de esto, se desarrolla una zona de alta conductividad con tendencia a conformar una cuña dentro de las otras zonas de menor conductividad eléctrica.

Considerando el mapa de facies hidroquímicas de la Figura 5, se diferencian tres tipos fundamentales de agua: bicarbonatadas, sulfatadas y cloruradas.

El agua del río Ctalamochita, en los distintos puntos de muestreo, presenta aguas de tipo bicarbonatada al igual que el agua subterránea en el ámbito de influencia del río; lo que confirma la relación hidroquímica entre ambas.

A medida que aumenta la distancia hacia el norte o el sur aparecen aguas de características sulfatadas, indicio que pertenecen a familias hidroquímicas diferentes.

Coincidente con el área urbana aparece una zona de aguas cloruradas producto de la alteración antrópica urbana e industrial, que va acompañada por un incremento en la salinidad total.

Calidad y Aptitud de Uso del Agua Subterránea

En las tablas 1 y 2 se presentan los estadísticos descriptivos para las variables analizadas, las que permitieron establecer la aptitud de uso del recurso hídrico subterráneo para consumo humano, ganadero y riego.

El agua captada desde el acuífero freático resultó en un 59.60 % no apta para consumo humano, por sobrepasar los límites establecidos por el C.A.A para uno o más compuestos presentes en el agua y en un 40.40 % apta. Las restricciones están determinadas por superar los contenidos en sólidos disueltos totales (21.60 %), dureza (25.65 %), cloruros (15.40 %), sulfatos (19.25 %), flúor (3.85 %), nitratos (9.60 %), nitritos (17.95 %), amonio (36.85 %), hierro total (10.50 %) y arsénico (7.70 %).

En relación a la aptitud del agua para consumo ganadero se observa que el 72.55 % es deficiente en sales, el 9.80 % muy buena, el 1.95 % buena, el 5.90 % aceptable, el 3.90 % mala usable y el 5.90 % no apta para tambo e inverne, mientras que para cría el 72.55 % resultó deficiente, el 11.75 % muy buena, el 5.90 % buena, el 3.90 % aceptable, el 3.90 % mala usable y el 2 % condicionada.

Para riego el agua extraída del acuífero libre, según la clasificación de Riverside (Richards, 1954), es buena en un 45.10 %, buena a regular en un 33.35 %, regular a mala 11.75 % e inapropiada en un 9.8 %.

Por otra parte, si se clasifica el agua para riego según FAO, se obtiene que es apta con ligeras restricciones en un 80.40 %, mientras que el 19.60 % restante, resulta no apta por restricciones severas de salinidad o pérdidas por infiltración.

En los casos de los acuíferos confinados más profundos, la calidad para consumo humano resultó en un 91.65 % apta, en tanto que el restante 8.35 % resultó no apta.

Para ganadería los resultados revelan que el agua es deficiente en sales en un 91.65 % y muy buena en un 8.35 % para bovinos de cría, tambo e inverne.

En relación a la aptitud del agua para riego, según la clasificación de FAO, el 100 % de las muestras son aptas. En el caso de clasificarlas según Riverside (Richards, 1954), el 75 % resultó buena, mientras que el 25 % buena a regular.

Conclusiones

Se ha observado, en algunos sectores del área de estudio, que la explotación puntual de los acuíferos de bajo grado de confinamiento, ha producido un ingreso de agua de mayor salinidad proveniente del acuífero freático antrópicamente afectado.

Se ha puesto en evidencia la importante relación entre la hidrogeología y las condiciones geomorfológicas imperantes, principalmente en la transcendencia que ha tenido en la sedimentación el cono aluvial del río Ctalamochita, que se manifiesta claramente con ápice en el dique Piedras Moras y límites probables al norte en la localidad de Villa Ascasubi y al sur Tancacha, Gral. Fotheringam y Hernando. La manifestación en superficie se traduce en profundidad por la presencia de niveles acuíferos fluviales importantes y agua de baja salinidad, relacionada al tipo de agua del río Ctalamochita (bicarbonatadas).

Se pudo confirmar, con cierta precisión, la presencia de dos grandes unidades hidrogeológicas, una **superior** conformada por acuíferos libres y posiblemente semiconfinados; y la **inferior** por acuíferos confinados; la primera hasta profundidades del orden de los 100 m y la segunda por debajo de los 200 m de profundidad.

El río Ctalamochita es de carácter mixto, aguas arriba de la ciudad de Río Tercero es efluente por la margen izquierda y neutro por la derecha; aguas abajo, entre las equipotenciales de 360 y 340 m, la relación es neutra por ambas márgenes; y por debajo de la equipotencial de 340 m, el río pasa a ser levemente influente por ambas márgenes.

Desde el punto de vista hidroquímico, se puede observar una amplia zona de aguas subterráneas de conductividades entre los 300 y 1000 uS/cm, limitada al norte y al sur por zonas de aguas de mayor conductividad que se ubican

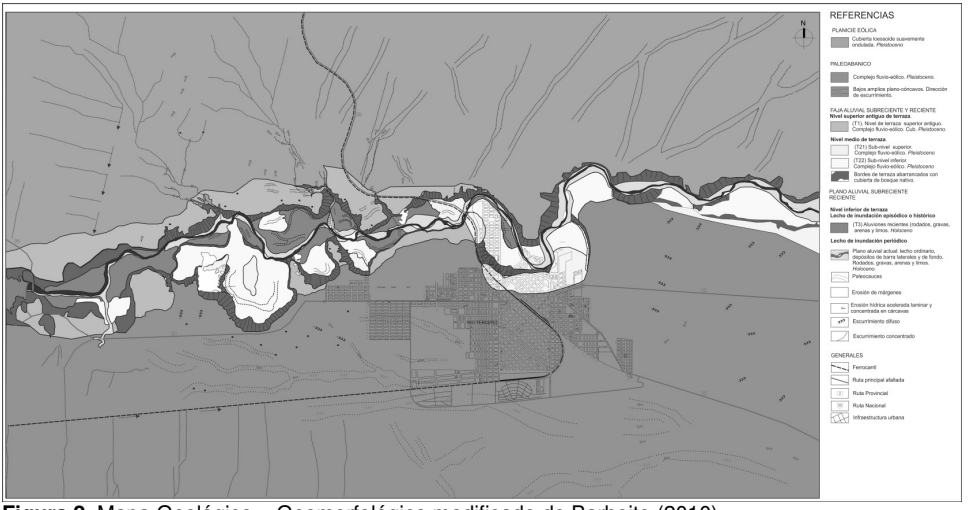


Figura 2. Mapa Geológico – Geomorfológico modificado de Barbeito (2010).

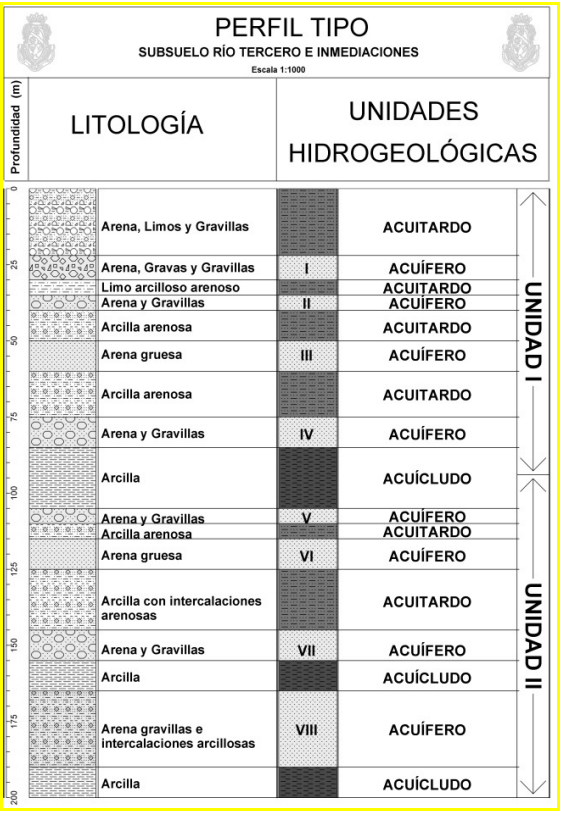


Figura 3. Perfil Tipo del área de estudio.

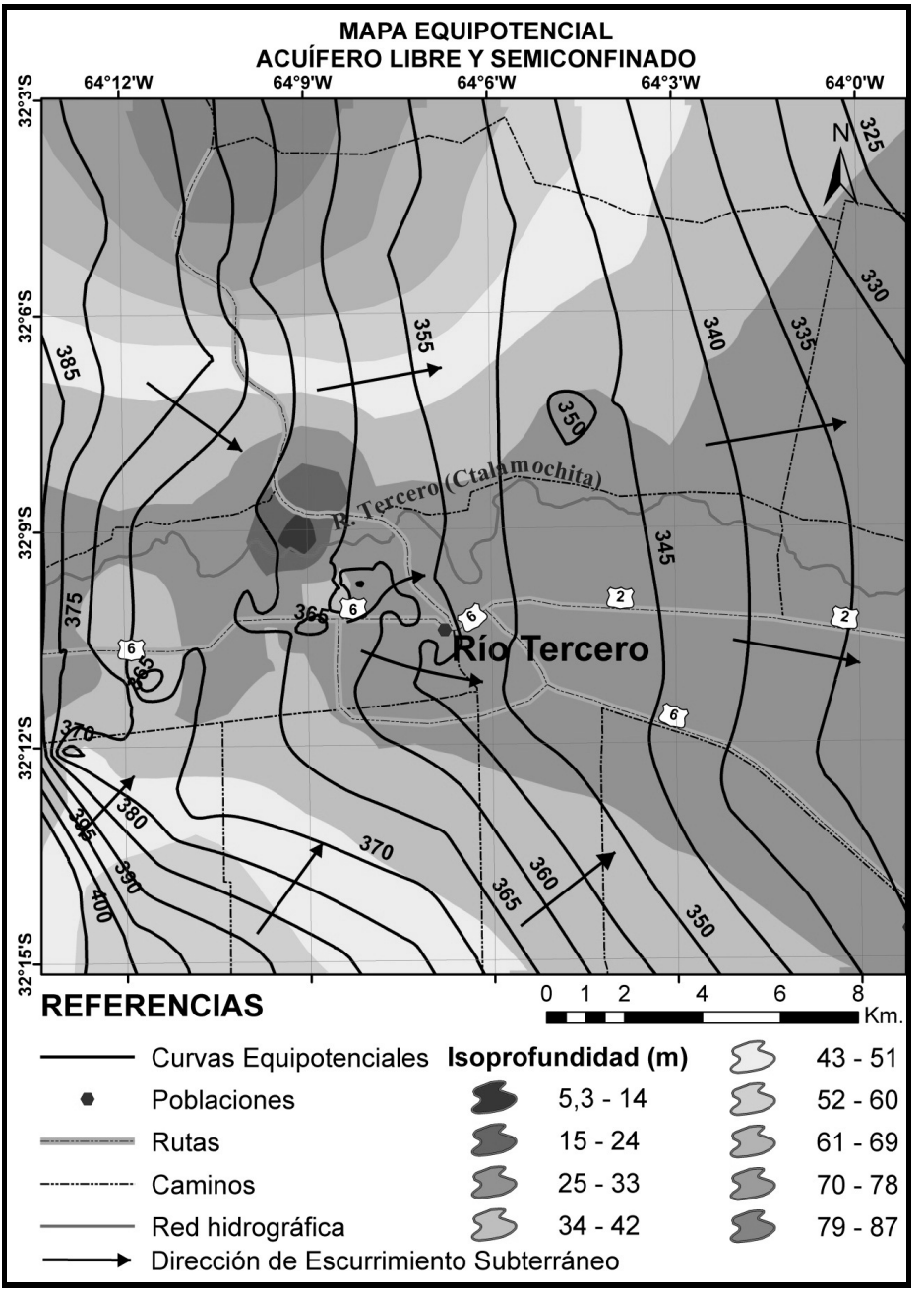


Figura 4. Mapa de curvas equipotenciales, isoprofundidad y dirección de flujo subterráneo del acuífero freático

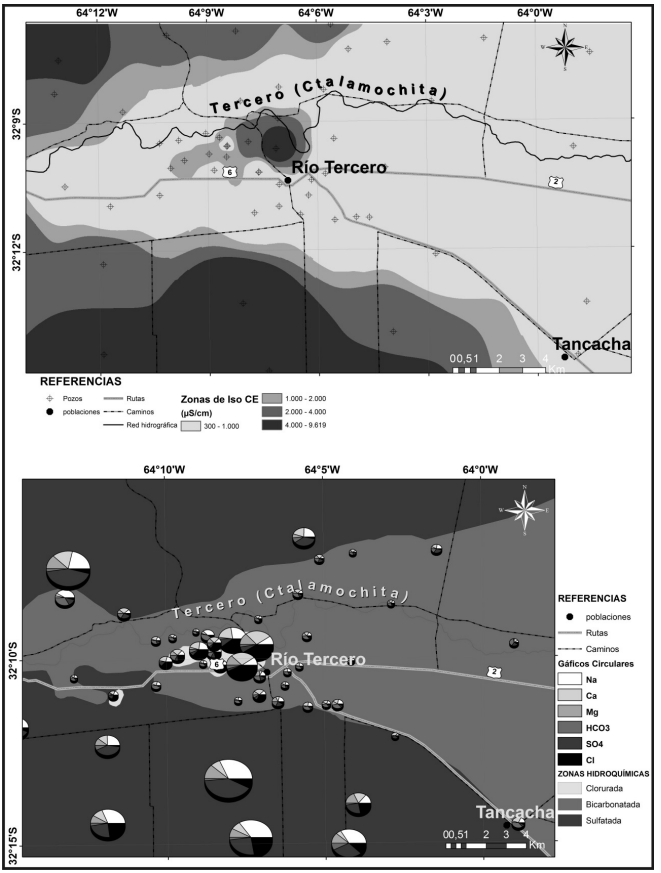


Figura 5. Superior: Mapa de Isoconductividad de los acuíferos de la unidad superior. Inferior: Mapa de Facies Hidroquímicas de los acuíferos de la unidad superior

Tabla 1. Estadísticos descriptivos más importantes de las variables analizadas en el acuífero freático.

Superior	S.D.T (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	Dureza (mg/L)	pH	CO_3H^- (mg/L)	$CO_3^=$ (mg/L)	$SO_4^=$ (mg/L)	Cl^- (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{+2} (mg/L)	Mg^{+2} (mg/L)	As (mg/L)	F (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	Fe_total (mg/L)
Cantidad Muestras	N=51	N=39	N=39	N=52	N=51	N=52	N=52	N=52	N=52	N=52	N=52	N=52	N=52	N=52	N=52	N=39	N=38	N=38
Promedio	1190,8	178,7	352	7,33	214,6	-	426,9	207,6	233	12,1	118	42	0,011	0,51	19,4	0,75	3,63	0,116
Máximo	6734,0	748,0	2390,0	9,50	630,0	156	4443,5	1657,1	2022,2	40,0	584,0	357,3	0,14	6,0	97,0	22,9	80,0	0,8
Mínimo	210,0	38,0	60,0	6,20	46,4	0	7,0	11,0	14,0	3,8	18,4	0,5	0	0,2	0,2	0,0025	0,03	0,025

Tabla 2. Estadísticos descriptivos más importantes de las variables analizadas en el acuífero confinado.

Inferior (N=12)	S.D.T (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	Dureza (mg/L)	pH	CO_3H^- (mg/L)	$CO_3^=$ (mg/L)	$SO_4^=$ (mg/L)	Cl^- (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{+2} (mg/L)	Mg^{+2} (mg/L)	As (mg/L)	F (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	Fe_total (mg/L)
Promedio	449,7	121,5	191,7	7,25	150,6	-	61,3	86,1	56,6	5,5	51,9	14,6	0,005	0,30	11,2	0,0050	0,073	0,048
Máximo	1015	142,0	472,0	7,60	178	-	184,0	336,0	195,0	10,0	128,0	37,0	0,005	0,40	23,0	0,0300	0,20	0,150
Mínimo	205,0	94,0	70,0	6,90	114,7	-	12,0	12,0	25,0	4,0	23,2	1,2	0,005	0,20	2,0	0,0025	0,025	0,025

conformando los límites del abanico aluvial, llegando a valores de 4000 uS/cm. En parte del área urbana se puede observar una isla de alta conductividad presente en la unidad hidrogeológica superior.

Tanto la unidad hidrogeológica superior como la inferior en el ámbito de influencia del río, presentan agua de características bicarbonatadas, similares al río Ctalamochita. Las aguas provenientes de los aportes desde el norte y sur, fuera de la influencia del río, presentan aguas de tipo sulfatadas. En la planta urbana de Río Tercero, aparecen aguas de características cloruradas afectadas antrópicamente.

El avance en el conocimiento de las características hidráulicas y químicas del agua de los acuíferos semiconfinados y confinados, permitirá definir con mayor claridad sus límites en profundidad con respecto al acuífero libre; y aportar datos significativos que permitan desarrollar políticas de gestión y normativas tendientes a preservar sus características y regular su explotación.

Recomendaciones

De acuerdo al análisis de las características hidroquímicas y su distribución areal, es factible planificar adecuadamente la ubicación de futuras perforaciones.

Es necesario que la explotación en las obras de captación, tenga en cuenta las dos unidades hidrogeológicas para que no se produzcan mezclas de agua de las distintas unidades.

Considerando las actividades que se desarrollan en el área y los usos a los que está sometida el agua subterránea, es aconsejable reservar la explotación de la unidad hidrogeológica inferior para consumo humano y destinar la unidad hidrogeológica superior para otros usos.

Es necesario atender a la posible sobreexplotación de los acuíferos para evitar la variación del contenido iónico original.

Del reconocimiento de la dinámica de las aguas subterráneas surge la necesidad de regular las actividades en las inmediaciones del río, teniendo en cuenta el carácter de influente que presenta en algunos sectores.

Agradecimientos

La información con la que se confecciona el presente trabajo es el resultado de la tarea docente, de investigación y transferencia que realizan los integrantes de la Universidad Nacional de Córdoba, en el marco del convenio con la Cooperativa de Obras y Servicios Públicos Ltda. de Río Tercero y a los subsidios de Foncyt (Nación) y Mincyt (Córdoba) aportados a través del PID 35/08 “Dinámica, calidad y reservas de aguas subterráneas de la Provincia de Córdoba: potencialidad para usos productivos y sociales”.

Referencias

Ayers, R.S. y Wetscot, D.W., 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage. Paper 29 Rev. 1, Roma 174 pp

Barbeito, O., 2010. Mapa geomorfológico de Río Tercero y entorno rural. Inédito

Bavera, G. A., 2001. Manual de Aguas y Aguadas para el ganado. Editorial Hemisferio Sur S.A. ISBN 987-43-2856-8. 387 pp.

Código Alimentario Argentino, 1994. Res. 494/94. Boletín Oficial Nº 27.932, 1º sección. Art. 982 modificado.

Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agricultural Handbook 60, 160 p.

Riverside, 1954. U.S.Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. U.S. Departament of Agriculture Handbook N° 60. Washington.

Caracterización de los principales acuíferos de la provincia de Entre Ríos

María Santi[1], Guillermo Bianchi[2] y Graciela Rezzónico[3]

[1] División Aguas Subterráneas, Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos, Córdoba 641, (3100) Paraná, Entre Ríos, Argentina.
[2] Facultad de Ingeniería (UNLP), Calle 1 y 47, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, Argentina.
[3] Consultoría en Ingeniería Hidráulica y Ambiente, Bvard. M. Moreno 265, (3100) Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Mail de contacto: geologamariasanti@gmail.com

RESUMEN

El agua subterránea en Entre Ríos, se extrae para diversos fines, de cuatro acuíferos distribuidos en un área de 61.116 km² y alojados en la parte superior de la columna estratigráfica (Cuaternario y Terciario). Acuífero Paraná, semiconfinado, explotado en el sudoeste de la provincia, con caudales de hasta 100 m³/h, posee limitaciones en la calidad del agua debido al exceso en las concentraciones de dureza, sulfatos, cloruros y sodio. Acuífero Ituzaingó, semiconfinado, explotado en el noroeste de Entre Ríos con caudales de hasta 130 m³/h, tiene buena calidad de agua, limitada en algunos sectores por exceso de sulfatos. Acuífero Salto Chico, semiconfinado, explotado en el sector oriental de la provincia, con caudales de extracción entre 250 y 600 m³/h, posee una muy buena calidad de agua. Acuífero El Palmar, libre, explotado en el borde este provincial, con caudales de hasta 50 m³/h, tiene agua de buena calidad.
Palabras clave: Entre Ríos, Agua subterránea, Acuífero libre, Acuífero semiconfinado.

ABSTRACT

Groundwater in Entre Rios, is extracted for various purposes from four aquifers over an area of 61.116 km² and located at the top of the stratigraphic column (Quaternary and Tertiary). The semiconfined Paraná aquifer used in the southwest of the province, with flow rates up to 100 m³/h, has limitations in water quality due to excessive concentrations of hardness, sulfates, chlorides and sodium. The semiconfined Ituzaingó aquifer used in the northwest of Entre Rios with flow rates up to 130 m³/h, with good water quality, limited in some areas due to excessive sulfates. The semiconfined Salto Chico aquifer used in the eastern part of the province, with extraction volumes between 250 and 600 m³ / h, has a very good quality of water. El Palmar, unconfined aquifer used in the eastern border province, with flow rates up to 50 m³ / h, has good water.
Keywords: Entre Ríos, Groundwater, Semiconfined Aquifer, Unconfined Aquifer.

Introducción

El objeto del trabajo fue determinar el comportamiento hidrogeológico, la cantidad y calidad del agua subterránea, de los cuatro acuíferos utilizados para consumo humano, animal, uso industrial y riego en la provincia de Entre Ríos. La caracterización hidrogeológica se realizó a partir de información relevada en campo a escala 1:100.000 (censo hidrogeológico, muestreo de agua), levantamiento geológico de superficie, y perfiles de perforaciones. El total de fuentes censadas fue de 998, la densidad de censo de un pozo (1) cada 60 km². La cartografía hidrogeológica e hidroquímica original se confeccionó a escala 1: 200.000.

Ubicación

La Provincia de Entre Ríos, forma parte de la Mesopotamia argentina y se encuentra situada entre los 30º 09' y 34º 02´, de latitud sur y entre los 57º 48' y 60º 47´ de longitud oeste. Limita al norte con la provincia de Corrientes, al oeste con la provincia de Santa Fe; al sur con la provincia de Buenos Aires, y al este con la República Oriental del Uruguay. La superficie total es de 78.781 km². Los cuatro acuíferos involucrados se alojan en la parte superior de la columna estratigráfica (Cuaternario y Terciario) y se distribuyen en un área de 61.116 km² (superficie firme). Los 15.964 km² restantes corresponden a islas, ríos, esteros y delta de la provincia (Figura 1).

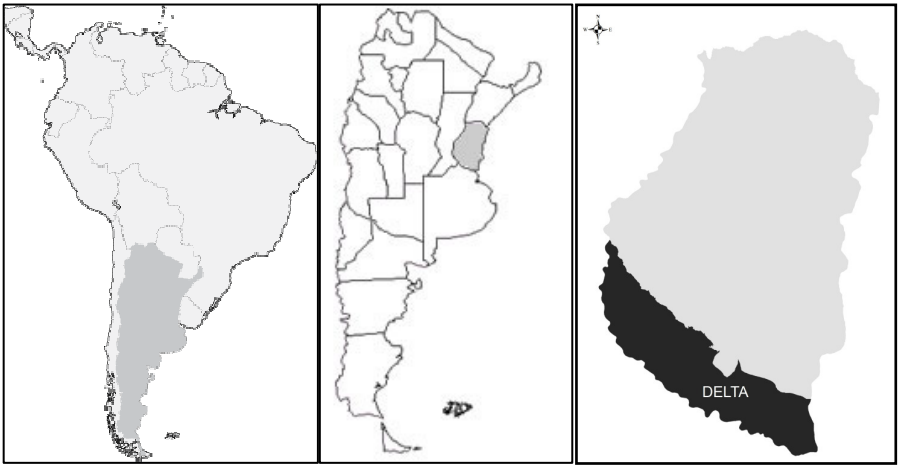


Figura 1. Ubicación de la Provincia de Entre Ríos.

Clima

Para la caracterización climática se emplearon los registros de temperaturas (T) y precipitaciones (P) medias de las Estaciones Agrometeorológicas de Feliciano (Dirección de Hidráulica de Entre Ríos, DHER), Concordia (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA), Paraná (INTA), Lucas González (DHER) y Uruguay (INTA). Para una mejor extrapolación de los resultados a escala regional se emplearon complementariamente las estaciones Gualeguaychú (Servicio Meteorológico Nacional SMN) y Monte Caseros (SMN), provincia de Corrientes).

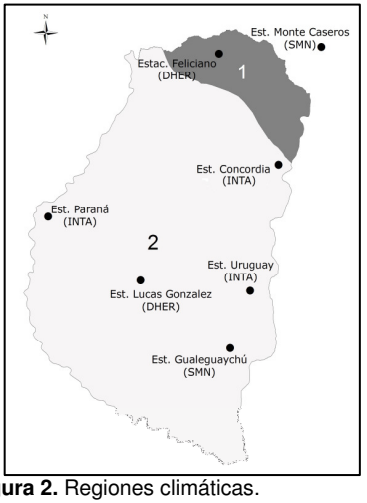


Figura 2. Regiones climáticas.

Se puede establecer que existe homogeneidad en el comportamiento climático de las estaciones más allá de los rasgos distintivos identificados para cada una de ellas con lo cual el clima varía entre cálido y templado, y seco - húmedo y húmedo (Knoche *et al*., 1949). En coincidencia con el análisis precedente, el mapa de las regiones climáticas considera Entre Ríos, una pequeña porción al norte de clima subtropical húmedo de llanura y el resto con clima templado húmedo de llanura (Figura 2).

Geomorfología

Entre Ríos es una llanura suavemente ondulada. Su topografía es ondulada a llana. La máxima altitud sobre el nivel del mar (s.n.m.) es de 119 m. La geomorfología está en función del sustrato, y hay una relación directa entre morfología, hidrología superficial e hidrología subterránea. Se distinguen 7 (siete) regiones geomorfológicas (Iriondo, 1980): 1) Depósitos antiguos del río Paraná o Bañados o bajos del Yacaré: son geoformas fluviales, terrazas, pantanos y bañados y geoformas eólicas (dunas). 2) Superficie Feliciano-Federal: área plana, con morfología eólica, distribuida de manera irregular entre cotas IGN 65 a 70 m. Se destacan dentro del área, los "bañados de altura" en el sector noreste a cota 75 m.s.n.m. Su morfología es plana, sin ningún tipo de pendiente. 3) Faja arenosa asociada al río Uruguay: son terrazas de acumulación dejadas por el río Uruguay y sedimentos de origen eólico 4) Lomadas loéssicas de Crespo: es el área más alta de la provincia (119 m IGN); por

encima de la cota 80 m IGN, la zona está cubierta por una capa de loess de 2 a 4 m de espesor. Conforma un paisaje ondulado a suavemente ondulado 5) Área de Tala: es un área de avenamiento donde los cauces de los arroyos se desarrollan en varias direcciones, sin ningún rumbo preferencial 6) Colinas de Gualeguaychú: son colinas suavemente onduladas. Dentro de esta área, la parte noroeste es más elevada que la sudeste y 7) Complejo deltaico, constituido por varias unidades geológicas que pertenecen a fases de su evolución: fluvial, marina, estuárica y fluvio deltaica (Figura 3).

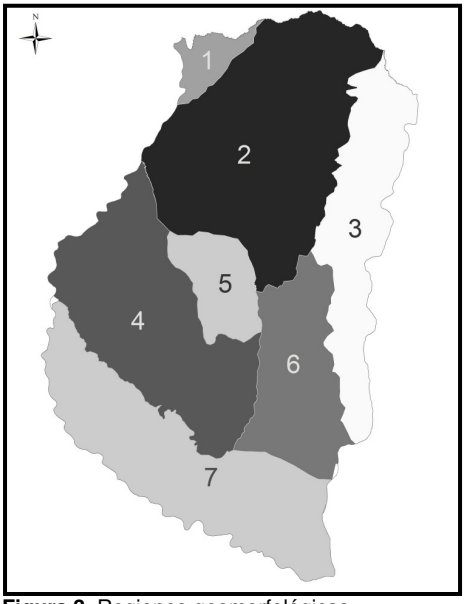


Figura 3. Regiones geomorfológicas.

Suelos

Los suelos en el territorio firme, a nivel de orden son cuatro (INTA, 1979): Vertisoles (1), ocupan un 34,5 % del total provincial y se desarrollan sobre una planicie ondulada a muy suavemente ondulada. Los materiales originarios son limos calcáreos de origen palustre o lacustre. Las características vérticas se refieren a aquellas inherentes al alto contenido de arcillas expandibles. Los Molisoles (2), ocupan un 20 %, se encuentran en una planicie ondulada con pendientes de gradiente elevado; el material madre es el loess. Los Alfisoles (3), equivalen al 11 % y se ubican en áreas altas planas a muy suavemente onduladas del centro y centro norte. Los Entisoles (4), corresponden a un 8%, localizándose a lo largo de la margen derecha del río Uruguay en un ancho variable de 2 a 30 Km. Son suelos arenosos pardos y rojizos. El resto del territorio lo ocupa el complejo deltaico (5) (Figura 4).

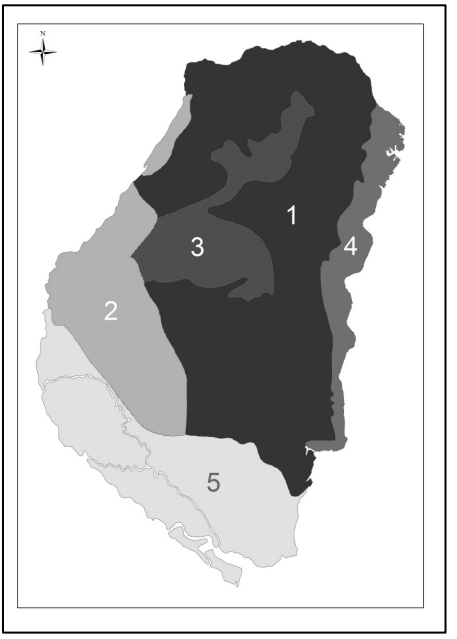


Figura 4. Suelos a nivel de orden.

Aguas superficiales

La Provincia de Entre Ríos se ubica en el tramo inferior de la Cuenca del Plata y se caracteriza por la densidad de su red hidrográfica. Está rodeada por grandes ríos: al Este por el río Uruguay, al Oeste y Sur por el río Paraná; al Norte limita con la provincia de Corrientes de la cual la separan los ríos Guayquiraró, Mocoretá y los arroyos Basualdo y Tunas. Todo el territorio está drenado por un sinnúmero de cursos entre los que se destacan el río Gualeguay, el río Gualeguaychú y los arroyos Feliciano y Nogoyá. Desde el punto de vista hidrogeológico los ríos y arroyos mencionados son las principales vías de descarga de los cuatro acuíferos. Las cuencas hidrográficas son doce (Figura 5): Río Gualeguay (1), Río Uruguay (2), Arroyo Feliciano (3), Río Gualeguaychú (4), Sistema Delta (5), Río Guayquiraró (6), Arroyo Nogoyá (7), Aº Las Conchas (8), Aportes menores al Río Paraná (9), Río Mocoretá (10), Río Paraná (11), Aportes menores al Río Uruguay (12). (Dirección de Hidráulica de Entre Ríos, DHER).

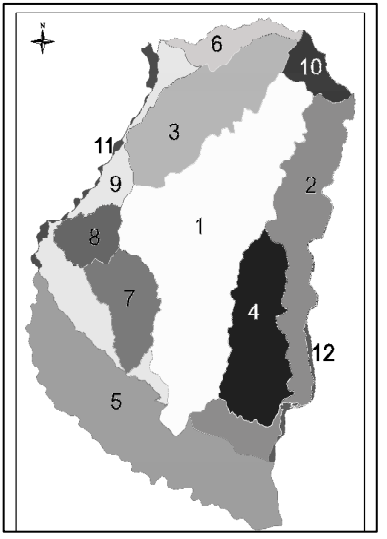


Figura 5. Cuencas hidrográficas.

Balance Hídrico

El balance hídrico a nivel edáfico, posibilita determinar la condición hidrológica (húmeda, neutra o árida) y ser utilizado como herramienta para estimar, a nivel global, un volumen de infiltración factible de actuar como recarga subterránea, en la provincia. El análisis requiere establecer la relación Exceso – Déficit y plantear la resolución de la ecuación general del ciclo hidrológico. Para el desarrollo del balance hídrico a nivel edáfico se utiliza el modelo de Thornthwaite y Mather (1957). La metodología propuesta para estimar volumen de infiltración, fue utilizada con resultados aceptables en áreas de la provincia, con excesos, consideradas hidrológicamente homogéneas, las que forman parte del área de estudio actual. Para establecer la relación Exceso - Déficit, se utilizó el balance desarrollado para una Reserva de Agua Útil de 200 mm, adoptada en función de las características edáficas predominantes Si bien las condiciones existentes de tipo de suelo, textura y cobertura vegetal son variables en la extensión del área de estudio, se consideró una reserva de agua útil asimilable a la totalidad de la región, a partir de evaluaciones realizadas con el aporte de investigaciones del INTA. La superficie para la que se efectúa el presente análisis corresponde a la Provincia de Entre Ríos y alcanza a 61.116 km^2, teniendo en cuenta que se ha excluido el área correspondiente al delta del río Paraná. Para la serie de Precipitaciones medias mensuales y Temperaturas medias mensuales de la Estación Agrometeorológica Feliciano (DHER) (1986-2010) se desarrolla el balance hídrico y para igual período en Estación INTA Concordia, Estación INTA Paraná, Estación Agrometeorológica Lucas González (DHER), Estación INTA Uruguay y Estación Gualeguaychú (SMN). Sintetizando el mismo para cada estación, se determinan las diferencias entre P (Precipitación), Evtp (Evapotranspiración potencial) y Evtr (Evapotranspiración real), se observa que en todas las estaciones las precipitaciones anuales generan excesos y verifica la condición hidrológica húmeda de la zona. Si se promedian las seis (6) estaciones analizadas, el exceso anual resulta de 358,4 mm/año y si se asimila el valor promedio a la región, resulta que en la totalidad de la superficie de la zona de estudio, el volumen es de 21.904 hm^3/año. El exceso anual así definido resulta un 30% del promedio de las precipitaciones. El promedio de las precipitaciones es de 1.206,5 mm/año. Los excesos evaluados en cada una de las seis estaciones analizadas se encuentran entre el 39% de las precipitaciones en la Estación Feliciano y el 23% de las precipitaciones en la Estación Paraná. Para determinar la Infiltración I, parámetro de la ecuación del ciclo hidrológico (Balance Hídrico Global, Tabla 1), se adopta el promedio de las variables Evtr y P, obtenidas en las estaciones analizadas, para los 25 años de serie y se calcula el exceso (Ex). La ecuación fundamental del ciclo hidrológico (1) puede expresarse:

$$P - Evtr = Ex = Es + I \qquad (1)$$

Para estimar la infiltración o factibilidad de recarga de los acuíferos se necesita conocer el escurrimiento superficial o escorrentía (Es). Si bien la información disponible de caudales no es suficiente para determinar un valor confiable de escorrentía, la misma posibilita inferir un valor de Es y estimar la Infiltración. Se determinaron índices de escorrentía (Es/P) de los arroyos Feliciano, Yuquerí Grande, Nogoyá y de los ríos Gualeguay y Gualeguaychú, obtenidos de la comparación del caudal aforado con el promedio de lluvia mensual registrada en las estaciones existentes o próximas a la cuenca de aporte de cada curso de agua, para una misma serie (1993-2009). El promedio de los índices medios determinados, alcanza el 20%, por lo cual se adopta como valor medio de escorrentía Es. Este valor se corresponde con la escorrentía promedio para la serie de aforos del río Gualeguay, como así también para el río

Gualeguaychú y el arroyo Feliciano (SSRH, 2011), cuyas cuencas ocupan la mayor superficie de la región evaluada y podría representar un valor medio de escorrentía en el balance global. A partir de los porcentajes descriptos aplicados a la ecuación de balance hídrico, se considera factible que se produzca la recarga subterránea y se estima la infiltración en el 10% (diez por ciento) de la lluvia media anual.

Tabla 1. Balance Hídrico Global.

	%	mm/a	hm^3/a
P	100	1.206	73.706
Evtr	70	844	51.582
Es	20	241	14.729
I	10	121	7.395

En los estudios regionales realizados en áreas menores de la provincia (Auge *et al*., 2002, Santi *et al*., 2002, 2004, 2008, 2009, 2011) los valores de infiltración estimados a partir del balance hídrico global, alcanzan también un promedio del 10%, variando entre el 7% para las regiones del sudeste, sudoeste y centro-oeste, el 12% en las regiones norte y noreste de la provincia y el 15% en el centro-este (zona arrocera).

Geología e hidrogeología

Entre Ríos, está situada en el borde sur de la cuenca Chaco – Paranaense, la que tiene desarrollos someros hacia el sureste de la provincia y profundizaciones hacia el oeste y noroeste. La cuenca sedimentaria traspasa los límites provinciales y se desarrolla en su mayor extensión en las provincias de Santa Fe, Chaco, Córdoba, Formosa, resto del Litoral y países vecinos. Tipificada como de intraplaca y no vinculada a procesos de subducción, alberga sedimentitas continentales y marinas de edades comprendidas entre el Paleozoico Medio y el Cuaternario. Dos Formaciones acuíferas del Mesozoico contienen agua: la Formación Serra Geral (basaltos) y la Formación Misiones (arenas y areniscas del Acuífero Guaraní). Se explotan en la provincia, para recreación y turismo.

Los acuíferos de interés, corresponden a los alojados en la formaciones geológicas situadas en la parte superior de la columna estratigráfica (Cuaternario y Terciario). Con excepción del borde E (margen derecha del río Uruguay), donde se encuentra la Formación El Palmar que aloja un acuífero libre, el resto de la provincia, presenta una cubierta limoarcillosa (Formación Hernandarias, acuitardo) de una potencia máxima de 70 m. depositada por encima de las Formaciones Paraná, Ituzaingó y Salto Chico (acuíferos semiconfinados).

La Formación Paraná (Mioceno Medio a Superior), depósito de origen marino, está compuesta por arcilitas gris verdosas, oscuras, poco micáceas, algo calcáreas, compactas, con contenido de yeso, restos carbonosos, intercalaciones tobáceas y abundante contenido fosilífero. Su espesor varía entre 100 y 200 metros. Es un acuífero semiconfinado explotado en el suroeste de Entre Ríos. Los caudales de extracción no superan los 100 m^3/h, los valores dominantes de la transmisividad se ubican en el rango de 500 - 800 m^2/día. La recarga se realiza in situ a través del acuitardo suprayacente. La composición iónica del agua es bicarbonatada sódica dominante y cálcica subordinada en un 80% (1 muestra cada 60 km^2), el 20 % restante es clorurada y/o sulfatada sódica (Piper, 1944). En algunos sectores, posee serias limitaciones en la calidad debido al exceso en las concentraciones de dureza, sulfatos, cloruros y sodio (Santi *et al*., 2002, 2011).

La Formación Ituzaingó (Plioceno Medio a Superior), es un depósito fluvial del río Paraná, compuesto por arenas ocráceas, blancas, rojizas, con intercalaciones pelíticas de tonos verdosos y grises. Es un acuífero semiconfinado explotado en el sector noroeste. El techo del acuífero se encuentra a profundidades variables entre 10 y 50 m. Los caudales de extracción no superan los 130 m^3/h, el valor medio regional de la transmisividad es de 1.000 m^2/día. En relación al grado de confinamiento, donde la cubierta superpuesta tiene una potencia de 10 a 15 m, el coeficiente de almacenamiento posee valores del orden de 0,001, mientras que, en sectores donde la potencia del acuitardo es mayor, es de 0,0002. La recarga se realiza in situ a través de la Formación Hernandarias. La composición iónica del agua es bicarbonatada sódica dominante y cálcica subordinada (85 %) (1 muestra cada 60 km^2); y un 15%, clorurada y/o sulfatada sódica. La calidad está limitada en algunos sectores por exceso de sulfatos y sodio (Sanguinetti *et al*., 2000, Santi *et al*., 2008).

La Formación Salto Chico (Pleistoceno Inferior), son depósitos del río Uruguay. Está compuesta por arenas cuarzosas gruesas, medianas y finas de color amarillo y rojo, arcillas verdes y estratos irregulares de rodados finos y gruesos. El techo del acuífero se encuentra a profundidades variables desde 20 a 40 m. El espesor medio se estima que podría superar los

60 m. Es un acuífero semiconfinado explotado en el sector oriental. Llamado "acuífero arrocero" por su intensivo uso en riego, en la época de mayor extracción (noviembre a marzo, con caudales que varían de 250 a 600 m³/h por pozo), los niveles hidráulicos descienden en algunos sectores dejando al acuífero expuesto a un grado de mayor vulnerabilidad, al pasar de su condición de semiconfinado a libre. Los niveles se recuperan en épocas donde la demanda para riego es menor. La transmisividad dominante se estima dentro del rango 1.500 – 2.500 m²/día. El coeficiente de almacenamiento arroja valores medios entre 0,001 y 0,004. Se destaca un mayor confinamiento en los pozos que se utilizan para riego, donde la transmisividad media supera los 2.500 m²/día. El valor obtenido de la permeabilidad vertical, del orden de 10^{-3} cm/s, es alto, indicando que existe una fuerte recarga proveniente del acuitardo suprayacente. El agua es bicarbonatada sódica dominante y bicarbonatada cálcica subordinada (1 muestra cada 60 km²). (Santi *et al.*, 2004, 2008, 2011).

En el borde Este, el río Uruguay depositó la Formación El Palmar (Holoceno), terraza compuesta por arenas de cauce con lentes de gravas y cantos rodados. El espesor máximo es de 24 m. (Iriondo, 1980, Iriondo *et al.*, 2007). Es un acuífero libre. Los caudales de extracción no superan los 50 m³/h, la transmisividad varia dentro del rango 500 - 1.500 m²/día, con valor medio regional de 1.000 m²/día. El embalse de Salto Grande favorece la recarga de los pozos en explotación ubicados en las proximidades del Lago. El agua es bicarbonatada sódica dominante y cálcica subordinada (1 muestra cada 60 km²). (Santi *et al.* 2009, 2010, 2011). Cabe destacar la necesidad de profundizar los estudios en relación al contacto entre las Formaciones El Palmar (superpuesta a Salto Chico) y Salto Chico, para lograr una descripción concluyente del funcionamiento de los acuíferos en las proximidades de la descarga del sistema, al río Uruguay.

En la Figura 6, se observa la distribución en planta de los cuatro acuíferos, los que, con sus particularidades y diferencias litoestratigráficas, en el terreno de la hidrogeología constituyen un sistema interconectado (Santi *et al.*, 2010, 2011). Los sectores T1 y T2 son áreas de transición (Paraná-Ituzaingó, Ituzaingó-Salto Chico), donde se desconoce el pasaje de una Formación acuífera a otra. En el borde sureste aún queda un sector por definir (Santi *et al.*, 2010,2011).

La red de flujo subterráneo (Figura 7), se trazó con datos de censo hidrogeológico de 998

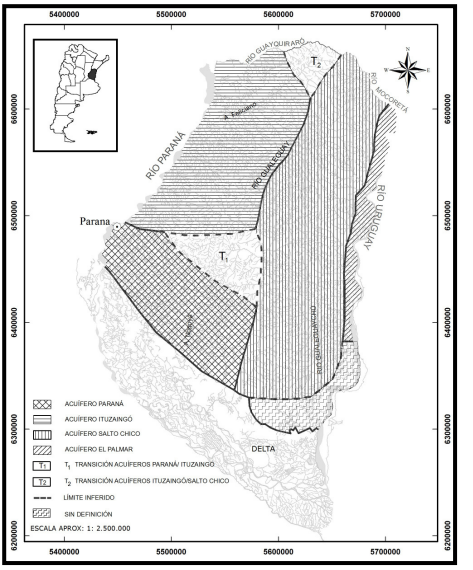


Figura 6. Acuíferos terciarios y cuaternarios

pozos. Las curvas equipotenciales más elevadas se encuentran en el noreste (65-60 m IGN), las más bajas al oeste lindan con el río Paraná entre la localidad de La Paz hasta Paraná (10–15 m IGN) y al sur, paralela al predelta y Delta la equipotencial de 10 m IGN. Las de menor valor en el este, son las isolíneas de 5, 10 y 15 m IGN, donde el sistema se comporta como libre.

Las divisorias de agua subterránea coinciden en general con las divisorias de las grandes cuencas hidrográficas. El escurrimiento subterráneo se realiza en tres sentidos: norte-sur, hacia el predelta-Delta; este-oeste hacia el río Paraná y oeste-este, hacia los ríos Uruguay y Mocoretá. En el interior, se destacan como descarga subterránea, los ríos Gualeguay en el centro, Gualeguaychú en el sureste y los arroyos Feliciano y Nogoyá, en el noroeste y suroeste, respectivamente. Para toda la región investigada, se visualiza una fuerte influencia de las geoformas y la geología en la definición del sistema subterráneo. Las redes de flujo superficial y subterráneo tienen un comportamiento similar.

Conclusiones

En Entre Ríos, el agua subterránea para consumo humano, animal, uso industrial y riego, se extrae de un sistema interconectado, conformado por cuatro acuíferos localizados en

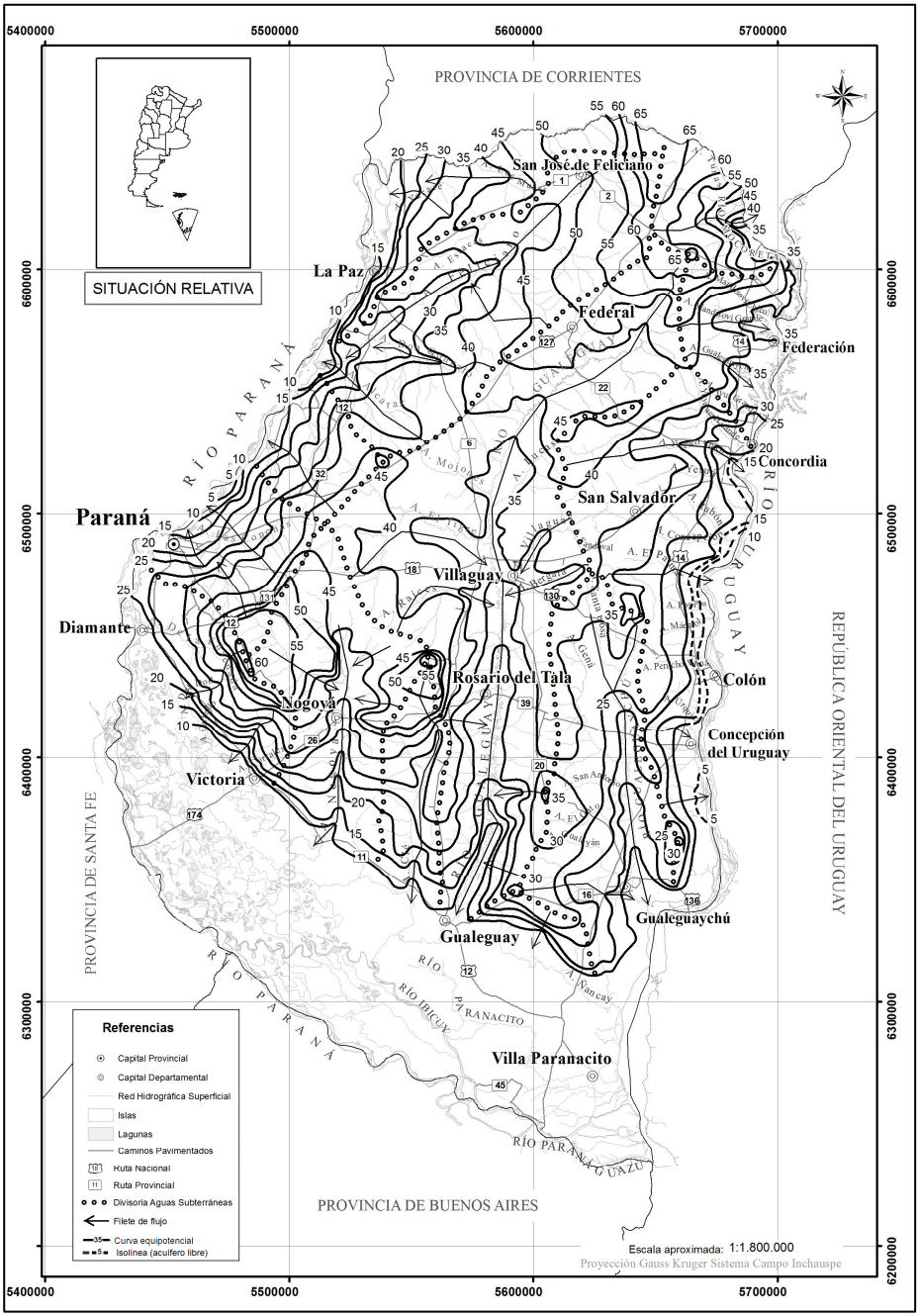


Figura 7. Red de flujo subterráneo. Entre Ríos.

Formaciones Terciarias y Cuaternarias y distribuidos en un área de 61.116 km² Acuífero Paraná, semiconfinado, explotado en el sudoeste con caudales de hasta 100 m³/h, posee limitaciones en la calidad del agua debido al exceso en las concentraciones de dureza, sulfatos, cloruros y sodio. Acuífero Ituzaingó, semiconfinado, explotado en el noroeste con caudales de hasta 130 m³/h, tiene buena calidad de agua, limitada en algunos sectores por exceso de sulfatos y sodio. Acuífero Salto Chico, semiconfinado, explotado a lo largo del sector oriental, con caudales de extracción entre 250 a 600 m³/h, posee muy buena calidad de agua para diversos usos entre los que se destaca el riego. Acuífero El Palmar, libre, es explotado en el borde este, con caudales de hasta 50 m³/h y buena calidad de agua.

En la red de flujo del sistema, las divisorias de agua subterránea coinciden en general con las divisorias de las grandes cuencas hidrográficas de Entre Ríos. El escurrimiento subterráneo se realiza en tres sentidos: norte-sur, hacia el predelta-Delta; este-oeste hacia el río Paraná y oeste-este, hacia los ríos Uruguay y Mocoretá. Se destaca, en el interior, la descarga subterránea hacia los ríos Gualeguay en el centro, Gualeguaychú en el sureste y los arroyos Feliciano y Nogoyá en el noroeste y suroeste respectivamente.

En el Balance Hídrico Global se estima una infiltración promedio del 10% de la lluvia media anual. La recarga del sistema subterráneo se produce in situ, directa en el acuífero El Palmar, e indirecta a través del acuitardo (Formación Hernandarias) en los acuíferos semiconfinados Paraná, Ituzaingó y Salto Chico.

Referencias

Auge M. y Santi M. 2002. Disponibilidad de agua subterránea para la producción arrocera de la Provincia de Entre Ríos. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones (CFI).* Buenos Aires.

DHER, 2011. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos*. www.hidraulica.gov.ar

INTA.1979. Suelos y Erosión de la Provincia de Entre Ríos. Tomo I y II. *Plan Mapa Suelos de la Provincia de Entre Ríos*. INTA Paraná.

Iriondo M. 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, 11: 125-141. Santa Fe.

Iriondo M. y Kröhling D. 2007. *V Congreso Argentino de Hidrogeología,* 433 a 441. Paraná. Entre Ríos. Argentina.

Knoche W. y Borzacov V. 1947. Provincias climáticas de la Argentina. *Geografía de la República Argentina. (GAEA*). T VI: 140-174. Buenos Aires.

Piper A. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Amer. Geophys. Union*. Vol. 25: 914-923.

Sanguinetti J., Santi M., Casa H. 2000. Estudio de aguas subterráneas Etapa III. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones (CFI).* Buenos Aires.

Santi M. 2002.Estudio de agua subterránea en el sudoeste de la Provincia de Entre Ríos. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones (CFI).* Buenos Aires.

Santi, M. y Bianchi G. 2004. Estudio de Aguas Subterráneas en la región sudeste de la Provincia de Entre Ríos. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones. (CFI).* Buenos Aires.

Santi, M., Bianchi G. y Rezzónico G. 2007. Agua subterránea en la región sudeste de la Provincia de Entre Ríos. *V Congreso Argentino de Hidrogeología,* 307-318. Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Santi M. y Bianchi G. 2008. Relevamiento de los recursos subterráneos del sector norte y noreste en la Provincia de Entre Ríos. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones. (CFI).* Buenos Aires

Santi, M. Bianchi G. y Rezzónico G. 2009. Agua subterránea en el noreste de Entre Ríos. Planificación y gestión de aguas subterráneas. *VI Congreso Argentino de Hidrogeología,* 63-72. Santa Rosa. La Pampa. Argentina.

Santi, M., Bianchi G. y Rezzónico G. 2010. Hidrogeología de la región noreste de Entre Ríos. República Argentina. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología,* V 7: 33-45. Montevideo. República Oriental del Uruguay.

Santi M. y Bianchi G. 2011. Mapa Hidrogeológico. Síntesis de la Provincia. Entre Ríos. Alcance I y II. *Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER)-Consejo Federal de Inversiones (CFI).* Buenos Aires.

SSRH, 2011. Base de Datos Hidrológica, *Sistema Nacional de Información Hídrica, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación*. www.hidricosargentina.gov.ar

Thornthwaite C. y Mather J. 1957. Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance. *Climate Drexel Inst. of Technology,* Nº 10: 185-311.

Estudio de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca del río de la Flecha, Departamento Sarmiento, San Juan

Gerardo Salvioli[1], Silvia Merida[1] y Dante Salvioli[2]

[1] Instituto Nacional del Agua. Centro Regional de Aguas Subterráneas (INA-CRAS)
Avenida Ignacio de La Roza 125 (Este) - Piso 3 - (C.P. 5400). San Juan, Argentina
[2] Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan
Avenida Libertador Gral. San Martín 1109 (Oeste). San Juan, Argentina.

Mail de contacto: ghsalvioli@hotmail.com

RESUMEN

Los objetivos del estudio realizado fueron conocer las características hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca del río de la Flecha y proponer obras para el aprovechamiento del agua subterránea y de los derrames superficiales permanentes y subálveos y obras para la defensa de las márgenes de aguas abajo.La metodología consistió en la aplicación de métodos estadísticos e hidrológicos tendientes a la determinación de las lluvias máximas probables y sus consecuentes crecidas, la realización de reconocimientos en campaña, el análisis de los derrames permanentes superficiales y subálveos y la ejecución de diversos estudios relacionados con la hidrogeología de la cuenca. La información obtenida, ha permitido mejorar el conocimiento de la hidrología e hidrogeología de la cuenca del río de La Flecha, programar próximos estudios de detalle e informar los aspectos relacionados con obras que podrían diseñarse para el aprovechamiento de sus recursos hídricos y defensa contra crecidas.
Palabras claves: estudio, La Flecha, obras defensas.

ABSTRACT

The objectives of the study were to determine the hydrological and hydrogeological characteristics of the La Flecha river basin and propose constructions for the use of groundwater and permanent surface spills and subsurface and constructions for the defense of the downstream margins.
The methodology consisted of the application of statistical methods and hydrological aimed at determining the probable maximum rainfall and resulting floods, conducting surveys in the field, the analysis of permanent spills surface and subsurface and the implementation of various studies related to the hydrogeology of the basin. The information obtained has improved the knowledge of hydrology and hydrogeology of La Flecha´s basin, set future studies detailed and reporting aspects of constructions that could be designed for the use of their water resources and flood defenses.
Keywords: study, La Flecha, construction defense.

Introducción

La cuenca del río de la Flecha, se extiende en el sector occidental del Departamento Sarmiento en la provincia de San Juan, como se aprecia en la Figura 1, drena parte de la vertiente oriental del Cordón de las Osamentas, integrante éste de la Sierra del Tontal, principalmente el sector Sur de la Pampa de Bachongo. Su cuenca hidrográfica se extiende entre las cuencas de los ríos de la Ciénaga y del Agua, situadas al norte y sur respectivamente del área en estudio. Su cauce principal aporta a través de la quebrada homónima avenidas estivales que afectan seriamente la zona suburbana de la Villa de Media Agua y las propiedades cultivadas ubicadas al oeste de la misma. La cuenca posee una superficie de unos 272 Km^2; sus tres tributarios principales son los ríos de las Barrancas, Bachongo y el arroyo de la Ciénaga, de éstos el primero y el tercero poseen caudales permanentes que al ingresar al cauce principal se infiltran en los sedimentos permeables de éste. Cabe aclarar, que en la cuenca no existen obras hidráulicas de ningún tipo, ni perforaciones, ni obras de defensa.

La zona posee un clima continental semiárido y mesotermal, con vegetación de monte, cultivos limitados a la disponibilidad de agua para riego y escurrimientos estivales eventuales de tipo aluvional. Las principales características climáticas son la elevada radiación solar, escasa nubosidad, gran transparencia atmosférica e importante amplitud

térmica diurna-nocturna; parámetros asociados a un régimen pluviométrico con dos estaciones, húmeda y seca, muy definidas. La precipitación media en la cuenca ronda los 300 mm (82% en el semestre estival).

La cuenca posee un inexplorado reservorio de agua subterránea, ésta se encuentra contenida en los sedimentos cuaternarios de la Pampa de Bachongo. La recarga de la misma proviene de las lluvias que precipitan en la vertiente este del cordón serrano de Paramillos del Tontal, generando escurrimientos superficiales permanentes de escasa cuantía y crecidas de magnitudes importantes.

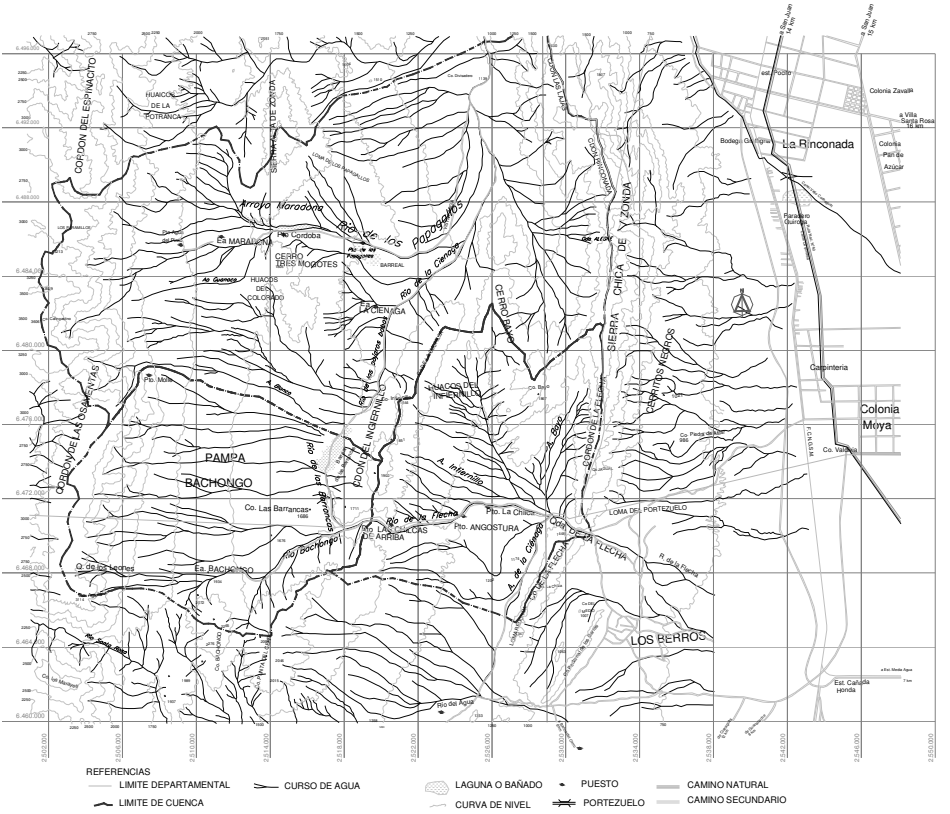


Figura 1. Zona de estudio, límites de la cuenca y ubicación de estaciones pluviométricas

Objetivos

El presente tuvo como objetivos: a) conocer las posibilidades de explotar el agua subterránea contenida en el sector sur de la Pampa de Bachongo; b) calcular, al menos aproximadamente, los escurrimientos subálveo y de crecidas a través de la Quebrada de la Flecha.

Geomorfología y geología de la cuenca.

En el área de estudio se reconocen los siguientes elementos principales constitutivos del paisaje: montañas, lomadas y valles. Las primeras son cordones alargados en dirección norte-sur que bordean las depresiones; el más importante es el Cordón de las Osamentas, cuyas cumbres delimitan por el oeste a la cuenca en estudiada, en el mismo predominan las sedimentitas devónicas, consistentes en grauvacas de color verde oscuro y areniscas grises con intercalaciones de lutitas; también pertenecen al Devónico el Cordón del Infiernillo y el cerro Barrancas y los cerros Bachongo, Hediondo y Punta del Cerro (divisoria sur). Los otros afloramientos serranos de importancia son

las calizas y dolomías de la Formación San Juan (Ordovícico) que constituyen la divisoria oriental de la cuenca; si bien las rocas de la Formación San Juan son compactas, presentan dos sistemas de diaclasas, uno paralelo al plano de estratificación y otro perpendicular al mismo.

Las lomadas son elevaciones de bajas alturas existentes en los sectores medios de la cuenca, en general están conformadas por sedimentitas carbónicas y pérmicas. Los valles son las depresiones intermontanas rellenadas por sedimentos cuaternarios principalmente de origen fluvial, aportados por los numerosos arroyos y torrentes que descienden de las serranías vecinas. La más importante es la Pampa de Bachongo. Las formaciones geológicas mapeadas en la cuenca poseen distintos comportamientos, sea como acuíferos o como basamento hidrogeológico de éstos.

Geología de superficie

La cuenca hídrica del río de la Flecha se desarrolla prácticamente en la provincia geológica de Precordillera Oriental, definida ésta por su particular tectónica, caracterizada por fallas inversas de alto ángulo en la vertiente occidental de los cordones montañosos, con planos de fallas inclinados hacia el Este. Su composición litológica involucra a sedimentitas marinas del Paleozoico Inferior a medio (Ordovícico-Devónico) y continentales del Paleozoico Superior (Carbonífero-Pérmico) hasta el Neógeno (Terciario superior a Cuaternario) (CRAS, 1975).

Las rocas del Paleozoico Inferior son mayormente las que componen los cordones montañosos; las mismas son sedimentitas marinas principalmente del Ordovícico, son calizas y dolomías bien estratificadas en estratos de espesores muy variables, por lo general gruesos con presencia de pedernal. (CRAS, 1975). Las rocas de edad devónica afloran casi en la totalidad de la divisoria Oeste de la cuenca (Cordón de las Osamentas); son un complejo sedimentario marino denominado formación Punta Negra, conjunto de areniscas con intercalaciones lutíticas y arcilíticas.

El Paleozoico Superior está presente en el área de las lomadas que se desarrollan en las zonas deprimidas (CRAS, 1975). Su litología es variable, conglomerados medianos, areniscas finas a gruesas, lutitas y arcilitas, limonitas carbonosas hasta areniscas arcósicas pérmicas; en general son sedimentitas continentales recubiertas en gran parte por terrenos terciarios y cuaternarios. En el área del cerro de La Chilca se reconoció una pequeña manifestación ígnea que intruye a las calizas ordovícicas y corona a las sedimentitas del Carbonífero y del Pérmico.

Los terrenos de edad terciaria se dividen en dos grandes grupos: a) uno inferior compuesto por areniscas gruesas a finas, limonitas y arcilitas, presentes en las lomadas que se disponen con rumbo Norte-Sur, con afectaciones tectónicas que se manifiestan en pliegues anticlinales y sinclinales, con fallas y fracturas asociadas al callamiento mayor de los cordones montañosos principales. Por encima de esta secuencia de elementos medios a finos, se dispone una secuencia asignable al Terciario Superior; son conglomerados de matriz arenosa y localmente cementados por carbonato de calcio, la composición litológica de los clastos redondeados a sub-redondeados indica que provienen de rocas de cordillera y precordillera.

Los sedimentos cuaternarios comprenden una amplia gama de rocas de diferentes litologías y granulometrías. No están consolidados y poseen permeabilidad primaria y buena porosidad; el tamaño del grano varía desde limos y arcillas hasta bloques, poseen matices pardos blanquecinos hasta grises oscuros, afloran en relación de discordancia sobre todo tipo de terrenos subyacentes y en las áreas deprimidas se comportan como rocas de tránsito y acumulo de agua subterránea.

Hidrometeorología

Materiales y métodos

El análisis de imágenes satelitales, Google Earth y cartas topográficas, ha permitido determinar las principales características de las cuencas del río de La Flecha y de sus dos afluentes más importantes, datos que se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Características de las cuencas

Cuenca	Superficie (Km^2)	Longitud cauce principal (Km)	Desnivel máximo (m)
Río de la Flecha	272,0	32,25	2.050
Río de las Barrancas	85,4	17,28	1.450
Río Bachongo	171,0	17,77	1.250

Se conocen además otras características de las cuencas relacionadas con el drenaje de las mismas: perímetro, ancho medio, longitud axial,

Factor de forma, índice de Gravelius, pendiente media y factor de drenaje. La estación meteorológica más próxima al área en estudio, es la ubicada en la Escuela de Agricultura de la Villa de Media Agua, cabecera del departamento Sarmiento. Sus datos, permitieron inferir las principales características hidrometeorológicas de la zona.

Mediante el análisis de los registros climáticos y el cálculo de distintos índices de aridez, se concluye que el clima de la región es semiárido a árido, con grandes amplitudes térmicas diurnas-nocturnas y anuales (verano-invierno), elevadas heliofanía e insolación, importante transparencia atmosférica, escasa humedad y reducida nubosidad.

Según la clasificación de Köppen el clima imperante en la zona, es del tipo (B W K w a), con una precipitación media anual inferior al límite de sequía, características climáticas de desierto, temperatura media anual inferior a 18 ºC pero superior a 18 ºC en el mes más caluroso, el período más seco es en invierno y la temperatura media del mes más caluroso es superior a 22 ºC. Desde el punto de vista bioclimático, la zona tiene un clima Tropical Árido, con inviernos fríos.

La distribución a lo largo del año de las precipitaciones medias mensuales registradas en las diferentes estaciones pluviométricas, indican un régimen pluviométrico continental, con lluvias estivales (el 82% de la media anual) y con una baja frecuencia media anual de días con precipitaciones. Las precipitaciones medias anuales registradas en diversas estaciones de la zona son: “Puesto Córdoba” (1978/93, 250 mm, “La Ciénaga” (1976/87, 184 mm), “Puesto Molle” (1974/89, 206 mm) y “Ea. Bachongo” (1974/94; 307 mm).

Sobre la base de los datos de las estaciones Instaladas por el Centro Regional de Aguas Subterráneas se ha calculado con aceptable aproximación que la precipitación media anual ronda los 250 mm; fluctuando entre valores máximo y mínimo de unos 500 mm y 170 mm respectivamente; lo que evidencia una gran irregularidad anual de las lluvias, característica particular de los climas desérticos.

Con los registros disponibles se han trazado las isoyetas medias anuales de la comarca; éstas señalan que las precipitaciones en la cuenca, varían entre unos 200 mm en el este de la misma (vertiente de las sierras que delimitan por el este a la cuenca) y unos 400 mm en el sector oeste (faldeo oriental del Cordón de las Osamentas), con una media ponderada de 250 mm. La frecuencia anual media de días con lluvias es superior a 40, elevada respecto a los valores predominantes en San Juan:

En el sector oeste de la cuenca, durante la estación invernal ocurren frecuentemente precipitaciones níveas; la nieve se acumula sobre el suelo durante algunos días, luego se licua y escurre lentamente para infiltrarse en los terrenos permeables pedemontanos de la Pampa de Bachongo.

A falta de registros pluviográficos, las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) que se emplearon para la determinación de los caudales máximos de crecidas, fueron confeccionadas sobre la base de: a) el análisis mediante métodos estadísticos de las lluvias diarias máximas anuales observadas en las estaciones pluviométricas, para luego calcular mediante expresiones semiempíricas las intensidades de las lluvias de diseño de duraciones inferiores a 24 horas; b) la aplicación de otras metodologías de cálculo como son los propuestos por el Ing. Federico Rühle (D.N.V., 1966), por el Centro Regional Andino (CRA, 1997 y 2008) y el de los Coeficientes Medios.

Sistematizada la información disponible de las cuatro estaciones con registros de lluvias diarias máximas anuales, mediante los métodos probabilístico de Gumbel y Lognormal se han determinado las precipitaciones máximas probables (PMP) correspondientes a distintos períodos de retorno. Valores que permitieron calcular luego, los caudales máximos probables por los métodos hidrológicos basados en las intensidades de las lluvias máximas, en general del tipo de hidrograma triangular.

Sobre la base de lo explicitado y de las metodologías antes señaladas, se determinaron primero los parámetros característicos de las series estadísticas de lluvias diarios máximas anuales de las estaciones “Ea. Bachongo”, “Ea. La Ciénaga”, “Puesto Molle” y “Puesto Córdoba”. Con los mismos y mediante la expresión de Gumbel, se calcularon las precipitaciones diarias máximas probables (PMP diarias) para diferentes períodos de retorno. Además se ha tenido en cuenta la sugerencia de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, Nº 168, 1994), en relación a incrementar en un 13% los valores calculados sobre la base de lluvias diarias máximas, a fin de obtener las lluvias en 24 horas.

Como se anticipara, las curvas IDF o las relaciones analíticas entre las intensidades, duraciones y frecuencias, a fin de definir las lluvias de diseño, se han obtenido mediante la aplicación de un método semiempírico (en el caso la fórmula de Grunsky). También se ha tenido en cuenta las curvas IDF del Centro

Regional Andino (CRA) del Instituto Nacional del Agua y otros dos métodos aplicables a zonas sin información o con escasez de datos.

Resultados

Del análisis de los datos se puede expresar que las lluvias estivales, proclives a generar eventos lluvia-escorrentía, son del tipo orográfico-convectivas, caracterizándose por presentar cortas duraciones (de algunos minutos hasta tres a cinco horas), elevadas intensidades y en general áreas de cobertura reducidas a moderadas. Las precipitaciones diarias máximas probables para recurrencias de 25, 50, 100 y 200 años fueron calculadas mediante los métodos de Gumbel y Lognormal, obteniéndose para 25 años valores de similares órdenes de magnitudes que las lluvias máximas registradas en los pluviómetros de las estaciones consideradas.

Al comparar las intensidades obtenidas por Gumbel-Grunky con las calculadas por otros cuatro métodos, se observó que: a) para lluvias de reducidas duraciones (inferiores a 2 horas), los valores calculados por el primero son inferiores a los determinados por otras metodologías; b) para lluvias de duraciones superiores a 200 minutos se invierte la relación y los valores determinados por Gumbel-Grunsky son superiores a los otros. Finalmente se consideró conveniente adoptar para los cálculos los promedios aritméticos de los valores obtenidos por los cinco métodos aplicados.

Hidrogeología

La principal limitación que tiene el estudio de las aguas subterráneas en la zona, es el extremadamente escaso número de pozos existentes. Por lo que no se dispone de datos precisos de las características de los acuíferos en extensos sectores de la zona estudiada.

Las aguas subterráneas existentes en la cuenca, de calidad apropiada para consumo humano, riego y ganadería, se hallan contenidas en los sedimentos cuaternarios y en todos los casos pertenecen a un único nivel acuífero. Se han reconocido dos reservorios de agua subterránea: la Pampa de Bachongo y el asociado al cauce del río inmediatamente aguas arriba de la quebrada de La Flecha. El primero por su extensión, considerables espesores e importante volumen de sedimentos saturados es por lejos el de mayor relevancia. El segundo, de amplia longitud en sentido Oeste-Este (unos 14 Km), de limitado ancho Norte-Sur (entre 0,5 y 1 Km) y de muy reducidos espesores saturados, esto último debido a los diversos afloramientos de rocas precuaternarias, se asemeja a un subálveo. En el resto de la cuenca, no se presentan desarrollos aluviales suficientes que puedan considerarse como acuíferos, ya que los espesores de los sedimentos se hallan restringidos a los cauces de los emisarios secundarios, resultando muy escasos.

En síntesis, en la Pampa de Bachongo existe un reservorio hídrico constituido por un único acuífero hidrológicamente libre. Éste posee importantes espesores de materiales detríticos no consolidados, gruesos, de buenas porosidades. De los registros de sondeos eléctricos verticales prospectados en el sector Norte de la Pampa, se infiere que en ésta se produjo el depósito de una serie de conos aluviales asentados sobre una antigua superficie de erosión con inclinación hacia el Este; sin duda que la Pampa ofrece buenas perspectivas en el sentido de comportarse como una depresión de acumulación de aguas subterráneas, de calidad química buena y en cantidades suficientes que justifiquen su explotación para el riego y otros usos.

El subálveo del cauce principal se comporta como un reservorio donde el hallazgo de agua subterránea depende de la configuración geológica. En resumen, en el mismo las aguas circulan con dirección predominante Oeste-Este y dentro de los límites rigurosos que impone el basamento.

La recarga a la cuenca subterránea de la Pampa de Bachongo, proviene de las precipitaciones que ocurren en la vertiente oriental del Cordón de las Osamentas. Parte de las alturas de agua precipitadas, alimenta los numerosos cursos intermitentes que descienden desde el faldeo serrano, luego las aguas se infiltran en los terrenos pedemontanos de elevadas capacidades de infiltración, para finalmente circular subterráneamente por los materiales sueltos en dirección hacia el sureste.

Es probable que parte de las aguas que precipitan en los cordones serranos, se infiltren en las diaclasas, grietas y fisuras que le otorgan a las rocas permeabilidades secundarias. En la propia superficie de la Pampa, parte de las lluvias se insumen en los tenues suelos esqueléticos y contribuyen al sostén de la muy escasa cobertura vegetal.

En el sector Norte de la Pampa, en terrenos de la estancia La Ciénaga, se han perforado tres pozos de profundidades comprendidas entre 20 m y 30 m, con niveles estáticos del orden de -1,50 m a -2,50 m. Las profundidades de exploración de estos pozos han atravesado sólo sedimentos cuaternarios, estimándose que las rocas precuaternarias se encontrarían a más

de 100 m de profundidad. Como el terreno en el lugar posee una considerable pendiente, las entubaciones de las perforaciones y los conductos de conducción del agua, se han diseñado de forma que los pozos vierten por gravedad caudales de unos de 30 a 40 m^3/hora.

Derrame subálveo por la Quebrada de la Flecha

Materiales y Métodos

El derrame subálveo a través de la Quebrada de la Flecha fue calculado con aceptable aproximación, mediante la aplicación de Ley de Darcy. Ésta permite calcular el caudal que circula subterráneamente a través de los sedimentos cuaternarios saturados del subálveo, sobre la base de los datos hidrológicos que caracterizan la zona saturada de la misma.

$$Q = K * A * i$$

Donde: *Q* es el caudal que circula por el subálveo en m^3/seg; *K* es la permeabilidad en m/día; *A* es la sección saturada en m^2; *i* es el gradiente hidráulico.

Si bien la información hidrogeológica disponible del subsuelo es escasa, la misma permite determinar aproximadamente el caudal de agua que circularía por los sedimentos sueltos no consolidados, en aquellas oportunidades en las que se conoce las profundidades a las cuales se encuentra el nivel estático en la sección.

La información de mayor relevancia en relación a los espesores de los sedimentos cuaternarios, es la obtenida por el pozo denominado VT–15. Éste fue perforado por el Plan Agua Subterránea (antecesor del CRAS) a mediados de 1967, precisamente con el objetivo de explorar el subálveo en el lugar. El mismo alcanzó una profundidad total de exploración de 30,95 m, prácticamente los primeros 25 m el pozo atravesó sedimentos sueltos constituidos principalmente por bloques, gravas, gravillas y arenas. La perforación se entubó en su tramo final con caño filtro de Ø 6 pulgadas entre 25,6 m y 28,6 m. Los análisis físico-químicos realizados a las muestras de agua obtenidas, dieron por resultado una conductividad eléctrica media de 1.330 micromho/cm, un residuo de evaporación 992 mg./litro y un contenido de Boro de 0,70 mg./litro.

A la finalización de las diversas actividades ejecutadas en el pozo VT-15, se dejó una cañería de 2 pulgadas de diámetro hasta la profundidad de 24,7 m, a fin de poder efectuar un monitoreo de los niveles piezométricos. El CRAS realizó mediciones anuales entre 1967 y 2010, los niveles estáticos medio, máximo y mínimo registrados fueron de -20,27 m, -22,80 m y 18,01 m respectivamente

En el sitio en donde se encuentra ubicado el pozo, el ancho del cauce entre las márgenes de roca caliza es de aproximadamente 38,7 m.

Para la aplicación de la expresión de Darcy, fue oportuno considerar que el gradiente hidráulico del escurrimiento subálveo es ligeramente superior a la pendiente superficial del cauce, o sea aproximadamente un 4 %.

En cuanto a la permeabilidad media de los terrenos, se adoptó para los mismos un valor estimado sobre la base de los materiales atravesados por la perforación (granulometría gruesa con predominio de bloques, gravas y arenas, con muy escasos materiales finos), el resultado de un ensayo de bombeo efectuado en un pozo ubicado a la salida de la quebrada e investigaciones geofísicas e hidrogeológicas efectuadas en esta última. En síntesis se infiere para los sedimentos saturados de la quebrada una permeabilidad media de alrededor de 300 m/día.

Resultados obtenidos

La información disponible indica que, la sección del subálveo en el lugar donde se ubica el pozo posee aproximadamente las siguientes dimensiones: un ancho en superficie de 38,7 m; un espesor medio del relleno sedimentario suelto no consolidado en el talweg de unos 25 m; un ancho en el techo de las calizas estimado en unos 22 m. Luego la superficie de la sección de sedimentos es del orden de unos 760 m^2.

Considerando las situaciones hidrológicas extremas, que se habrían presentado en el período 1967-2010, de acuerdo a los niveles estáticos observados en el pozo (mínima profundidad 18,01 m en 09/2007) y máxima profundidad (-22,8 m en 03/1976), se obtienen secciones saturadas media, máxima y mínima de 110 m^2, 168 m^2 y 51 m^2 respectivamente.

Luego mediante la expresión de Darcy, se calcula que los derrames subálveos a través de la quebrada, tendrían magnitudes media, máxima y mínima anuales del orden de 0,48 Hm^3/año, 0,74 Hm^3/año y 0,22 Hm^3/año respectivamente. Los valores precedentes son sólo orientativos, ya que los cálculos se han realizado sobre la base de hipótesis que obligadamente debieron asumirse por la reducida información hidrogeológica existente.

Conclusiones: Propuesta de obras

Por sus características hidrogeológicas, la cuenca del río de la Flecha posee recursos

hídricos superficiales y subterráneos permanentes, técnica y económicamente aprovechables. Además, es un área que aporta periódicas crecidas de considerables magnitudes, las que provocan serios perjuicios a las zonas que se extienden aguas abajo de la quebrada al oriente del cordón serrano homónimo, llegando las mismas hasta afectar sectores cultivados y densamente urbanizados.

Sobre la base de los estudios realizados e información obtenida, se considera oportuno y conveniente proponer distintos tipos de obras, para lo cual se ha tenido en cuenta las características y la permanencia o eventualidad de los derrames hídricos y, además, que las obras deben ser diseñadas y luego construidas según criterios técnicos y realidad económica, por lo que el proyectista debe realizar su labor de forma que se contemplen racionalmente ambas pautas. De las obras en cuestión, sólo se efectúa una breve descripción esquemática.

Explotación del agua subterránea

Por sus condiciones hidrogeológicas, es factible la explotación del acuífero de Pampa de Bachongo, las aguas de éste son químicamente aptas para el riego de diferentes tipos de cultivos y otros usos. Además la zona posee características climáticas y ecológicas semejantes a la Pampa del Acequión, que se extiende al Sur de la cuenca del río de La flecha, en esta última se han radicado en los últimos diez años importantes emprendimientos agrícolas, principalmente de viñedos y nogales.

Como la Pampa de Bachongo es propiedad de privados, el gobierno provincial sólo puede promover la radicación en la misma de emprendimientos agropecuarios.

Aprovechamiento de los derrames superficiales permanentes

El único cauce de la cuenca que posee caudales permanentes de magnitudes económicamente aprovechables es el río de las Barrancas, el colector principal (río de la Flecha) sólo aporta crecientes eventuales consecuencia de episodios lluvia-escorrentía. Debido a ello, los derrames superficiales de base deben ser captados antes de la confluencia de los ríos de las Barrancas y Bachongo. Para la captación de los derrames estacionarios, cuya magnitud media anual se calcula en unos 2 Hm^3/año, se propone un sencillo azud de derivación con toma parrilla, esquemáticamente compuesto de: a) muro de hormigón armado transversal al cauce, con vertedero en su coronamiento, de forma de generar un salto; b) parrilla o reja ubicada en el sector medio del coronamiento del muro; c) canaleta de evacuación de caudales con pendiente de fondo hacia una de las márgenes; d) desripiador-desarenador con compuerta para la limpieza del mismo y canal de restitución al cauce de las aguas de los lavados; e) cámara de carga provista de compuerta de guardia, en la cual tendrá origen el acueducto; f) conducción enterrada con origen en la obra de cabecera y final en la zona a servir, provisto de cámaras de inspección y limpieza, apto para conducir hasta unos 200 litros/seg.

Obra de aprovechamiento de los derrames subálveos

Por la Quebrada de la Flecha circulan derrames permanentes a través del subálveo, conformado por terrenos cuaternarios no consolidados, suprayacentes a las rocas calizas, en principio consideradas base hidrogeológica; en resumen existe un escurrimiento subálveo cuya magnitud media anual se ha calculado en unos 0,84 Hm^3/año.

Este derrame subterráneo podría ser captado mediante una galería o captación subálvea a emplazar en plena quebrada, esquemáticamente integrada por: un muro de hormigón ciclópeo fundado en el techo de las rocas calizas, de al menos unos cinco metros de altura, con eje principal transversal al cauce; un filtro ranura continua de 16 pulgadas de diámetro e importante abertura (a definir mediante ensayos granulométricos) con eje paralelo al del muro; una cámara de carga e inspección en la salida de los filtros y origen del acueducto; una conducción apta para conducir un caudal de unos 100 litros/seg. Esta obra es extremadamente poco factible de construir, debido a que las profundidades de excavación tanto en el sitio de emplazamiento de la captación (de hasta unos 25 m) y en gran parte del acueducto, demandaría complejas técnicas constructivas y consecuentemente un costo elevadísimo; en síntesis es una obra de muy difícil justificación técnica y económica, teniendo en cuenta el pequeño derrame medio anual posible de aprovechar (unos 0,48 Hm^3/año).

Como los derrames subálveos que escurren por la quebrada proceden principalmente de los caudales permanentes del río de las Barrancas, debe elegirse entre esta obra (captación subálvea) o la antes descripta (azud de derivación de derrames superficiales de base). A criterio de los autores y en comparación a la construcción de una captación subálvea en la quebrada, resulta más económica y menos problemática técnicamente la construcción de

un azud de derivación de los caudales permanentes del río de las Barrancas.

Dique de retención de crecidas

Las avenidas ocasionadas por los eventos lluvia-escorrentía se caracterizan por poseer elevados caudales máximos y reducidos tiempos base de los hidrogramas, resultando súbitas y torrenciales, con importantes caudales sólidos en suspensión y por arrastre de fondo. Debido a estas particularidades hidrológicas se desprecia totalmente la posibilidad de aprovechar los derrames de las avenidas.

Las presas de retención de crecidas tienen por objeto detener los caudales de las avenidas, almacenarlos transitoriamente y luego erogarlos de forma que los caudales que circulan hacia aguas abajo, sean inferiores a los caudales máximos que admite el cauce sin que se afecte a las márgenes. La mayor o menor eficiencia de estos diques, depende de las magnitudes de las crecidas, de la capacidad de almacenamiento del embalse y de la importancia y cantidad de tributarios que aportan al emisario principal entre el dique y el área defendida. Los mismos son obras estáticas que protegen lo existente pero que no producen directos beneficios económicos y, además, son de funcionamiento breve o efímero: Por todo ello son de difícil justificación económica; siendo importante que la presa sea de reducido volumen y el área del vaso de gran amplitud y bajo valor monetario.

En este tipo de obras, desde el punto de vista técnico-económico prevalecen diversas condiciones: a) proximidad a la zona a salvaguardar para obtener una protección efectiva; b) que la capacidad del embalse sea tal que reduzca el caudal máximo de ingreso en por lo menos un tercio de su valor; c) necesidad de efectuar estudios geotécnicos similares a los que se ejecutan para el proyecto de presa de embalse; d) el sitio de emplazamiento, en lo posible, debe ser una garganta estrecha, constituida en su fondo y laderas por rocas de buenas características geotécnicas, que defina hacia aguas arriba un embalse de gran volumen para una reducida altura del dique.

Los efectos hidráulicos que los diques de retención producen en los cauces se sintetizan en: retardar las ondas de crecida, aumentar la capacidad reguladora y disminuir los caudales máximos hacia aguas abajo de los mismos.

De acuerdo a la clase de los dispositivos a través de los cuales se liberan los caudales del reservorio o embalse transitorio, se distinguen dos tipos de diques de retención: los embalses con orificio de salida regulado y los embalses de salida libre. Este último tipo es el que se recomienda para el caso del río de la Flecha, ello sobre la base que la principal ventaja de este tipo de obras es que operan sin ninguna intervención humana, lo cual las hace muy apropiadas para su operación en zonas montañosas de difícil acceso, o bien en aquellos sitios donde por razones económicas no se desee establecer guardia permanente.

Uno de los inconvenientes de toda presa, es que en su embalse se depositan los materiales sólidos transportados por las avenidas, debido a la súbita reducción de las velocidades con que se trasladan las crecidas. Como se anticipara, una de las características más relevantes de las crecientes del río de la Flecha, son los elevados gastos sólidos acarreados en suspensión y por arrastre de fondo. En los embalses de reducidas y medianas dimensiones, los materiales pétreos suelen sedimentar en cercanías de las presas, por lo que frecuentemente se introducen y depositan en los orificios de salida. Siendo ésta en algunos casos la causa de la destrucción de los diques, con efectos catastróficos hacia aguas abajo.

Bibliografía

Centro Regional Andino, 1997 y 2008 - "Tormenta de Proyecto en Base a Mediciones en el Pedemonte del Gran Mendoza", Curvas IDF para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, Instituto Nacional del Agua.

Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS), 2013. Información hidrológica, meteorológica e hidrogeológica de archivos.

Centro Regional de Aguas Subterráneas, 1975 "Investigación del agua subterránea área Pedernal – Bachongo – Acequión, Dpto. Sarmiento, San Juan. CRAS P-075 y P-188.

Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan, 2007 y 2012. Información pluviométrica obtenida de archivos.

Rühle, Federico, 1966 - "Determinación del Derrame Máximo Superficial de las Cuencas Imbríferas", Dirección Nacional de Vialidad, Publicado en el Nº 987 de la revista "La Ingeniería", Centro Argentino de Ingenieros.

Salvioli, Gerardo, Mérida Silvia y Salvioli, Dante, 2013 – "Hidrología de la cuenca del río de la Flecha. Propuesta de obras de aprovechamiento de los caudales superficiales y subálveos y obras de defensa contra crecidas". Cátedra "Estudios Hidrológicos", Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan.

Actualización del modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní y la influencia geológica en el sector argentino

Andrés Mira[1], Leticia Rodríguez[2], Gerardo Veroslavsky[3] y Luis Vives[1]

[1] Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul), República de Italia 780, (B7300) Azul, Buenos Aires, Argentina.
[2] Centro de Estudios Hidro-ambientales – CENEHA. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Ciudad Universitaria CC 217 Ruta Nacional 168 Km 472.4, 3000 Santa Fe, Argentina.
[3] Facultad de Ciencias, Universidad de la República (UDELAR), Iguá 4225, CP 11400, Montevideo, Uruguay.

Mail de contacto: andresmira@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) se extiende por Brasil, Paraguay, Uruguay y Argentina. Es un acuífero continuo formado por areniscas mesozoicas de las cuencas de Paraná y Chacoparanense. Su límite inferior es una discordancia finipérmica y el superior los basaltos cretácicos. Entre esos materiales se producen movimientos verticales de agua. En áreas aflorantes de capas del SAG se produce recarga y descarga, al igual que a través de los basaltos fracturados. A mayor escala la descarga se produciría por el borde oeste del acuífero, el sur de Brasil y a favor de los grandes ríos. El flujo sigue un sentido NE a SW, condicionado por las estructuras tectónicas. Una de ellas, la Dorsal Asunción-Rio Grande eleva la serie sedimentaria del SAG hasta casi situarla en superficie y junto con el menor espesor en basaltos, condiciona que esta área sea proclive a la recarga local y la descarga regional.
Palabras clave: Sistema Acuífero Guaraní, modelo hidrogeológico conceptual, Dorsal Asunción-Rio Grande.

ABSTRACT

The Guarani Aquifer System (GAS) extends through Brazil, Paraguay, Uruguay and Argentina. It is a continuous aquifer made up of Mesozoic sandstones of the Paraná and Chacoparanense basins. Is bounded at its base by a Permo-Triassic unconformity and at the top by Cretaceous basalts. There are vertical movements of the water between those rocks formations. Recharge and discharge occurs in outcrops areas, as through fractured basalts. On a larger scale the discharge would occur by the western side of the aquifer, southern Brazil and along large rivers. The flow follows a NE to SW direction, conditioned by tectonic structures. One of them, the Asuncion-Rio Grande Arc rises SAG sedimentary series near the surface and with the reduced thickness in basalts, produces that this area is prone to local recharge and regional discharge.
Keywords: Guarani aquifer system, hydrogeological conceptual model, Asunción-Rio Grande range

Introducción

El Sistema Acuífero Guaraní con casi $1.1x10^6$ km² es uno de los reservorios de agua subterránea de mayor extensión en el mundo con carácter transfronterizo, ocupando parte de Brasil, Paraguay, Uruguay y Argentina (Figura 1). De él se abastecen $9x10^6$ habitantes y se le estiman unas reservas de agua dulce de entre 25.000 y 40.000 km³ (Fili et al., 1998; Araujo et al., 1999; LEBAC, 2008; Schmidt, 2009; Síndico, 2011).

El objetivo de este trabajo es actualizar el modelo hidrogeológico conceptual de funcionamiento del SAG y, en particular, intentar clarificar las características geológicas de la porción argentina del acuífero, donde es menos conocido y más incertidumbres existen en cuanto a su estructura y configuración.

Método

Se realizó una recopilación y valoración de las definiciones dadas por diferentes autores al SAG en cuanto a qué niveles lo componen y los

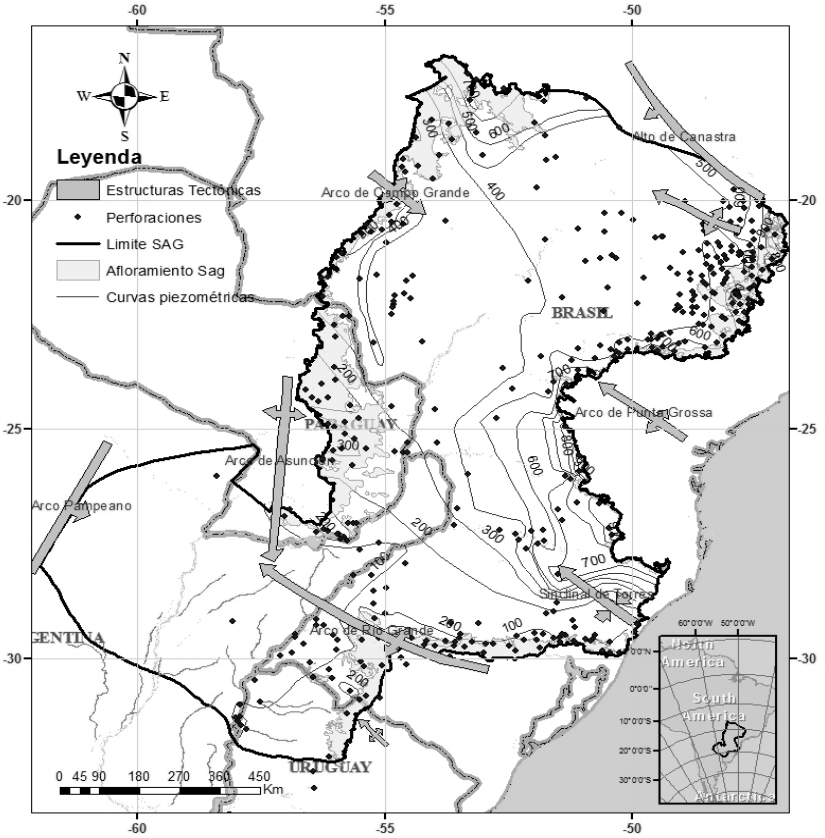


Figura 1. Mapa de ubicación del SAG, principales estructuras y pozos utilizados para trazar las curvas piezométricas. Modificado de Mira (2012)

límites del acuífero. Se trazó un mapa de curvas piezométricas a partir de datos de 361 pozos teniendo en cuenta las características geológicas y tectónicas de la cuenca, y la influencia que éstas tienen sobre el flujo así como las particularidades hidrogeoquímicas e isotópicas de las aguas subterráneas. Se realizaron campañas en el sector argentino para analizar muestras de rocas en afloramientos y de agua en perforaciones. Se realizó un mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer y, a partir de él, se generó un modelo geológico 3D de la provincia de Corrientes.

Resultados

Desde un punto de vista conceptual, el funcionamiento regional del SAG está condicionado por su estructura geológica (Gastmans et al., 2012), que pasa a describirse en detalle.

Características geológicas

El SAG se encuentra ubicado en las cuencas Chacoparanense y Paraná, rellenas con hasta 7000 m de espesor de rocas ígneas y sedimentarias que abarcan todo el registro fanerozoico.

El basamento de las cuencas está formado por un mosaico de rocas precámbricas, en su mayoría granitos, granitoides y rocas metamórficas de grado variado (Preciozzi et al., 1985). El relleno sedimentario de ambas cuencas posee rasgos geológicos comunes durante el Paleozoico y el Mesozoico, toda vez que sus registros están vinculados a eventos y ciclos tectónicos ligados a la evolución de Gondwana Occidental.

Hacia finales del Pérmico, el levantamiento generalizado del basamento cratónico sumando a la reactivación de antiguas fallas fue

definiendo, en forma progresiva, la pérdida de conexión con el paleoocéano Panthalassa, dando comienzo a una continentalización de los depósitos (Zalán et al., 1990; Gastmans et al., 2012). Esa continentalización y cierre de las cuencas paleozoicas de Paraná y Chacoparanense se expresa en el amplio predominio de sedimentitas fluviales y éolicas que se reúnen en unidades litoestratigráficas con nombres distintos por países y regiones. Así ese episodio de continentalización está representado por la Formación Buena Vista (con un miembro eólico y otro fluvial, Santa Ana et al. 2008) la que se observa en el subsuelo de la Mesopotamia y en buena parte de la Cuenca Norte uruguaya. En continuidad con los afloramientos de Uruguay, esas areniscas continentales de finales del pérmico se expresan en el estado de Rio Grande do Sul en la Formación Sanga do Cabral (en el sentido de Soares et al. 2008). En los estados brasileños de Santa Catarina, Paraná y San Pablo ese cierre del Pérmico está dado por las Formaciones Rio do Rastro que incluye tramos deltaicos, lacustres, fluviales y eólicos y más al norte, la Formación Corumbataí, constituida por estratos de pelitas y areniscas rojas que representan sistemas transicionales. En el borde oeste de la Cuenca de Paraná, en los estados de Goiás, Mato Grosso no se reconocen términos finipérmicos continentales correlacionables a los anteriores y posiblemente en el sur de Mato Grosso do Sul, y nítidamente en Paraguay, afloran equivalentes de areniscas rojas continentales agrupados en la Formación Tacuary.

En discordancia con esas unidades finipérmicas se desarrolla durante el Mesozoico una sedimentación de origen continental, y esencialmente siliciclástica arenosa, que agrupa a todas las unidades sedimentarias que constituyen en SAG (Figura 2). La aparición de los primeros derrames de basaltos conforman el Grupo Serra Geral (Wildner et al., 2007) y define el límite superior del SAG en ambas cuencas.

Geocrono-logía	**Estratigrafía**					
		Brasil Cuenca Paraná Sur Centro Norte	Paraguay Cuenca Paraná	Uruguay Cuenca Norte de Uruguay	Argentina Cuenca Chaco-paranense	
Cretácico	POST-SAG	Serra Geral	Alto Paraná	Arapey	Serra Geral	
Jurásico	SAG	Botucatú Guará	Misiones	Tacuarembó Itacumbú	Misiones o Tacuarembó	**Discor-dancia local**
Triásico	SAG	Piramboia Caturrita Santa María				**Discor-dancia regional**
Pérmico	PRE-SAG	Sanga do Cabral Rio do Rastro Corumbataí	Tacuary	Buena Vista Yaguarí	Buena Vista	

Figura 2. Cuadro cronoestratigráfico señalando las formaciones que constituyen el SAG.

En Rio Grande do Sul aparecen sedimentitas triásicas, que corresponden a las Formaciones Santa María y Caturrita (Triásico Medio y Superior), ambas compuestas por depósitos continentales, fosilíferos, de origen fluvial y con eventos lacustres asociados (LEBAC, 2008). Está sedimentación está restringida a los alrededores de la localidad de Santa Maria, y no se conocen equivalentes triásicos correlacionables.

Durante el Jurásico y el Cretácico se desarrolla una extensa sedimentación continental, esencialmente eólica con episodios fluviales y/o aluviales asociados que lo representan en la Cuenca de Paraná la Formación Pirambóia y la Formación Botucatu. Las relaciones estratigráficas de estas unidades sería de discordancia, muy probablemente asociado a un cambio tectónico que modificó las áreas fuentes así como un visible cambio climático, de húmedo (Formación Pirambóia) a árido seco (Formación Botucatu). En el borde sur de la Cuenca de Paraná, los términos correlatos a la Formación Pirambóia son los que se reúnen en la Formación Guará, mientras que en Uruguay serían equivalentes a la Formación

Tacuarembó. La Formación Botucatu de la Cuenca de Paraná encuentra sus correlatos en las Formaciones Tacuarembó (Mb. Rivera) en Uruguay y Misiones (Argentina y Paraguay).

Los primeros derrames de basaltos aparecen en extensas regiones intercalados a paquetes métricos de areniscas eólicas, si bien en sectores de Argentina y Paraguay esta intercalación de areniscas y basaltos pueden poseer una expresión vertical significativa.

El magmatismo básico que cubrió las areniscas eólicas está asociado a la desagregación continental que dio origen al nacimiento del océano Atlántico hacia el Jurásico Medio. De una forma general, ese magmatismo se expresa en el Grupo Serra Geral (ver equivalentes en la Figura 2), unidad donde se incluyen una serie de rocas efusivas en forma de filones y sills que se intercalan entre sedimentos pérmicos y cortan las formaciones permotriásicas con una dirección preferente NW (Comin-Chiaramonti et al., 1999; Santa Ana y Veroslavsky, 2003).

En la cuenca de Paraná se acumularon en coladas hasta alcanzar un espesor superior a 1500 m, con una disminución de la potencia hacia los bordes (Fariña et al., 2007). Las coladas están compuestas por distintos grupos litológicos: brechas basálticas (con clastos lávicos), basalto con textura vesicular y amigdaloide y basalto denso de textura porfírica que representa la mayor parte de los afloramientos. Intercalados en algunos niveles basálticos se presentan brechas peperíticas, que indican interacción entre lavas y sedimentos no consolidados húmedos (Lagorio y Leal, 2005). El grado de fracturación es mínimo en las brechas y máximo en la roca densa siendo en ésta, además, de tipo horizontal en los niveles inferiores y vertical en los superiores. Han sido datados entre 137 y 127 millones de años (Ma) según Milani et al. (2007).

Los basaltos, como fue señalado, presentan intercalaciones clásticas de la denominada Fm. Solari (Herbst et al., 1985). Son areniscas homogéneas de color amarillento a rojizo, bien seleccionadas y finamente laminadas, con más de 95% de granos de cuarzo.

El espesor de estas intercalaciones de areniscas tiene un máximo de 80 m en la zona correntina de Tres Cerros (Herbst et al., 1995). Este último afloramiento fue interpretado por Silva Busso y Fernández Garrasino (2004) como una ventana de la Fm. Misiones aduciendo que la orientación estructural que posee, de dirección NW-SE, parece coincidir con las principales orientaciones de las fracturas regionales. Según el modelo gravimétrico tridimensional 3D (Mira, 2012) la capa de basaltos estaría muy adelgazada en esa zona (Figura 3), y aparentemente tiene continuidad lateral según datos de sondeos AMT (Geodatos, 2008).

De manera discordante (no-conformidad) sobre los basaltos Serra Geral se sitúan una serie de sedimentos detríticos, fundamentalmente arenosos y calcáreos, que alcanzan un espesor máximo de 300 m. Los más antiguos corresponden al Cretácico Superior y los más recientes son del Pleistoceno - Holoceno.

Uno de los rasgos estructurales más importantes por su implicanción en el comportamiento del SAG es la Dorsal Asunción-Río Grande (DARG). Esta estructura se caracteriza por tener un segmento intermedio sin afloramientos del basamento, donde habría un hundimiento relativo respecto de los extremos, que podrían estar representados por dos fallas subparalelas al río Uruguay en el extremo noreste de la Mesopotamia. Esta estructura, hacia el noreste de la Cuenca de Paraná podría estar ligada al denominado rift central (Milani, 2004; Rossello et al.2006).

Con el objetivo de resolver su geometría, Mira (2012) realizó un modelo 3D en base a datos de anomalía gravimétrica de Bouguer. Los resultados alcanzados expresan que la DARG tendría un ancho menor de 100 km y una profundidad inferior a 2000 m, y presenta una clara tendencia somerizante hacia el NW de tal forma que en la confluencia de los ríos Paraná y Paraguay la profundidad del basamento sería inferior a 1000 m.

Asimismo, Mira (2012) establece que existe una relación directa entre la profundidad del basamento y el espesor de la roca volcánica coincidiendo con la DARG, denotando el control de esta estructura durante los episodios de efusión lávica (Figura 3).

Las direcciones predominantes de las principales lineaciones tectónicas de carácter regional son NE y NW, coincidentes con el esquema general propuesto por Zalán et al. (1990).

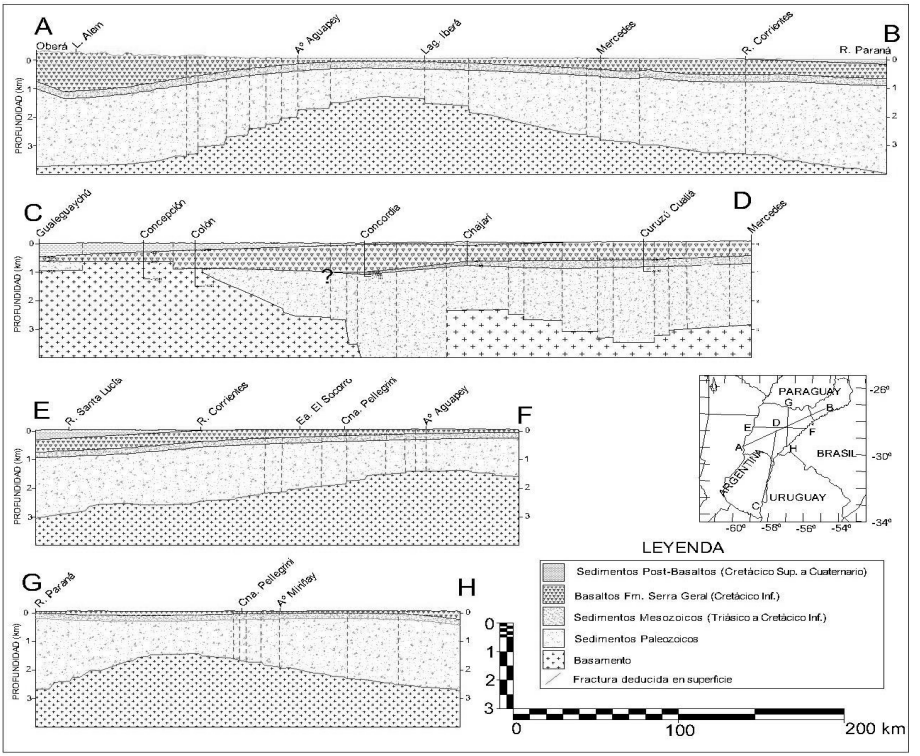


Figura 3. Cortes geológicos representativos de la zona de estudio, en base a perforaciones y el modelo gravimétrico de Mira (2012)

La dirección noreste es la misma que presenta la cuenca sedimentaria de Paraná reflejando los esfuerzos tectónicos que la configuraron. La dirección noroeste responde a los fenómenos distensivos acaecidos durante la separación de Gondwana. Los planos de debilidad fueron aprovechados por las lavas surgidas en este evento para imbricarse entre los sedimentos dando lugar a enjambres de diques de diabasas.

La orientación de los fotolineamientos marcados a partir de imágenes LANDSAT en la parte meridional de la provincia de Corrientes es N75E y N315E. Esto muestra que la orientación de las grandes lineaciones regionales tiene respuesta en superficie (Mira. 2012).

Las señales sísmicas de las secciones disponibles en Corrientes, realizadas por YPF a comienzos de la década de 1980, muestran una cubierta de basaltos con un espesor medio de 500 m, aunque cambia lateralmente debido a fracturas de alto ángulo (Mira, 2012). Se aprecia la continuidad del nivel de roca volcánica en toda la longitud de los perfiles sísmicos, desechando así la hipótesis planteada por diversos autores (Araújo et al., 1999; Montaño et al., 2002; Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004) que las areniscas aflorantes en Mercedes (Corrientes) son ventana de la Fm. Misiones.

Geometría

Los límites del SAG estarán definidos tanto por el espesor de las capas acuíferas como por la extensión lateral, teniendo en cuenta la continuidad física de las cuencas de Paraná y Chacoparanense. El espesor oscila entre 8 y 640 m, con una media representativa de 250 m (Gastmans et al., 2012).

Los límites Occidental y Oriental de la Cuenca de Paraná se definen a partir de la posición de los afloramientos de las unidades geológicas del SAG. Existe un control estructural de tal forma que las capas sufren inflexiones asociadas a los sinclinales (arcos) de Ponta Grossa y Rio Grande. El límite norte está condicionado por el acuñamiento de las unidades del SAG y el solapamiento de los

basaltos de la Fm. Serra Geral sobre el basamento. La delimitación occidental del SAG en territorio argentino vendría definida por el relieve de las Lomadas de Otumpa (Rossello y Veroslavsky, 2012), y el suroeste del SAG está trazado en función de los datos de los pozos realizados en la Cuenca Chacoparanense donde se comprueba la no existencia de materiales SAG en pozos como Nogoyá, San Cristóbal, Colón o Concepción del Uruguay, entre otros (LEBAC, 2008).

Modelo hidrogeológico conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual que se propone para el SAG quedaría resumido en los siguientes puntos:

1. Está formado por capas de arenas y areniscas de cantos de cuarzo, con origen continental y de edad mesozoico. Tienen una capacidad elevada de almacenar y transmitir agua y con continuidad física (o aparente continuidad), desarrollándose en superficie y subsuelo de las cuencas de Paraná y Chacoparanense.

2. Estarían limitadas a techo y muro por discontinuidades geológicas de carácter regional. No son límites estancos que aíslan a un paquete rocoso. En su base, la discordancia permotriásica erosiona una gran variedad de unidades de distinta edad y naturaleza, principalmente arenosa hacia el sur, donde con más frecuencia se producirán movimientos verticales de agua entre las capas. El techo estaría definido por el muro de los basaltos de Fm. Serra Geral, que constituyen un acuífero libre, anisótropo y con porosidad en fisuras.

3. Las características geológicas imponen las condiciones de contorno del acuífero. El levantamiento tectónico de la cuenca, más acusado en su mitad oriental, marca una tendencia del flujo a desplazarse de norte a sur y de este a oeste. Las áreas de recarga se circunscriben a las zonas de afloramiento de las capas constituyentes del SAG y a través de la capa de basaltos, sobre todo allí donde su espesor es menor. Las áreas de descarga estarían asociadas igualmente a las zonas de afloramiento de areniscas del SAG donde formarían un sistema local de recarga y descarga rápida. A mayor escala, la descarga se produciría por todo el borde oeste del acuífero o hacia el sur de Rio Grande do Sul. También habría descarga a favor de ríos como el Paraná, Tieté, Uruguay y Pelotas.

4. Las grandes estructuras tectónicas influyen en su configuración geométrica y en el flujo. El Arco de Ponta Grossa induce un flujo radial y los diques de diabasas asociados al eje del pliegue, no suponen una barrera al flujo pero modifican su trayectoria por su conductividad hidráulica menor. La DARG, cuyo eje se situaría varias decenas de km hacia el oeste respecto de la posición marcada originalmente por Rossello et al. (2006), elevaría la serie sedimentaria hasta casi situarla en superficie. Sería una franja de territorio proclive tanto a la recarga local de aguas meteóricas como a la descarga regional.

5. El basamento se halla compartimentado en bloques, con unas fracturas que cortan toda la serie sedimentaria y tiene reflejo en superficie, poniendo en contacto lateral materiales de distinta naturaleza sin suponer la interrupción de flujo de agua subterránea.

6. El modelo de evolución geoquímica seguiría las indicaciones de la evolución hidroquímica del agua propuesta por Manzano y Guimaraes (2008) y Gastmans et al. (2012), que divide el SAG en cuatro zonas atendiendo a las características hidroquímicas de sus aguas, pero considerando que las características tectónicas y la presencia de discontinuidades en el acuífero produciría áreas favorables para la circulación ascendente de aguas profundas y de otras donde se produce recarga de aguas de lluvia, como así sería en el caso de la provincia de Corrientes.

Conclusiones

El SAG es un acuífero detrítico de arenas mesozoicas. En Argentina no aflora y los límites son grandes estructuras profundas. En Corrientes el basamento está compartimentado en bloques. Uno de ellos, con una anchura menor de 100 km y una profundidad inferior a 2000 m, sigue una dirección SE-NW, formando un alto estructural, la Dorsal Asunción-Rio Grande, cuya ubicación estaría varios km al oeste de lo supuesto hasta ahora.

El flujo de las aguas subterráneas está influenciado por la tectónica, en particular, el levantamiento del margen oriental de la Cuenca de Paraná, condiciona que el agua se desplace de este a oeste y de norte a sur. La compartimentación y naturaleza de las unidades estratigráficas infrayacentes al SAG también influyen en el quimismo de las aguas favoreciendo flujos verticales: ascendentes de aguas más profundas que las del SAG y descendentes desde los basaltos. La DARG podría condicionar el flujo subterráneo regional del Sistema Acuífero Guaraní y provocar un ascenso de los niveles piezométricos, al tener una orientación perpendicular a éste. Por el menor espesor de basaltos y su intensa

fracturación esta zona es factible de producir descarga y recarga regional de dicho acuífero.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) dependiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la República Argentina mediante el proyecto PICT 2008/2071 Estudio del comportamiento del Sistema Acuífero Guaraní, con énfasis en el sector Argentino y por la Agencia Internacional de Energía Atómica.

Referencias

Araújo, L.M., França, A.B. y Potter, P.E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology Journal*, 7(3): 317-336.

Comin-Chiaramonti, P., Cundari, A., Piccirillo, E. M., Gomes, C. B., Castorina, F., Censi, P., De Min, A., Marzoli, A., Speziale, S. y Velázquez, V. F., 1997. Potassic and sodic igneous rocks from eastern Paraguay: their origin from the lithospheric mantle and genetic relationships with the associated Paraná flood tholeiites. *J. Petrol*.38 495-538

Fariña, S., Schmidt, G. y Vassolo, S. 2007: Volumen 2 - Geología e Hidrogeología. - *Informe no publicado (Proyecto SAG-PY: Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la Región Oriental del Paraguay* SEAM/BGR), No. de archivo BGR 0127039, Asunción, Hannover.

Fili, M., da Rosa Filho, E.F., Auge, M., Montaño Xavier, J. y Tujchneider, O. 1998. El Acuífero Guaraní. Un recurso compartido por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (América del Sur). Instituto Tecnológico Geominero de España. *Boletín Geológico y Minero* 109 (4), 389-394.

Gastmans, D., Veroslavsky, G., Kiang Chang, H., Caetano-Chang, M.R. y Nogueira Pressinotti, M.M. 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (3): 249-265. ISSN: 0336-0176

Geodatos, S.R.L. 2008. *Informe Final sobre Geofísica del SAG*. SNC-LAVALIN. Proyecto SAG, OEA, BM, GEF. Montevideo, 266 p.

Herbst, R. y Santa Cruz, J. 1995. M*apa geológico de la Provincia de Corrientes E: 1:500.000.* Secretaría de Minería. Dirección Nacional del Servicio Geológico de Argentina.

Lagorio, S. y Leal, P.R. 2005. Niveles peperíticos intercalados en los derrames lávicos de Serra Geral, provincia de Misiones. *XVI Congreso Geológico Argentino*, Actas 1: 847-850, La Plata.

LEBAC 2008. *Informe Final de Hidrogeologia do Projeto Aquífero Guarani*. Coord.: Gastmans, D. & Chang, H.K.. Equipe: Paula e Silva, F.; Correa, S.F.;. Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 172p.

Manzano, M. y Guimaraens, M. 2008. *Estudio del Origen dela Composición Química de las Aguas Subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní (SAG*), Informe Técnico – Consórcio Guarani. Montevideo, 120 p.

Milani, E.J. 2004. Comentários sobre a origem e a evoluçao tectónica da Bacia do Paraná. In: Mantesso-Neto V, Bartorelli A, Carneiro CDR, Brito-Neves BB (eds). *Geologia do Continente Americano: Evoluçao da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Becca Produçoes Culturais, Sao Paulo, Brazil, pp 265-295

Milani, E., Gonçalves de Melo, J., Alves de Souza, P., Fernandes, L. y França, A. 2007. Bacia do Parana. B. Geoci. *Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287

Mira, A. 2012. *Modelo conceptual hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní con énfasis en el sector Argentino*. Tesis Fin de Master en Ingeniería del Agua y del Terreno. Universidad Politécnica de Cartagena, España. 244 p

Montaño, J., Ernani, F., Hindi, E., Cicalese, H., Montaño, M.y Gagliardi, S. 2002. Importancia de las Estructuras Geológicas en el Modelo Conceptual del SAG Área Uruguaya. *Revista da ABAS* Numero 16. pp 111 a 119.

Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W. y Rossi, P., 1985. *Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000*. Dirección Nacional de Minería y Geología.

Rossello, E., Veroslavsky, G., Santa Ana, H., Fúlfaro, V.J. y Fernández Garrasino, C. 2006. La dorsal Asunción-Río Grande: un altofondo regional entre las cuencas Paraná (Brasil, Paraguay, Uruguay) y Chacoparanense (Argentina). *Revista Brasilera de Geociencias*, 36, 181-196

Rossello, E. A. y Veroslavsky, G. 2012. Definición del límite occidental del Sistema Acuífero Guaraní (Gran Chaco, Argentina): ¿técnico o convencional? Boletín Geológico y Minero, 123 (3): 297-310 ISSN: 0366-0176

Santa Ana, H. y Veroslavsky, G. 2003. La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte de Uruguay. Edad Jurásico – Cretácico Temprano. En: Veroslavsky, G.,

Ubilla, M. Y Martínez, S (eds.), *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales – Mesozoico*. Dirac – Facultad de Ciencias, p. 51-74.

Santa Ana, H., Veroslavsky, G., Fúlfaro, V.J. y Fernández Garrasino, C.A. 2008. S*íntesis sobre la Geología regional del Sistema Acuífero Guaraní – Informe Técnico PSAG*. Montevideo: Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani, 115 pp,

Schmidt, G. 2009. *Proyecto SAG-PY: uso sostenible del sistema acuífero guaraní en la región oriental del Paraguay (2003–2009)*, Asunción, Hannover.

Silva Busso, A. y Fernández Garrasino, C. 2004. Presencia de las formaciones Piramboia y Botucatu (Triásico – Jurasico) en el subsuelo oriental de la provincia de Entre Ríos, Argentina. *Revista de la Asociacion Geologica Argentina*, 59 (1), 141-151.

Sindico, F., 2011. The Guarani Aquifer System and the International Law of transboundary aquifers. *International Community Law Review* (M. Nijhoff Publishers), 13, 255-272.

Soares, A.P. 2008. *Variabilidade espacial no Sistema Aqüífero Guarani: controles estratigráficos e estruturais*. Tese Doutoramento Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 179 p.

Wildner, W., Hartmann, L.A., Lopes, R.C. 2007 Serra Geral Magmatism in the Paraná Basin - A new Stratigraphic proposal, chemical stratigraphy and geological structures. I Workshop - Problems in Western Gondwana Geology. RGEOTEC. 8 p.

Zalán, P.V, Wolff, S., Conceiçao, J., Marques, A., Astolfi, M., Vieira, I., Appi, V. y Zanotto, O. 1990. Bacia do Paraná. En: De Raja e Milani, E (Ed.) *Origen e Evoluáo das Bacias Sedimentares:* 135-168. Petrobras, 415 p. Rio de Janeiro

Caracterización hidrogeológica del acuífero freático en el entorno de la Laguna Moreno, localidad de Pico Truncado, Provincia de Santa Cruz

Hugo Gabriel Paoletti[1 3], Fernando Leopoldo Perera[1 3], Maria Soledad Ruiz[1], Patricio Agustín Hernandez[1], Alejandro Castilla[2], Sebastian Martino[2], Leonardo Pierrard[2]

[1] Hidroar S.A., Calle 67 Nº 1474 (1900)La Plata, Buenos Aires, Argentina.
[2] YPF S.A., Macacha Güemes 515, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
[3] Cátedra de Hidrogeología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP), Av. 60 y 122 (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.
Mail de contacto: paoletti@hidroar.com

RESUMEN

En el marco de un estudio de diagnóstico ambiental en un sector con intensa actividad antrópica, se desarrolló la caracterización hidrogeológica del acuífero freático en el entorno inmediato y próximo a la Laguna Moreno, situada a unos 3 km al norte de la localidad de Pico Truncado, en el sector centro-norte de la provincia de Santa Cruz. Las principales fuentes de aporte al cuerpo lagunar responden en forma directa a las precipitaciones, al escurrimiento superficial transitorio y al subterráneo, este último definido por el comportamiento centrípeto de la superficie freática. Coincidente con la red de flujo subterránea, los valores de conductividad eléctrica del agua aumentan progresivamente hacia el centro del cuerpo lagunar. Las características y hallazgos de las componentes hidrodinámicas e hidroquímicas del sistema freático investigado, permitieron dilucidar el funcionamiento del acuífero somero respecto a la variable ambiental y antrópica que caracterizan el sitio.
Palabras clave: Acuífero freático, Laguna Moreno, conductividad eléctrica.

ABSTRACT

In the context of an environmental assessment study in an area with anthropogenic activities, was developed the hydrogeology characterization of phreatic aquifer in a surroundings to Laguna Moreno, situated 3 km north of the city of Pico Truncado, in the north-centre area of Santa Cruz province. The main sources of contribution to the shallow lake body reply in a direct way to the precipitation, to the transitory superficial run-off and groundwater flow, this last was defined by the centripetal behavior of the phreatic surface. Coincident with the local groundwater surface, the values of electrical conductivity of water rising towards the center of the shallow lake. The characteristics and findings of the hydrodynamic and hydrochemical components of the groundwater system investigated, clarify the functionality of hydrogeological system respect to environmental and anthropogenic variables that characterize the site.
Keywords: Phreatic aquifer, Laguna Moreno, electrical conductivity.

Introducción

El comportamiento del acuífero freático en torno a cuerpos de agua salinos, emplazados en la Patagonia Argentina, se encuentra influenciado por el conjunto de factores climáticos, geológicos e hidrológicos que caracterizan la región.

En áreas como la de estudio, a estos factores naturales se suman los efectos provocados por la intensa actividad antrópica vinculada a prácticas recreativas, agroganaderas e industriales donde se destaca la industria hidrocarburífera como principal actividad motora de la economía local.

Con el objetivo de definir el medio subterráneo local, en el marco de un estudio de diagnóstico ambiental, se llevó a cabo un análisis detallado de las condiciones que integran el sistema de estudio.

El ámbito se emplaza 3 km al norte de la localidad de Pico Truncado, hacia el centro-norte de la provincia de Santa Cruz y abarca el área central de la Cuenca del Golfo San Jorge. (Figura 1)

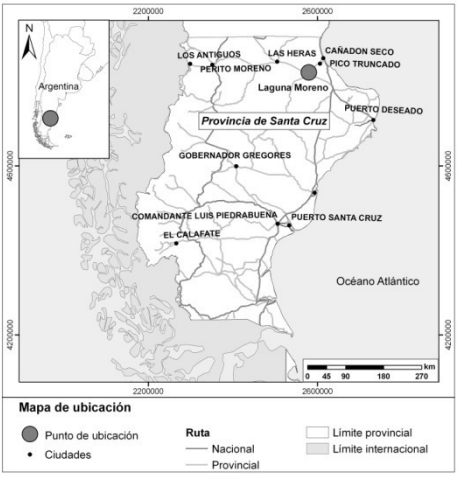


Figura 1. Mapa de ubicación

Características del área

Clima

El clima es de tipo árido, mesotermal con nulo exceso de agua y concentración estival de la eficiencia térmica < 48 % (Thornthwaite, 1948), desértico, frío y seco (Köppen-Geiger, 1936). La lluvia media anual alcanza los 228 mm/año, concentrada preferentemente en el semestre frío, existiendo un déficit hídrico de 499 mm/año. Los vientos, persistentes del cuadrante oeste, son más intensos en la estación estival, con velocidades medias superiores a los 30 km/h.

Geología

La geología que caracteriza el área (Figura 2) se corresponde con unidades que van desde el Jurásico hasta la actualidad. La columna estratigráfica se compone de base a techo por:

- Grupo Bahía Laura (Jurásico): Complejo ignimbrítico, lávico - sedimentario integrado por las Fm. Chon Aike y La Matilde. (Lesta y Ferello, 1972)
- Grupo Chubut (Cretácico): Depósitos continentales de areniscas de ambiente aluvial y fluvial meandroso con participación piroclástica. (Lesta, 1968)
- Fm Salamanca (Paleoceno inf.): Areniscas y arcillitas de ambiente de marino costanero que evoluciona a plataforma interna. (Paredes, 2002)
- Fm Río Chico (Paleoceno sup.): Sedimentitas continentales que se presentan al SO del área de estudio como arenas finas con intercalaciones de niveles arcillosos, sobre los bordes de terraza. (Heizler *et al*., 1998)
- Fm Sarmiento (Oligoceno Inf.): Integrada por tobas, sedimentitas piroclásticas primarias o reelaboradas asociadas a bentonitas cineríticas. Depositadas en planicies aluviales de bajo gradiente. (Paredes, 2002). Se manifiestan en el Gran Bajo Oriental, la porción central de la margen norte del río Deseado y el cuerpo del Cerro Mesa.
- Fm. Chenque (Mioceno Inf.): Se manifiesta como facies finas de limolitas hacia la base que gradan a areniscas de estratificación masiva en la sección superior con intercalaciones piroclásticas que alcanzan hasta 15 m. (Barreda, 1989 y Bertels, 1970). Se presenta en el subsuelo del área de estudio y se corresponde a la segunda ingresión que tuvo lugar en la cuenca del Golfo San Jorge.
- Basaltos Oligocenos: Coladas superpuestas de basaltos olivínicos con estructura inferior maciza y superior laminar. Se desarrollan hacia el SW, en el tope del cerro Pico Truncado.
- Depósitos de terrazas fluviales del río Deseado-Nivel I (Pliocenas Inf.): Integran los depósitos de base del presente estudio. Compuestos por conglomerados con estructura de barra clasto-sostén e intercalaciones de areniscas lentiformes que gradan desde el sector encauzado, con una secuencia granodecreciente de arenas, hasta la zona distal donde se presentan lentes de arenas interestratificadas con gravas.
- Depósitos de terrazas fluviales del río Deseado-Nivel II (Plioceno sup.): Presentan un desarrollo morfológico y litológico similar al nivel anterior. Evidencian mayor participación de areniscas y menor tamaño promedio de gravas que se distribuyen a lo largo del río Deseado. (González Arzac *et al*., 1991)
- Depósitos aluviales y coluviales indiferenciados, bajos y lagunas (Holoceno): Integrados por arenas finas a medianas, limos y arcillas subordinadas que se localizan en el área de estudio y en el sector del valle del Rio Deseado.

Geomorfología

En relación a las condiciones geomorfológicas se evidencia un relieve mesetiforme, resultante del accionar de procesos fluviales y eólicos. El rasgo más notorio está representado por el valle del Río Deseado, al sur del área de estudio, al cual se vinculan seis niveles de terrazas con una suave

pendiente regional hacia el este. La intensa erosión hídrica, da origen a una serie de cañadones que junto a bajos endorreicos, de origen estructural o eólico, posibilitan la formación de cuerpos de agua efímeros y salitrales. (Beros *et al*., 1986)

Hidrología superficial

El ciclo hidrológico superficial posee en la actualidad escasa significación, debido a las condiciones climáticas existentes, que difieren considerablemente de aquellas imperantes durante la formación de la red relictual. La componente más importante, comprende al río Deseado, de carácter alóctono y transitorio, destacándose las aguadas El Chaca, del Norte y Pessolano.

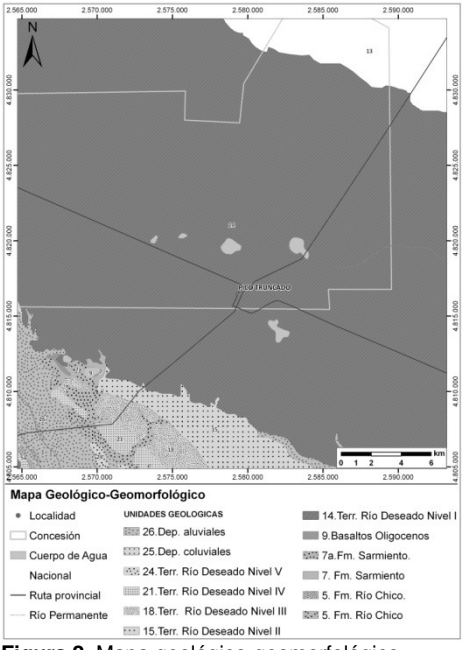


Figura 2. Mapa geológico-geomorfológico

Al E de la Meseta Espinosa se reconocen una serie de cañadones como Minerales, Seco, del Zorro, Algarrobo, Esther y Quintar, relictos de una red pasada más densa.

El Cañadón Minerales, surca el área desde el NO, originalmente NO-SE, para variar sucesivamente a rumbos NNO-SSE, O-E y ONO-ESE hasta que ingresa a la Laguna Moreno. Posteriormente discurre hacia el E y desemboca en el Océano Atlántico hacia el S de la Punta Bauzá. Conserva un diseño de drenaje de patrón dendrítico, actualmente desdibujado, con predominio de afluentes por la margen izquierda. En ocasiones, adquiere un caudal capaz de erosionar las márgenes y generar cárcavas.

La otra componente de la hidrología superficial es el almacenaje de agua en la meseta que se produce a través de lagos, lagunas, y cuerpos de agua efímeros a modo de enlagunamientos o salitrales.

En general se trata de bajos interfluviales o tectónicos, retrabajados posteriormente por actividad eólica (pfannen), como es el caso del sitio de estudio, que se ubica en un bajo interfluvial y se encuentra vinculado a un evento tectónico epigénicamente modelado hasta la actual geoforma.

Hidrología subterránea

Para la identificación del sistema geohidrológico local, se toma como base la sistemática hidrogeológica de la zona este del Golfo San Jorge, que propone la existencia de un Acuífero Multiunitario, cuya parte superior incluye a las unidades de interés en Laguna Moreno. (Castrillo *et al*., 1982 y Grizinik *et al*., 1996)

En este caso el Sistema Geohidrológico Superior o activo (SGS), está compuesto por una Zona No Saturada (ZNS) de espesor variable, el acuífero freático, uno/dos semiconfinados o confinados y al menos uno confinado, en todos los casos en terrenos terciarios por encima de la Formación Salamanca (Paleoceno).

El Sistema Geohidrológico Inferior (SGI) está integrado por la mencionada formación y las Fms. cretácicas y jurásicas infrayacentes: Grupo Chubut, portadora de acuíferos en medio poroso y fisurado y Grupo Bahía Laura, en medio netamente fisurado.

En base al objetivo de estudio, el sector de análisis se limita a la porción más superficial que constituye el acuífero freático del área.

Metodología de trabajo

Realización de sondeos

La descripción de los sedimentos que conforman la zona no saturada se llevó a cabo mediante la ejecución de sondeos exploratorios en los sectores periféricos, márgenes e interior de la laguna. El objetivo no sólo respondió a la descripción y correlación litológica sino también a la identificación de sectores de terreno natural y de relleno antrópico.

Agua superficial

Se reconocieron los distintos sectores del cuerpo de agua principal (de origen natural y antrópico) y las principales fuentes de aporte a lo largo del período de estudio (noviembre 2011 – octubre 2012).

La selección de los puntos de monitoreo del agua superficial se realizó considerando la ubicación de cuerpos de agua aislados (piletones), cañadones de ingreso de escurrimiento superficial y margen de la laguna Moreno con afloramiento permanente de agua subterránea.

En cada sitio se determinaron las propiedades físicas in situ, tales como pH, temperatura y conductividad eléctrica.

Agua subterránea

Con el objetivo de determinar el funcionamiento hidrogeológico y las características ambientales del acuífero freático en el área de influencia de la laguna, se ejecutaron 22 freatímetros de variada profundidad cuya ubicación respondió principalmente a la información antecedente de significancia ambiental. El diseño y la profundidad final de los pozos se estableció según la profundidad del nivel agua y las características hidrolitológicas reconocidas durante el control geológico. Todas las perforaciones se realizaron sin la adición de agua ni aditivos (mediante helicoide y aire reverso). Los puntos de agua, superficiales y subterráneos, fueron relevados planialtimétricamente mediante un equipo GPS Diferencial con precisión centimétrica.

La determinación de los parámetros hidrogeológicos se realizó mediante ensayos hidráulicos que incluyeron la ejecución de un ensayo de bombeo por el método de descarga constante y no-equilibrio, (Custodio y Llamas, 1983), como así también ensayos para la determinación de la Permeabilidad (K) por el método de inyección a carga variable (método de Hvorslev), (Hvorslev, 1951).

Resultados

Caracterización de los sedimentos del área– Perfiles litológicos.

El análisis detallado de las descripciones litológicas realizadas en los puntos de muestreo, permitió establecer localmente el predominio de ciertas litologías características de cada sector de la laguna.

Considerando la geomorfología del área, que ubica a la laguna en una zona deprimida respecto al terreno circundante, con su margen S más elevada en relación a la margen opuesta, se observó que los sondeos y freatímetros ubicados en dichas posiciones normalmente presentan gravas en superficie, con una proporción más o menos variable de sedimentos más finos, siendo más potentes en el sector S.

En inmediaciones del sitio “Parque Sonoro”, ubicado hacia el SE de la laguna, los sedimentos presentes desde la superficie y hasta los 4,5 metros de profundidad, corresponden a materiales de relleno, principalmente gravas y rodados de tamaños diversos que alcanzan en ocasiones a superar los 15 cm de diámetro con proporciones variables de arena y limo escasamente consolidados.

Hacia los sectores S, SO y O, se observa mayor participación de la fracción arcillosa, mientras que hacia el N, NE y E o zona de mallín, la granulometría predominante es la limosa-arenosa.

Las márgenes de la laguna, evidenciaron capas de arcilla de escasa potencia, muy plásticas, que en ocasiones presentaban fuerte olor a materia orgánica en descomposición asociada a coloraciones negras, verdes o grisáceas.

En numerosos freatímetros del área del mallín (NE de la laguna), la presencia de paquetes de arenas en profundidad coincidió con la aparición del agua subterránea, e incluso hubo casos en los cuales se produjeron surgencias luego de alcanzar dichas unidades.

Con la finalidad de correlacionar localmente las características litológicas reconocidas en los sondeos y freatímetros se realizaron una serie de cortes geológicos, dentro de los que se destacan los que atraviesan la laguna en sentido NE-SO y NO-SE, incluidos como Figura 3.

Funcionamiento del cuerpo de agua superficial

Durante la mayor parte del año la laguna posee un espejo de agua de reducido tamaño, circunscripto a la margen norte, quedando en el resto del área deprimida pequeños encharcamientos y cuerpos anegados de menor extensión.

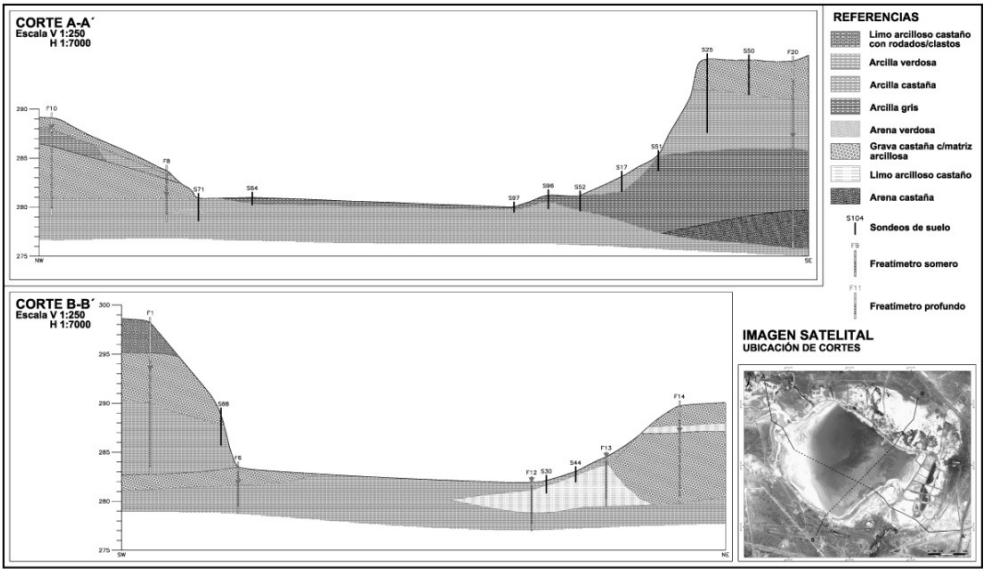


Figura 3. Cortes litológicos. Traza A-A'/B-B'.

Las principales fuentes de aporte a la laguna responden en forma directa a las precipitaciones, al escurrimiento superficial y subterráneo. Las dos primeras ocurren fundamentalmente durante los meses invernales, principalmente en el mes de Agosto logrando el máximo almacenamiento del cuerpo superficial

Las ocasionales precipitaciones registradas pueden generar que el volumen de agua aumente considerablemente durante los meses cálidos, aunque acotado temporalmente por el efecto de la evaporación.
(Hernández *et al.*, 2002)

El aporte proveniente de los numerosos manantiales ubicados en la ladera norte y noroeste de la laguna, que representan puntos de descarga de agua subterránea (freática) se producen en forma continua durante todo el año. En los trabajos de campo se constató que estos manantiales suelen incrementar momentáneamente su caudal luego de producida una precipitación.

En la actualidad el escurrimiento superficial se ve limitado por las obras generadas por la actividad antrópica del área.

Sobre el margen norte, en la zona de mallín donde se encuentran los principales aportes de manantiales, fueron colocadas tuberías en forma de "alcantarillados" que permiten el drenaje del agua desde las áreas de afloramiento hacia la laguna.

Otro sector que se encuentra ampliamente afectado por modificaciones industriales es la zona de las piletas de saneamiento, las cuales generan pequeños cuerpos de agua efímeros durante los periodos lluviosos.

En síntesis, el escurrimiento fluvial es de régimen transitorio efímero, resultando en cambio importante la capacidad de almacenaje superficial en el cuerpo natural.

Hidrodinámica freática

El mapa equipotencial (Figura 4) elaborado a partir de los niveles potenciométricos del agua en freatímetros y puntos de muestreo de agua superficial, evidencia un sentido de flujo netamente centrípeto, con morfología de la superficie freática cilíndrica convergente, que pasa a radial hacia el E. El comportamiento del cuerpo lagunar resulta por lo tanto efluente o ganador respecto al acuífero freático.

Esta relación destaca la fuerte influencia de la geoforma negativa que alberga la laguna en el control de la hidrodinámica subterránea, como ocurre con otras localizadas en la meseta Espinosa y del Cordón.

Los mayores gradientes hidráulicos ocurren en el sector suroccidental, con valores del orden de $6{,}4.10^{-2}$, relativamente elevados respecto al entorno. Hacia el E y NE alcanzan respectivamente a $2{,}1.10^{-2}$ y $1{,}7.10^{-2}$, mientras

que los menores se hallan en el flanco oriental, con valores medios de 9.10^{-3}.

Los cambios en los gradientes hidráulicos mantienen cierta analogía respecto a las variaciones litológicas reconocidas en las perforaciones, coincidiendo los mayores gradientes con las áreas con predominancia de niveles arcillosos, al SO y los menores con las áreas E y NE donde predominan las fracciones limo-arenosas.

La recarga del sistema ocurre en el ámbito de la meseta de El Cordón a expensas de los mecanismos característicos de estos ambientes, como la reducción de las pérdidas consuntivas (por la omnipresencia de vegetación xerófita especializada sin estomas que permiten la traspiración), infiltración rápida (merced al material permeable aflorante y suelos con casi nula capacidad retentiva) y recarga diferida (fusión de hielo o nieve invernal con infiltración concentrada en tiempo reducido, posterior a su ocurrencia), casi seguramente una concurrencia entre estos procesos.

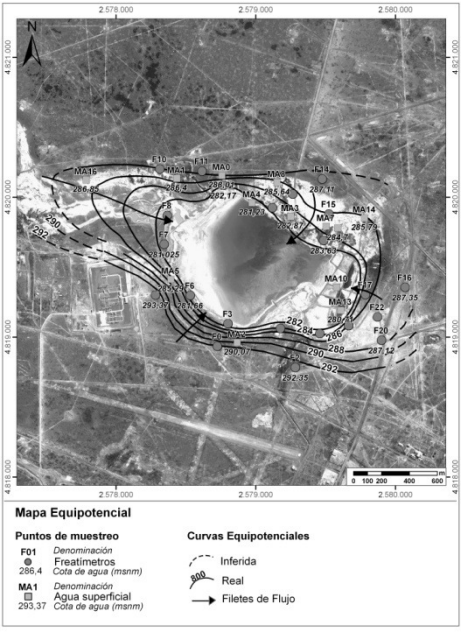


Figura 4. Mapa equipotencial.

Como puede advertirse de lo más arriba referido, la descarga principal sucede en la misma laguna, destinataria final tanto del escurrimiento superficial transitorio como del subterráneo, como indica el mapa equipotencial.

El mapa de isoprofundidad (Figura 5) fue de suma utilidad como auxiliar del equipotencial y ofrece otras evidencias del mecanismo hidrodinámico. La laguna está contornada por la curva de profundidad cero (0) m y circunscripta por la de 4 m, apreciándose la existencia de una expansión de las profundidades menores por fuera de los bordes del cuerpo hacia el Noreste, Oeste y Sudeste.

En todos los casos, coincide con la planicie marginal, desarrollada preferentemente en el primer sentido y sobre la cual manan los manantiales arriba mencionados y hacia el Oeste, con lo que habría sido un antiguo tributario, hoy curso temporario. Sobre la margen SO está reducida al mínimo, coincidiendo con el borde escarpado que pareciera ratificar la génesis tectónica arriba propuesta.

Figura 5. Mapa de isoprofundidad

En particular, sobre el sector del mallín (NE), se reconoce un comportamiento semilibre del acuífero, evidenciado en la surgencia de cuatro de los freatímetros construidos (Figura 4) y en la presencia de sedimentos subsuperficiales conformados por fracciones finas que generan localmente cierto grado de confinamiento.

Los resultados obtenidos en los ensayos hidráulicos muestran valores de permeabilidad del orden de 3 m/d para el sector SE y en uno o

dos órdenes de magnitud menor para el resto del área, principalmente en el sector proximal de la laguna.

En todos los casos se reflejan valores coherentes con las características litológicas del sector estudiado, con resguardo de la escala representada en cada ensayo.

Tabla 1. Ensayos hidraúlicos

N° Pozo	Método	Permeabilidad (m/d)
F1	Hvorslev	0.02
F10	Hvorslev	0.20
F19	Hvorslev	0.03
F20	Theis	3.00

Características químicas del agua superficial y subterránea

El área de influencia de la Laguna Moreno está caracterizada por aguas superficiales y subterráneas de variada salinidad con valores extremos de conductividad eléctrica (CE) entre 1.080 µS/cm en el sector del mallín hasta mayores a 150.000 µS/cm en el propio cuerpo de agua superficial.

En este sentido resulta un elemento de valor diagnóstico la representación de la variación espacial de las medidas de conductividad eléctrica en agua (equiparable a salinidad), para la elaboración de un Mapa de Isoconductividad Eléctrica (Figura 6). Se tuvieron en cuenta los valores medidos in situ en manantiales, puntos de muestreo de agua superficial y freatímetros, a partir de los cuales se elaboraron curvas de igual CE según una equidistancia de 5.000 µS/cm. Debido a la amplitud de valores reconocidos se adoptó como valor máximo representable a la curva de 15.000 µS/cm.

Los valores de CE inferiores a 5.000 µS/cm (en su mayoría inferiores a 2.500 µS/cm) ocurren en los sectores superiores de la meseta, a excepción del sector NE (mallín) donde alcanzan el límite propio del cuerpo de agua superficial.

Coincidente con la red de flujo subterránea, los valores de CE aumentan progresivamente hacia el centro del cuerpo lagunar hasta alcanzar máximos de 57.500 µS/cm en el agua subterránea y mayores a 150.000 µS/cm en el agua superficial.

Estos valores responden al funcionamiento de la laguna como punto terminal de la descarga subterránea, donde ocurre en forma permanente la evaporación del solvente y concentración progresiva de los solutos, hasta alcanzar una concentración salina entre tres y cuatro veces la del agua de mar.

En cuanto al agua subterránea, a excepción del sector del mallín, los máximos coinciden con los freatímetros ubicados en la planicie lagunar, donde el agua y los sedimentos están directamente afectados por los fenómenos superficiales de concentración de sales, tales como la evaporación.

Por último, se destaca la inflexión de las curvas de isoconductividad en la zona del Parque Sonoro que alcanzan valores superiores a 5.000 µS/cm en la zona alta, en coincidencia con los sectores rellenados con sedimentos del margen de la laguna en trabajos de reacondicionamiento del sitio previo a la instalación del Parque Sonoro.

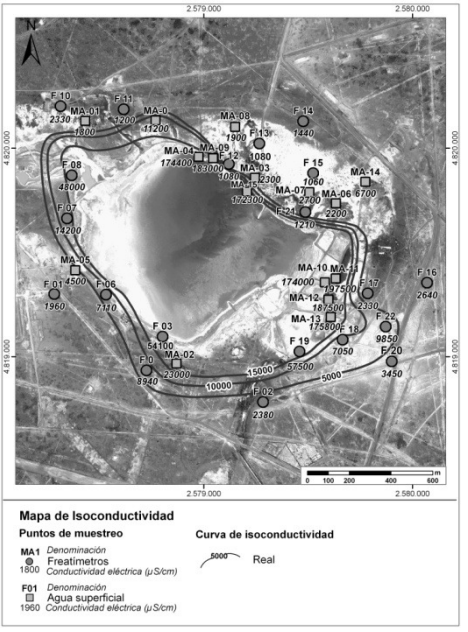


Figura 6. Mapa de Isoconductividad.

Conclusiones

El acuífero freático en el entorno de la laguna Moreno tiene un comportamiento influente según un sentido de flujo netamente centrípeto, representando la fuente de aporte permanente al almacenamiento superficial de agua de la laguna.

El mismo ocurre principalmente a través de manantiales, muy frecuentes en el sector NE, caracterizados por aguas de baja salinidad, que podrían responder a un ingreso reciente.

Coincidente con la red de flujo subterránea, los valores de conductividad eléctrica del agua aumentan progresivamente hacia el centro del cuerpo lagunar desde mínimos inferiores a 2.500 µS/cm en los sectores altos de la meseta hasta alcanzar valores máximos superiores a 150.000 µS/cm en el agua superficial de la propia laguna.

En el marco del estudio de diagnóstico ambiental de la Laguna Moreno, el comportamiento hidrogeológico definido, la relación entre las aguas superficiales y subterráneas desde el punto de vista hidráulico e hidroquímico permitieron establecer el modelo de funcionamiento del sistema proveyendo el marco necesario para la interpretación de las situaciones ambientales reconocidas en el área.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades de YPF S.A. por permitir la divulgación de parte de los trabajos desarrollados en el diagnóstico ambiental de la Laguna Moreno y por la colaboración brindada por todos los profesionales de esa empresa en el área de estudio.

Se extiende el agradecimiento a profesionales y técnicos de Hidroar S.A. que han participado en los trabajos de campo y gabinete.

Referencias

Barreda V. 1989. Palinología estratigráfica de las sedimentitas terciarias del "Patagoniano" en los alrededores de Comodoro Rivadavia, Chubut y Santa Cruz. *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Tesis Doctoral*. 362 pp. (inédito)

Beros, C. & O. Cesari 1986. Niveles gradacionales terrazados del noreste de Santa Cruz. Conclusiones preliminares. *Univ. Nac. Patagónia S.J.B.*, Inédito. Comodoro Rivadavia.

Bertels, A. 1970 Sobre el "Piso Patagoniano" y la representación de la época del Oligoceno en Patagonia Austral. Rep. Argentina. *Rev. Asoc, Geol. Argentina* XXV (4):495-501. Buenos Aires.

Castrillo, E., M. Grizinik y A. Amoroso. 1982. Contribución al conocimiento geohidrológico de los alrededores de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. *UNPSJB.* Comodoro Rivadavia.

Custodio, E. y Llamas M. R. 1983. *Hidrología subterránea*. *Ed. Omega*. Barcelona.

González Arzac, R. J. L. Díaz & B. Calvetty Amboni. 1991. Geohidrología del Area Noreste de la Provincia de Santa Cruz. *Consejo Federal de Inversiones*. Serie Investigaciones Aplicadas, Colección Hidrología Subterránea N° 1. Buenos Aires.

Grizinik, M. & S. Fronza 1996 Hidrogeología de la región situada al Noreste de Las Heras, Provincia de Santa Cruz, Argentina. *XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, Actas IV: 417-425. Buenos Aires.

Hernández, M.A., N. González y R. A. Sánchez. 2002. Mecanismos de recarga de acuíferos en regiones áridas. Cuenca del Río Seco, Provincia de Santa Cruz. Argentina. *XXXII IAH Congress - VI Congreso ALHSUD. Mar del Plata*. Ed. CD Rom y Libro de Resúmenes.

Heizler M., Kay R. F., Madden R.H, Mazzoni M.M., Ré G.H., Sandeman H. y Vucetich M.G. 1998. Geochronologic age of the Casamayoran fauna at Gran Barranca, Chubut Province, Argentina. *7º Congreso Argentino de Paleontología y Biosestratigrafía*. Resúmenes:89.

Hvorslev, M.J. (1951).- Time lag and soil permeability in ground water obsertations. *US Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station*, Bull. 36.

Köppen W. y Geiger R. 1936. Das Geographische System der Klimate. In: *Handbuch der Klimatologie (eds Köppen W y Geiger R), Bd 1, Teil C.* Verlag Gebrüder Bornträger, Berlin.

Lesta, P. J. *1968 Estratigrafía de la cuenca del Golfo San Jorge. III Jornadas Geol. Argentinas*, 1:251-289.

Lesta P. y Ferello R. 1972. Región Extraandina de Chubut y norte de Santa Cruz. En*: Leanza A.F (Ed). Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias Córdoba. Pág. 601-653.

Paredes, J. M. Asociaciones de facies y correlación de las sedimentitas de la Formación Chenque (Oligoceno-Mioceno) en los alrededores de Comodoro Rivadavia, Cuenca del golfo San Jorge, Argentina. *AAS Revista*, 2002.Vol. 9 nº 1:53-64.

Thornthwaite. An approach toward a rational classification of climate. *Geologic. Rev.* Vol.38, 1948, págs 55-94.

El relieve y su incidencia en el hallazgo de agua para abastecimiento humano en la Planicie Medanosa Sudoriental cordobesa

Blarasin Mónica*, Adriana Cabrera*, Fátima Bécher Quinodóz⁰, Juan Felizzia* y Jesica Giuliano Albo⁰

* Dpto. de Geología, FCEFQyN. Universidad Nacional de Río Cuarto.
0 Conicet. Dpto. Geología UNRC
Mail de contacto: mblarasin@exa.unrc.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados obtenidos en una exploración hidrogeológica en el entorno de la localidad de Mattaldi, Córdoba (480 km^2), poniendo énfasis en las relaciones entre las características geomorfológicas y la calidad y disponibilidad de agua subterránea adecuada para uso humano. Se realizaron tareas hidrogeológicas de rutina, encontrándose aguas dulces (0,63 g/L) hasta saladas (7,8 g/L). El agua más dulce, bicarbonatada y con los tenores de Flúor y Arsénico más bajos, está vinculada a médanos activos por lo que se asumen de recarga reciente de precipitaciones en tales geoformas (flujos locales). Las lentes de agua dulce fueron corroboradas mediante sondeos eléctricos verticales. Las aguas salobres y saladas, con incremento en el tenor de Cl^- y SO_4^{2-}, se ubicaron en áreas deprimidas, como resultado de circulación de flujos regionales. Las reservas calculadas de agua dulce fueron suficientes para la dotación solicitada.
Palabras clave: acuífero libre -exploración - geomorfología – hidrogeoquímica

ABSTRACT

The aim of this paper is to show a hydrogeological study in the surrounding area of Mattaldi town, Córdoba province (480 km^2), emphasizing the relationship between Geomorphology and groundwater quality and availability for human uses. A hydrogeological routine survey was made, including vertical electrical soundings. Fresh (0.63 g/L) to salty (7.8 g/L) groundwater was found. The fresh bicarbonate water with low Fluoride and Arsenic values was linked to dunes. It is assumed that fresh water is derived from recent rainfall recharge in such landforms (local groundwater flows). Freshwater lenses were corroborated by vertical electrical sounding. The brackish and salty groundwater, with high Cl^- and SO_4^{2-} values, was located in low areas, as a result of regional flow circulation. The calculated freshwater resources were enough, taking into account the water demanded for human uses.
Keywords: unconfined aquifer- exploration-geomorphology-hydrogeochemistry

Introducción

Dada la necesidad de contar con agua potable, la Cooperativa de Servicios de la localidad de Mattaldi (Córdoba) encargó a la Universidad Nacional de Río Cuarto una exploración hidrogeológica. Por tratarse de una zona ubicada en la parte distal oriental de la planicie arenosa del Sur cordobés, donde estudios previos regionales han demostrado la dificultad de encontrar agua con aptitud de uso humano (Estruch, 1997, Blarasin, 2003), se hizo necesario realizar un trabajo detallado que permitiera descubrir posibles áreas con aguas aptas. El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados obtenidos, poniendo énfasis en la importancia de las relaciones entre las características geomorfológicas y su incidencia en la calidad y disponibilidad de agua subterránea adecuada para el uso solicitado. El área de estudio explorada fue de 480 km^2 (Fig. 1).

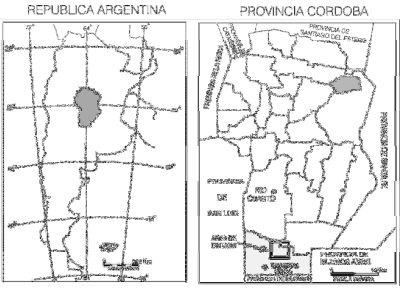


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Materiales y métodos

Se trabajó sobre la base de la escala 1:50.000 de las hojas planialtimétricas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), de fotografías aéreas e imágenes satelitarias. Se realizó el levantamiento geológico-geomorfológico de campo según metodologías convencionales y se recolectaron y trataron datos climáticos. Se realizaron sondeos eléctricos verticales (SEV) como apoyo al censo hidrogeológico, efectuándose un total de 8 SEV, con profundidad de investigación hasta 50 m, ubicados en sitios elegidos con criterio hidrogeológico resultante de la exploración geológica de superficie. El instrumental utilizado para la obtención de resistividades fue un multímetro-amperímetro-voltímetro y el dispositivo de campo Schlumberger. Los resultados fueron tratados con el programa de computación IPI 2 Win. Se exploró el acuífero libre, concretándose un censo de pozos adecuado a la escala de estudio, en aquellas perforaciones ubicadas en los campos que rodean a la localidad, las cuales tienen una profundidad de captación variable, aunque la mayoría involucran la parte superior del acuífero libre (primeros 15-20 metros). El censo incluyó la perforación que usa la Cooperativa para extraer y tratar el agua que distribuía al momento del estudio. Se extrajeron 30 muestras de perforaciones y la correspondiente al agua tratada en la planta de ósmosis de la localidad. Se midieron in situ pH, CE (conductividad eléctrica) y temperatura (T). El análisis físico-químico consistió en la determinación de CO_3^{2-}, HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, As, F^-, NO_3^- y NO_2^- según el APHA, 1998. Los resultados fueron tratados según metodologías estadísticas y gráficas convencionales.

Características climáticas y geológico – geomorfológicas

La serie de precipitaciones de Mattaldi (1911-2010), permitió calcular un promedio anual de 711,0 mm, con una distribución estacional que concentra el 81 % en primavera-verano. Es importante destacar la alternancia de 3 grandes ciclos a lo largo de la serie en relación a la precipitación media anual (húmedo-seco-húmedo), además de una tendencia lineal de carácter levemente ascendente. Realizado el balance hídrico seriado edáfico, se observa que los excesos hídricos acompañan en forma general estos ciclos (Fig. 2). Es decir se perciben mas excesos a principios del siglo, luego decaen por varios años y vuelven a subir, primero gradualmente desde la década del `70 y más notoriamente a fines de los `90, época caracterizada por grandes inundaciones y ascensos de niveles freáticos. Se destaca que a pesar de que la tendencia de los excesos hídrico es ascendente, desde 2005 se observa un decrecimiento en la disponibilidad de agua, lo que produjo el descenso de nivel freático y el desecamiento o reducción de pantanos y lagunas.

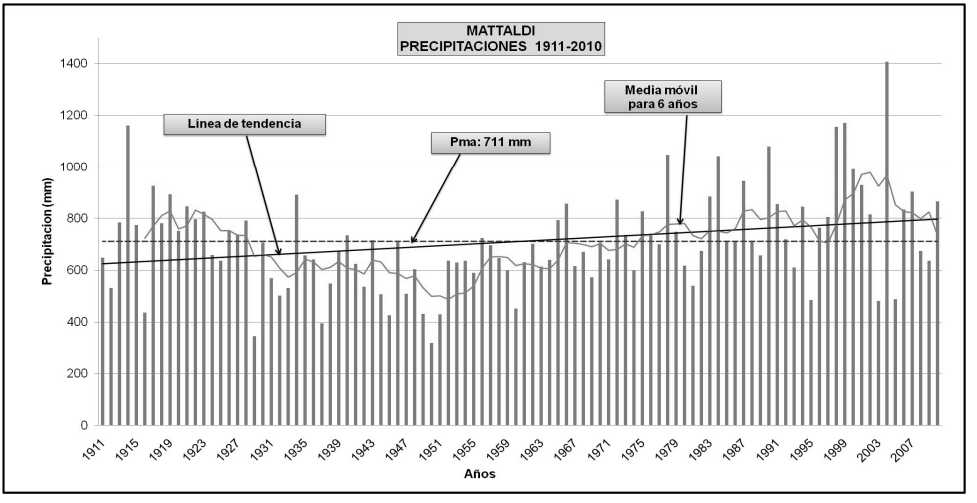


Figura 2. Precipitaciones anuales - Serie Mattaldi (1911-2010).

Teniendo en cuenta las formas del relieve y dinámica del escurrimiento del agua superficial, la zona fue dividida en 5 unidades hidromorfológicas (Fig. 3). La zona se ubica en plena llanura Pampeana y los sedimentos aflorantes son de origen eólico arenosos muy finos-limosos que, a diferentes profundidades, aparecen diferencialmente cementados con carbonato de calcio (calcretos o "tosca"). Se trata de una planicie de dunas longitudinales de edad cuaternaria, de relieve muy suavemente ondulado, con gradiente topográfico general del orden de 0,10 % y gradientes locales asociados a las lomas medanosas del orden de 0,3 a 0,7 %. Si bien las expresiones topográficas son suavemente marcadas, la presencia de lomas y bajos, tienen una incidencia notoria en la dinámica y calidad del agua subterránea, aspecto que se explicará más adelante. Algunos de los bajos corresponden a paleoderrames del río Quinto aunque desde el punto de vista hidrogeológico no revisten gran interés dado que han removilizado, en general, materiales finos de baja permeabilidad. Al Noroeste del área el relieve es más ondulado dada la presencia de numerosos médanos, muchos de ellos activos, es decir resultantes de la removilización de los sedimentos por parte de los vientos actuales dominantes (NE). Los médanos removilizados están compuestos fundamentalmente por arenas muy finas en porcentajes mayores a 60, según análisis granulométricos realizados para la oportunidad (Blarasin et al., 2012).

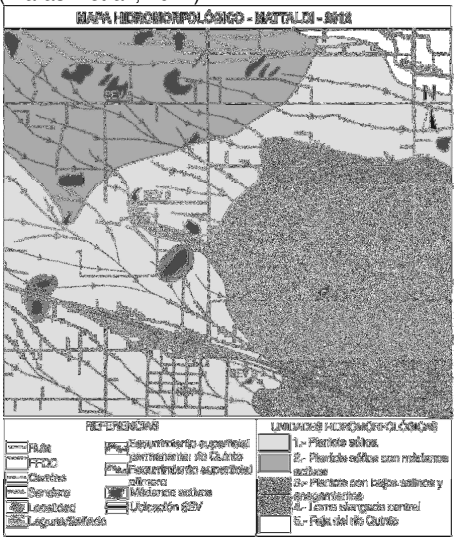


Figura 3. Mapa hidromorfológico

Características hidrogeológicas

En función de los SEV y perforaciones censadas el espesor acuífero explorado es del orden de 50 m. Dada la ausencia general en la zona de perforaciones profundas que capten de acuíferos confinados, no se contemplaron en esta etapa como fuentes potenciales de abastecimiento ya que para ello se requeriría de mayores costos para la exploración y explotación. Sin embargo, durante la exploración se detectó en cercanías de Mattaldi una perforación de 400 m de profundidad que fue muestreada y arrojó un contenido salino del orden de 14 g/L, lo que indica el aumento en sales a medida que aumenta la profundidad. Este aspecto fue corroborado en otros sitios en todo el Sureste de Córdoba (Blarasin et al., 2005).

La exploración permitió definir que los primeros 50 m de acuífero están compuestos por sedimentos arenosos muy finos-limosos con diverso grado de cementación carbonática, apareciendo capas de "tosca" a diferentes profundidades, algunas de ellas muy típicas se localizan habitualmente a 6 m y a 20 m de profundidad (aproximadamente 0,15-0,30 m de espesor). En función de las características granulométricas, datos tomados de la bibliografía, ensayos hidráulicos para este tipo de sedimentos realizados en otros sitios de la región (Blarasin, 2003) y el ensayo de recuperación realizado en la perforación (M20) que abastece a la localidad (en donde se calculó una K= 3 m/d), se estimaron rangos de parámetros hidráulicos del acuífero freático (K, S y T), de utilidad para efectuar cálculos y poder definir la modalidad de explotación del recurso. Los valores más representativos para el acuífero son: Conductividad Hidráulica (K) del orden de 0,5-3 m/día, Transmisividad (T) del orden de 40-250 m^2/día y Coeficiente de Almacenamiento (S) o porosidad efectiva del orden de 5-7 % (Blarasin et al., 2012).

Como se observa en el mapa de equipotenciales (Fig. 4) el agua subterránea circula en dirección NO-SE, con muy bajos gradientes hidráulicos en el orden de 0,1 %. Las velocidades de escurrimiento del agua son del orden de 0,03 m/día. La profundidad del nivel freático es variable en la zona relevada (Fig. 5), en general se encuentra entre 2 y 6 metros. Como se indicara en el balance hídrico, dado que los últimos 2-3 años fueron más secos y con pocos excesos hídricos, hay pocos sectores con el nivel freático aflorante.

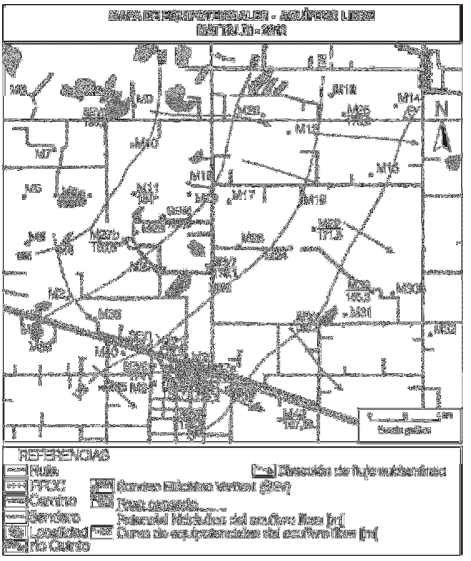


Figura 4. Mapa de equipotenciales del acuífero libre

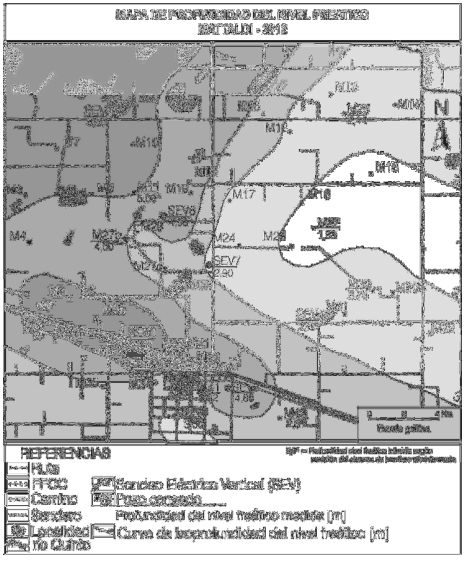


Figura 5. Mapa de profundidad del nivel freático.

Relevamiento geofísico

Se realizaron 8 sondeos eléctricos verticales (SEV) con profundidad de investigación hasta 50 m. En esta ocasión permitieron establecer fundamentalmente los límites de posibles lentes de agua más dulce del acuífero freático, que pudieran ser de interés para la explotación (Fig. 6). Se diferenciaron distintas electrocapas resistivas, lo que permitió definir en primer lugar, el límite entre la zona no saturada y zona saturada, posicionando el nivel freático en los distintos sitios a profundidades comprendidas entre 2,86 y 6,00 m, coincidiendo con los medidos en perforaciones aledañas. Por otro lado, la información brindada por los SEV permitió definir la extensión y profundidad hasta la cual se extienden las lentes de agua más dulce del acuífero, asociadas a la recarga directa del agua de lluvia en la zona. Estas lentes y su composición química fueron finalmente corroboradas con el muestreo de agua y su correspondiente análisis químico. La lente, cuya disposición se muestra en forma esquemática en la Figura 7, adquiere diferente espesor y extensión en distintos sitios. Teniendo en cuenta ese espesor de agua más dulce los SEV de mayor interés resultaron: SEV 1 (espesor 34 m), SEV 2 (espesor 10 m), SEV 5 (espesor 29 m), SEV 6 (espesor 19 m) y SEV 7 (37 m).

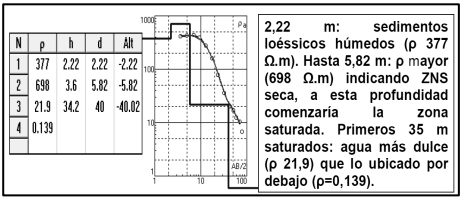


Figura 6. SEV. Resistividades y espesores reales.

Aspectos hidrogeoquímicos: Calidad del agua subterránea

Para la elaboración de mapas e interpretaciones se utilizaron los datos resultantes del análisis de laboratorio. Dado que las muestras corresponden a perforaciones que, como se indicara, captan de los primeros 15-20 m del acuífero, los mapas que se adjuntan son de utilidad para interpretaciones hasta esa profundidad.

El agua subterránea del área explorada resultó del tipo geoquímico bicarbonatada sódica en un 69% de los casos, mientras que las restantes resultaron de tipo mixto (bicarbonatadas-sulfatadas, bicarbonatadas-cloruradas, etc.).

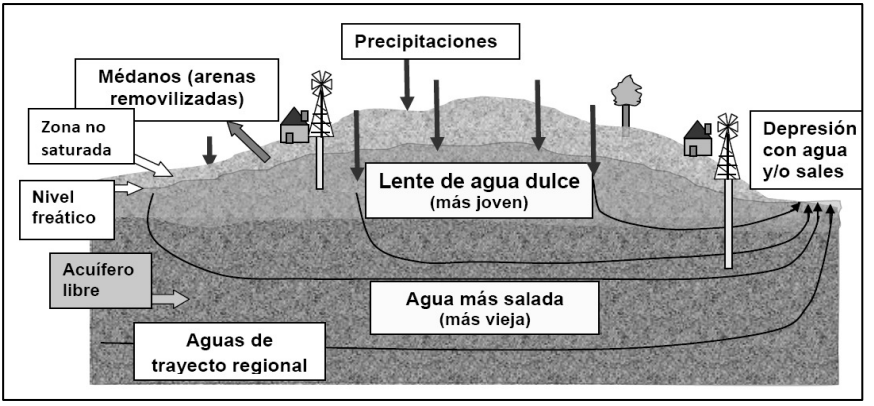


Figura 7. Esquema de recarga de agua de lluvias en zonas de médanos o lomas.

Se explican a continuación algunos aspectos de la calidad vinculados sólo a algunas de las sustancias o propiedades químicas que se consideraron más relevantes dados los problemas que ocasionan en la aptitud del agua para consumo humano.

La salinidad del agua subterránea del acuífero freático es variable en el espacio (Fig. 8), aspecto que, al comparar con las unidades hidromorfológicas, se asume como condicionado fundamentalmente por el relieve. Los sectores con agua más dulce, por debajo de 2.000 mg/L de salinidad, son aquellos vinculados al campo de médanos activos del NO de la zona explorada (Unidad hidromorfológica 2) y el sector de la loma elongada central que pasa por la localidad de Mattaldi (Unidad 4, Fig. 3). Los sectores con más bajo contenido salino, menor a 1.000 mg/L, son los de las perforaciones M7 y M9 (sector de médanos activos) y M37, M39 y M40 (loma central de Mattaldi). Por otro lado, y tal como se interpretara a partir de los SEV, es importante destacar que los valores de salinidad también cambian con la profundidad. Así, se encontró, por ejemplo, que las muestras 37a y 37b, (distantes entre ellas algunas decenas de metros) captan a 8 m de profundidad y poseen salinidad muy baja, del orden 500 mg/L. Esto se debe a que se ubican en una loma topográfica, cuyo efecto es el mismo que el del médano, es decir, sector preferencial de recarga de aguas de lluvia. Sin embargo, a escasa distancia del punto 37a, una perforación (37 c) que extrae de los 13 m de profundidad en el mismo predio presenta una salinidad 5 veces más alta (2.500 mg/L). Esto corrobora el patrón de cambios de salinidad con la profundidad.

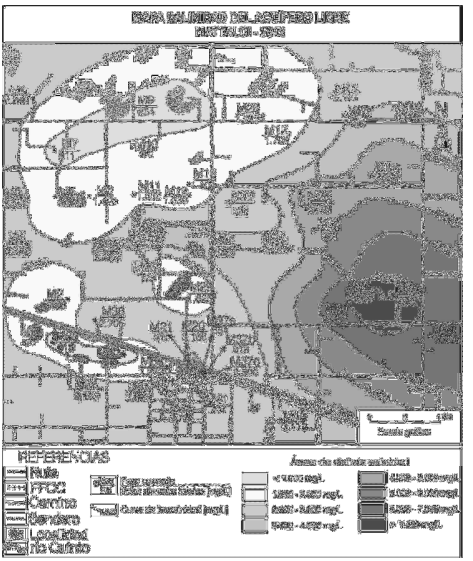


Figura 8. Mapa de líneas de isosalinidad del acuífero libre.

La distribución espacial del Flúor en el agua subterránea de la zona explorada se ha definido teniendo en cuenta el límite de 1,3 mg/L que se usa en las normas de la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba (SRH). Este valor está también reglamentado por el Código Alimentario Argentino (CAA) y, sumado a aspectos toxicológicos, queda definido también para esta región por valores de temperatura media ambiente, entre 14,7 y 17,6 ºC. En el mapa de la Figura 9 se observa que la zona

relevada está muy afectada por la presencia de este elemento, ya que el 90% de las muestras presentan valores superiores al límite admisible.

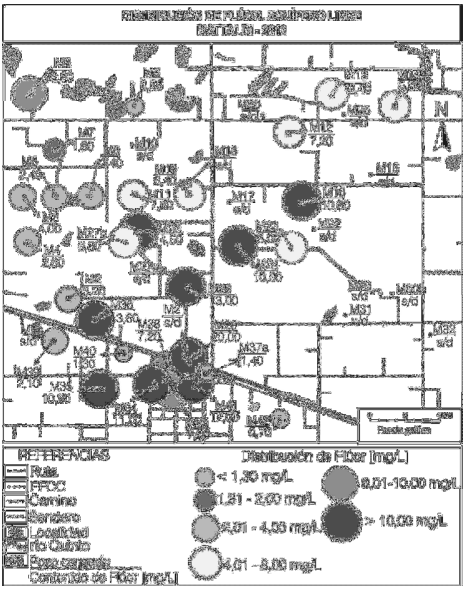


Figura 9. Distribución de flúor en el acuífero libre.

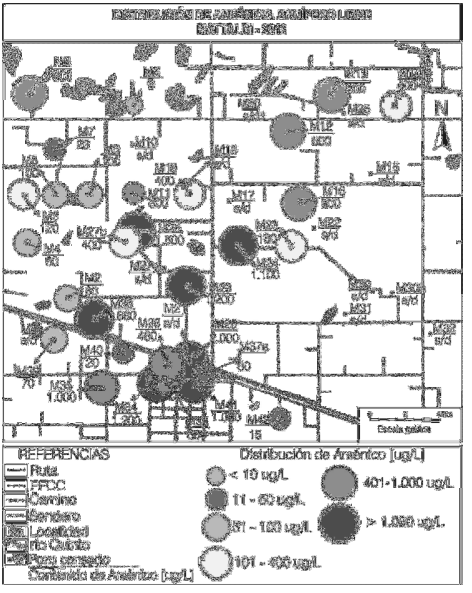


Figura 10. Distribución de Arsénico en el acuífero libre.

Los valores más altos de F^- encontrados (> a 10 mg/L) se ubican en la localidad de Mattaldi y en el sector Noroeste de la misma. Los valores más bajos (< a 4 mg/L) están vinculados al campo de médanos activos o a la loma central de Mattaldi al Este y al Oeste de la localidad, aunque como puede observarse, sólo 3 muestras tienen Flúor por debajo del límite admisible (M9, M40, M42).

En el caso del Arsénico, en la provincia de Córdoba el límite admisible en agua, como valor aceptable de concentración del componente sin efecto perjudicial para la salud, es de 50 µg/L (ó 0,05 mg/L). El CAA lo ha fijado en 10 µg/L aunque se ha extendido recientemente a 5 años el plazo para alcanzar ese valor tan pequeño en algunas provincias (SPRI-SAGPA, 2012). Como se observa en el mapa (Fig. 10), un 83 % de las muestras presenta valores mayores a 50 µg/L. Los únicos sectores con valores menores son algunos en el campo de médanos y otros en la loma central de Mattaldi, es decir vinculado a recarga de agua más reciente. Puede destacarse que en general hay una notoria correlación entre Flúor y Arsénico (Fig. 11), relación ya observada en otros sectores de la provincia en ambientes eólicos (Smedley et al., 2000, Blarasin et al., 2005).

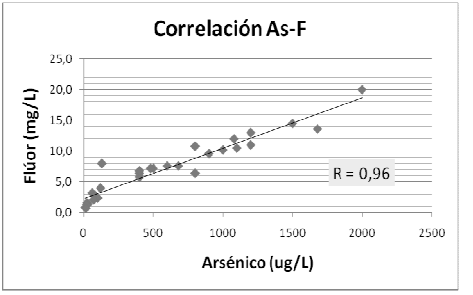


Figura 11. Correlación entre F^- y Arsénico.

En relación a los nitratos, para el momento del relevamiento, el 53% de las muestras presentó contenidos superiores a 45 mg/L (Fig. 12), que es el límite admitido para consumo humano por CAA y SRH. El patrón de distribución fue sumamente variable teniendo en cuenta que en general este compuesto está vinculado al uso de fertilizantes y ganadería.

La muestra de agua de la perforación en uso en la localidad (M20) resultó inapta por salinidad, sulfatos, As y F^-, mientras que el agua tratada en la planta excedía los valores de As.

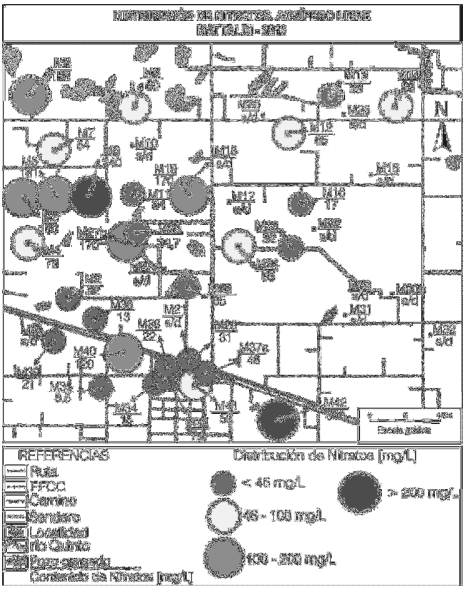


Figura 12. Nitratos en acuífero libre.

Cálculo de reservas de agua dulce

Con toda la información obtenida se realizó una estimación del volumen de agua dulce disponible en la lente de la parte superior del acuífero en la unidad "Planicie con médanos activos". Para esto se tuvo en cuenta el área encerrada por la curva de isosalinidad de 1.000 mg/L. Por otra debió contemplarse que el requerimiento fue de 50 L/d (30 m^3/d) de agua potable y 400 L/d (250 m^3/d) de agua no potable para usos generales, por conexión. A partir de datos de recarga anual del acuífero libre en la región del orden de 10 % de las precipitaciones (Blarasin, 2003, Cabrera, 2009) se consideraron reservas reguladoras (aquellas que se reponen anualmente) y totales de la lente de agua dulce, teniendo en cuenta los valores de porosidad efectiva del acuífero y el área y espesor ocupada por el agua dulce, según los resultados mostrados previamente (Tabla 1). Como se observa en el cálculo de reservas, si la ciudad sacara la totalidad de agua requerida, potable (consumo) y general (lavado, etc.), usaría el 3,41 % de la reserva total de la lente y el 12,1 % de lo que se repone anualmente por lluvias.

Tabla 1. Cálculo de Reservas en lente de agua dulce.

LENTE MEDANOS AL NORTE DE MATTALDI: reserva reguladora 1,9 hm3/año Reserva total de la lente 6,75 hm3							
año	cantidad habitantes	dotación solicitada (litro/hab/día)		Volumen total requerido diario m^3/d	volumen total requerido anual hm^3/año	% de la reserva reguladora	% de la reserva total de la lente
2011	1929	potable	10	20	0,007	*0,37*	*0,1*
		uso general	250	483	0,174	*9,2*	*2,58*
		total	260	503	0,184	*9,7*	*2,73*
2021	2171	potable	10	22	0,008	*0,42*	*0,12*
		uso general	250	543	0,198	*10,4*	*2,93*
		total	260	565	0,210	*11,05*	*3,11*
2031	2443	potable	10	25	0,009	*0,47*	*0,13*
		uso general	250	611	0,220	*11,58*	*3,26*
		total	260	636	0,230	*12,11*	*3,41*

Conclusiones y recomendaciones

El problema más importante para dotar de agua a la población quedó restringido a la calidad de agua. Así, la zona presenta amplios sectores de aguas saladas a lo que se suma un proceso de salinización a medida que se profundiza en el acuífero, lo que complica el hallazgo de aguas dulces. Por otro lado, aún en algunos sectores muy localizados con aguas dulces, casi todas las muestras arrojaron moderados contenidos de Arsénico, Flúor y/o nitratos.

La mejor calidad de agua quedó restringida al sector NO ubicado aproximadamente a 12 km de la localidad, en la Unidad Geomorfológica 2, en la planicie eólica con médanos activos. A partir de las información de perforaciones y SEV, se interpretó que el agua dulce en la parte superior del acuífero formaba una lente resultante de la recarga reciente de agua a partir de precipitaciones, debido a la morfología y mayor permeabilidad de las formaciones medanosas. Un proceso similar, con menor desarrollo areal, se interpreta que ocurre en la loma central (Unidad 4) que atraviesa la localidad.

En ambos casos la lente de agua dulce por debajo de 1.000 mg/L es pequeña y la profundidad se estima no mayor a 25-30 m en el campo de médanos activos y no mayor a 10 m en la loma central dados los resultados de los sondeos eléctricos verticales y de los análisis químicos obtenidos de muestras de perforaciones poco profundas en ambos sitios.
Dados estos resultados se sugirió a la cooperativa:

A- Perforación exploratoria en el camino ubicado en frente de la perforación M9 en el

campo de médanos activos, donde se encontró la mejor calidad de agua. Dada la posición topográfica del sector, el agua podría conducirse a la ciudad por gravedad. Si se concreta la explotación del recurso se debe contemplar la realización del acueducto. Si bien el acuífero presenta sedimentos de permeabilidades en general bajas, dado que dominan arenas muy finas-limosas no existen problemas para extraer un volumen de agua del orden de lo que desea obtener la Cooperativa. Como se observa en el cálculo de reservas, si la ciudad sacara la totalidad de agua requerida potable (consumo) y general (lavado, etc.) no superaría lo que anualmente se repone por lluvias.

La cantidad de perforaciones a realizar para extraer el agua solicitada deberá contemplar la profundidad de la lente de agua dulce. Se sugirió un diseño de perforación apropiado, pero la longitud (que no debería exceder los 15 m), diámetro, filtro, prefiltro, etc., quedaron sujetos a la exploración directa y definitiva en el sitio elegido. En el orden de 3 perforaciones pequeñas, distanciadas con criterio hidráulico, que extraigan aproximadamente 3.000 L/h resuelven el problema para cubrir el monto de agua potable requerida. Luego, para usos múltiples, pueden continuar usando las perforaciones actuales en lugar de usar el agua de la lente identificada en los médanos.

B.- Perforación exploratoria a orillas de la ruta (o en un camino vecinal), entre los SEV 1 y 2 y en inmediaciones de la perforación M40, dado que este sitio resultó una de las mejores calidades de agua de la loma central, se encuentra cercano a la localidad y se ubica aguas arriba, por lo que el agua puede conducirse por gravedad. Es probable que al menos una parte del agua deba continuar siendo tratada dado que los niveles de NO_3^-, As y F^- no siempre son lo suficientemente bajos para uso humano.

Agradecimientos

El trabajo fue subsidiado por Cooperativa de agua de Mattaldi, ***FONCYT- MINCyT-PID 35/08 y SECYT-UNRC.***

Referencias

APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 1998. 20th ed., Washington, DC

Blarasin, M. 2003. *Geohidrología Ambiental del Sur de Córdoba, con énfasis en la ciudad de Río Cuarto y su entorno rural*. Tesis Doctoral. UNRC. Inédita.

Blarasin, M., Degiovanni, S., Cabrera, A. y Villegas, M. 2005. *Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: una perspectiva geambiental*. ISBN 950-665-350- 141-152. Ed. UNRC.

Blarasin, M., Cabrera, A., Bécher Quinodóz, F., Felizzia, J. y Giuliano Albo, J. 2012. *Exploración hidrogeológica en el entorno de la localidad de Mattaldi. Trabajo de extensión solicitado por la Cooperativa de Obras y Servicios Públicos de Mattaldi*.

Cabrera Adriana, 2009. *Evolución Hidrogeoquímica e Isotopos Ambientales del Sistema Acuífero asociado a los Ambientes Morfotectónicos de la Falla Regional Tigre Muerto. Córdoba. Argentina*. Tesis Doctoral. UNRC. 372 pág. Inédita

Smedley, P., MacDonald, D., Nicolli, H., Barros, A., Tulio, J. y Pearce, J. 2000. *Arsenic and other Quality problems in groundwater from Northern La Pampa Province. Argentina*. British Geological Survey.

SPRI-SAGPA, 2012. *Resolución Conjunta 34-2012 y 50-2012 de Secretaria de Politicas, Regulación e Institutos y Agricultura Ganaderia y Pesca de Argentina*.

Estruch J., 1997. *Estudio Hidrogeológico-geofísico Area Mattaldi*. Dirección de Minería. 16 pág. Inédito

Análisis del funcionamiento del sistema hídrico subterráneo en el área del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro (Santiago de Cali, Colombia)

John Jairo Márquez Molina [1] ***y Marcela Pérez*** [2]

[1] Facultad de Agronomía (UBA), Av. San Martín 4453, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
[2] Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – (UNL), Grupo de Investigaciones Geohidrológicas, Ciudad Universitaria, Ruta Nacional 168-Km 472.4 Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

Mail de contacto: marquezmolina@agro.uba.ar

RESUMEN

La disposición final de residuos sólidos urbanos sigue siendo, en la actualidad, un tema de gran preocupación en una comunidad. Una de las principales problemáticas que plantean los sitios en los cuales se vierten estos residuos es la afectación que pueden producir sobre la calidad del agua subterránea del área adyacente a los mismos. Este trabajo presenta una caracterización del sistema hídrico subterráneo subyacente al área del antiguo relleno sanitario de Navarro, en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia y una simulación del posible impacto de los lixiviados generados a partir de dos de los cerros que lo componen. La representación del funcionamiento de este sistema se logró a través de los códigos numéricos Modflow, Modpath y MT3D. Para la implementación del modelo de transporte se utilizó al ión cloruro como trazador. Con el objetivo de representar posibles configuraciones de la fuente de contaminación, se definieron distintos escenarios.
Palabras Claves: relleno sanitario, simulación de flujo y transporte, Cali, Colombia

ABSTRACT

The disposal of solid waste remains, at present, a matter of great concern in a community. One of the main problems posed by the sites where the waste is dumped involve the groundwater quality of the area adjacent to them. This paper presents a characterization of the underlying groundwater system of the former landfill area of Navarro, Santiago de Cali city, Colombia, and a simulation of the possible impact of leachate generated from two of the hills that compose it. The representation of the aquifer system behaviour is achieved by Modflow, MODPATH and MT3D numerical codes. For the implementation of the transport model chloride was used as a tracer. In order to represent possible configurations of the source of contamination, different scenarios were defined.
Keywords: landfill, flow and transport model, Cali, Colombia.

Introducción y Objetivos

La ciudad de Cali, localizada al suroccidente de Colombia en el departamento del Valle del Cauca, tiene una población de 2.400.000 habitantes y genera, aproximadamente, unas 1.800 toneladas diarias de residuos sólidos. Estos residuos fueron dispuestos durante 39 años (desde 1969 hasta julio de 2008) en un basurero a cielo abierto conformado por varios vasos. En particular, la localización, adecuación y operación de dos de ellos, el Antiguo y el de Hospitalarios (Figura 1), se produjo sin tener en cuenta factores tales como el tipo de residuos y características hidrogeológicas del medio receptor. De acuerdo a lo informado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), a partir de ellos se han evidenciado serios impactos sobre la calidad de las aguas subterráneas y superficiales del sector.

Cabe destacar que el relleno sanitario se encuentra localizado junto a un antiguo paleocauce del río Cauca y sobre uno de los mantos acuíferos de mayor disponibilidad de agua subterránea para el desarrollo de la ciudad. Este manto presenta un grado de vulnerabilidad a la contaminación alto debido al poco espesor de la zona no saturada y a la presencia de niveles freáticos someros.

Además de lo expuesto, es importante considerar la conexión hidráulica existente entre el paleocauce (localmente conocido como "*madrevieja*") y el acuífero, y la interrelación entre el acuífero y el río Cauca. Este río, ubicado al este de la zona de estudio, abastece al 70 % de los habitantes de la ciudad de Cali. Su toma se encuentra localizada 7 Km aguas abajo del relleno sanitario de Navarro.

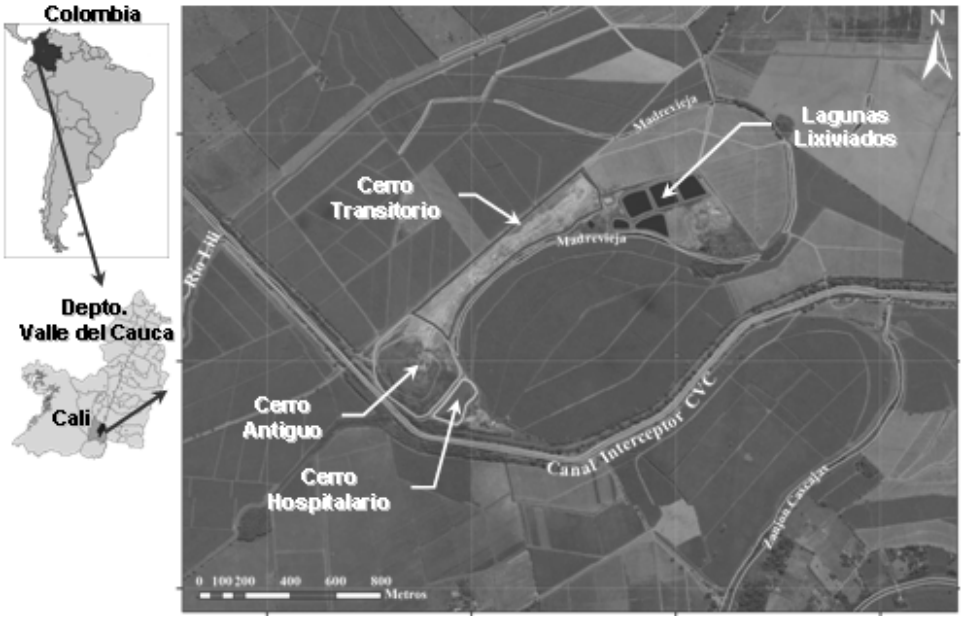


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

El objetivo del presente trabajo fue caracterizar al sistema hídrico subterráneo subyacente al área del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro y evaluar la respuesta de este sistema a los lixiviados producidos por el antiguo vertedero de residuos sólidos.

La respuesta del sistema se evaluó a través de los resultados obtenidos al implementar un modelo numérico de flujo y transporte.

Metodología

La información básica y los estudios antecedentes del área de caso fueron proporcionados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Estos fueron complementados con informes técnicos de entidades nacionales y municipales con competencia en el área y la temática (CVC, 2001; INGEOMINAS, 2003 y DAPM-CON-05, 2005).

Características generales del área de estudio

El relleno sanitario del Municipio de Cali, conocido popularmente como "Basurero de Navarro", está ubicado en el corregimiento del mismo nombre, al sur oriente de la ciudad, a una altura de 990 m.s.n.m, en el valle geográfico del río Cauca, sobre su margen izquierda. Limita al sur-este con el Canal Interceptor Agua Blanca, al nor-oeste y al nor-este con cultivos de caña de azúcar y al sur-oeste con un predio de CVC contiguo al canal interceptor (Figura 1).

Este relleno tiene un área total aproximada de 40 ha las cuales han sido ocupadas para la disposición de residuos en forma de cerros. Este conjunto de cerros está conformado por un botadero antiguo y una serie de rellenos sanitarios transitorios contiguos al primero (Figura 1). El vertedero antiguo está constituido por dos cerros denominados cerro "*Antiguo*", que ocupa una superficie de 18 ha y posee una altura de 52 m y el cerro "*de Hospitalarios*" con una superficie de 2 ha. Ambos cerros operaron desde 1970 hasta el 2001, sin impermeabilización en su base. Por su parte el relleno transitorio fue diseñado y construido con todas las especificaciones técnicas requeridas, incluyendo el sistema de drenaje para la recolección de los lixiviados y lagunas para su almacenamiento. Sin embargo, en algunas ocasiones se producen derrames originados por la colmatación de las mismas debido al volumen de lixiviado producido por los residuos depositados en los cerros.

Con respecto a las características climáticas del área de estudio, la precipitación media anual, para el período 1993 – 2012, resultó de de 1363 mm/año y la evapotranspiración real de 1103 mm/año. La aplicación de un balance

hídrico permitió estimar un valor de recarga potencial del orden del 20% de la precipitación. La temperatura media anual es cercana a los 25 °C.

Características geológicas e hidrogeológicas

La zona de estudio se ubica en un sector plano con pendientes del orden del 2% a 3%. Geológicamente está conformada por depósitos aluviales cuaternarios (Qal), que fueron aportados principalmente por el Río Cauca y por otros tributarios como el Río Pance, Meléndez y Lili. Estos depósitos presentan gran variedad en su composición y tamaño. Su litología es diversa: arcillas, limos, arenas medias y finas, además de gravas, mezcladas en diferentes proporciones o en ocasiones en estratos bien definidos. La organización en el terreno de estos depósitos ha obedecido a la dinámica de los ríos aportantes y de los ambientes de depositación, los que generaron meandros, zonas lagunares o pantanos, albardones semicirculares y otras geoformas sedimentarias (INGEOMINAS, 2003). En la figura 2a se presenta en mapa geológico de superficie de la zona de estudio.

Estudios hidrogeológicos antecedentes identifican en el área un depósito aluvial, denominado ***Acuífero del Cauca***, compuesto por dos niveles acuíferos (Unidades A y C), y un nivel hidráulicamente acuícludo (Unidad B). Estos niveles se encuentran claramente localizados y poseen características bien definidas. La Unidad A es la que reviste interés a los fines de este estudio. Litológicamente está constituida por depósitos no consolidados de arenas limosas, gravas y arenas de diferente granulometría, con presencia de algunos lentes limo-arcillosos de poco espesor. Tiene una potencia que varía entre 28 y 83 m. Las capas acuíferas de esta unidad son, principalmente, libres y semiconfinadas con rendimientos específicos de entre 1 y 10 l/s/m. El sentido general del escurrimiento es de oeste a este; esto es desde la cordillera Occidental hacia los conos aluviales, actuando el río Cauca como área de descarga. Pruebas hidráulicas llevadas a cabo en la zona dan cuenta de la heterogeneidad de los materiales del subsuelo. Se han estimado valores de conductividad hidráulica del orden de 3 m/día, para el sector Oeste, alcanzando en el sector Este, en las inmediaciones del Río Cauca un valor de 51 m/día. El almacenamiento específico (S_s) se estimó en 0,019.

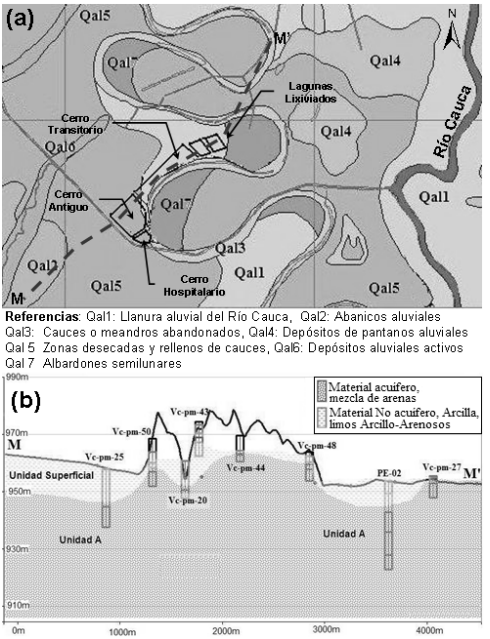


Figura 2. (a) Geología de la zona de estudio, (b) corte estratigrafico M-M´

Implementación del modelo numérico de flujo

Para implementar el modelo de flujo se empleó el programa computacional Modflow (Mc Donald y Harbaugh, 1984), en su versión Visual Modflow 4.1 (Waterloo Hydrogeologic, 2005).

El dominio del sistema contempló un área de 18 Km^2, la que fue discretizada en celdas de tamaño variable, iniciando en las zonas de frontera con tamaños de 100m x 100m, finalizando, en las inmediaciones del relleno con tamaño de celdas de 20 m x 20 m. Todas aquellas celdas que se encontraban fuera del dominio se asignaron como inactivas. Para esta implementación numérica se consideraron dos capas (Figura 3a). La primera es una capa limo-arcillosa cuyo límite superior lo constituye la topografía del terreno y posee un espesor de entre 2 y 8m de profundidad. La segunda capa, de principal interés, está conformada por arenas gruesas y gravas finas bien seleccionadas. Se representa con espesores variables y su base queda definida por el techo de una potente capa arcillosa (Unidad B).

El dominio del modelo se alineó de acuerdo a la dirección predominante del flujo subterráneo y a las condiciones de borde principales (Figura 3b). Por tal motivo la grilla del modelo se giró un ángulo de 27° en sentido

antihorario. Al borde *Oeste* se le asignó una condición del tipo "*altura contante*" coincidente con la equipotencial 959 m.s.n.m. Para el borde *Este* se asignó la condición de borde tipo "*río*", en coincidencia con la presencia del nivel del agua en el río Cauca, cuyos valores fueron obtenidos de las estaciones limnigraficas sobre el río Cauca. Los límites *Norte* y *Sur* fueron considerados como de "*no flujo*". En el interior del dominio se consideró la presencia de una condición de borde mixta, en coincidencia con los cuerpos de agua superficiales existentes en la zona (paleocauces con presencia de agua en superficie).

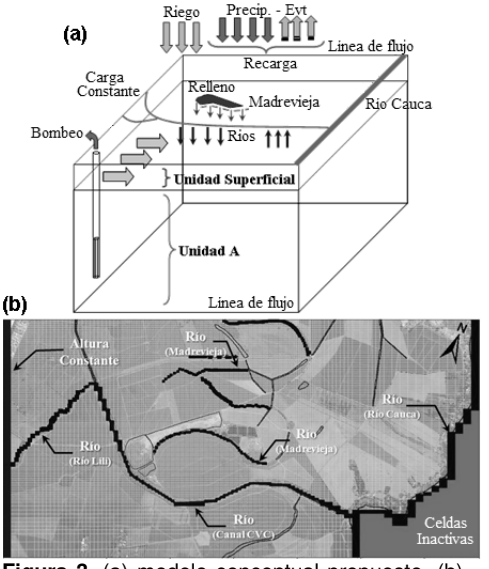


Figura 3. (a) modelo conceptual propuesto. (b) dominio del modelo y condiciones de frontera.

Calibración del modelo

El modelo se calibró en régimen permanente. Siguiendo los criterios establecidos por Anderson y Woessner (2002) se seleccionó como tiempo inicial de la simulación un periodo en el cual los niveles estáticos fueron estables, no se presentaron eventos hidrológicos extraordinarios ni tampoco bombeos excesivos en pozos cercanos al relleno. Para la comparación de los datos observados y calculados se utilizaron 20 pozos de observación, localizados principalmente en el entorno perimetral del relleno sanitario.

Para alcanzar una adecuada calibración fue necesario realizar el ajuste de los parámetros inicialmente asignados. Los principales ajustes se realizaron sobre la K_{sat} de la capa 2, reasignando valores y distribuciones espaciales en los sectores *Oeste* y *Nor-Este* del dominio.

En cuanto a la recarga, se definió sobre los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*, un valor adicional de 252 mm/año producto del domo observado en el mapa de isopiezas (producido por la precipitación, la humedad de los residuos y recirculación de los lixiviados generados en dichos cerros).

El proceso de calibración del modelo de flujo culminó al obtener un error medio cuadrático estandarizado, RMS = 4,39% y un coeficiente de correlación de 0,993.

Para la evaluación de esta calibración se recurrió al balance de masas, obteniendo una diferencia entre flujos de entrada y salida de 46 m^3/día, equivalente a una discrepancia de 0,21%. Por lo que se asumió que se había alcanzado una buena representación del modelo conceptual para simular los distintos escenarios de transporte.

Análisis de sensibilidad

Con el fin de comprobar la sensibilidad del modelo implementado a las variaciones de los parámetros calibrados, se efectuaron simulaciones con incrementos y disminuciones porcentuales de: conductividad hidráulica (*K*), coeficiente de almacenamiento (*S*), porosidad eficaz (m_e) y porosidad total (*P*).

Para comparar los resultados del modelo ante estas variaciones y su incidencia espacial, se evaluó el comportamiento del nivel piezométrico en tres secciones transversales y balance de masas para cada una de las situaciones planteadas.

Simulación de transporte de partículas

Con el objetivo de disponer de una aproximación inicial de la posible trayectoria de los lixiviados en el acuífero se implementó el código de seguimiento de partícula denominado *Modpath* (Pollock, 1989).

Las partículas que se asignaron con este utilitario fueron dispuestas alrededor de los cerros *Antiguo*, *Hospitalario* y en el paleocauce (*madrevieja*) que bordea el relleno sanitario, por ser consideradas las fuentes de contaminación del área.

Implementación del modelo de transporte

Para la implementación del modelo de transporte se utilizó el código MT3D (Zheng, 1990), seleccionando el método de diferencias finitas (*FDM*) desarrollado por Zheng y Bennett (1995) para la resolución del sistema de ecuaciones correspondientes.

Para simular los efectos de los dispersión hidrodinámica en la zona de estudio, se considero como unitario el coeficiente de difusión molecular del medio, para la estimación de la dispersividad longitudinal (α_L) se utilizó la expresión propuesta por Xu y Ecksteins (1995), estimado una α_L=12 m, por su parte las dispersividades transversal (α_T) y vertical (α_V), se establecieron según los criterios propuestos por Gelhal et al (1992), considerando a estas función de la α_L, a través de las siguientes proporciones: $\alpha_T = 0.1\alpha_L$ y $\alpha_V = 0.01\alpha_L$.

Escenarios de transporte

Con el fin de representar las posibles situaciones originadas por el agua percolada desde las fuentes de contaminación (cerros *Antiguo* y *Hospitalarios*, paleocauce y lagunas de lixiviados), se propusieron 5 escenarios, los cuales fueron establecidos con base a la identificación de la potenciales fuentes de contaminación, comprobadas en la evaluación de los tenores de concentración de Cl^- y conductividad eléctrica en los pozos perimetrales y cuerpos de agua cercanos del relleno sanitario, los valores iníciales en cada escenario, se establecieron con los resultados de las muestras obtenidas en los pozos de monitoreo y muestras tomadas sobre el paleocauce y lagunas de lixiviados.

El elemento utilizado como trazador para la representación de la pluma de contaminación fue el cloruro. El frente de la misma se consideró para una concentración de cloruros (C) de 10 mg/l, equivalente al fondo natural de este ión en la zona de estudio. El tiempo de simulación (t) fue de 100 años.

Para los escenarios 1, 2 y 3 se consideró que la base de ambos cerros constituía una fuente de ingreso de concentración constante. La concentración inicial de la misma fue de 524 mg/l. No obstante, para los escenarios 2 y 3 se consideró una atenuación del ingreso de cloruro en 100 años y en 50 años, respectivamente.

El escenario 4 plantea como fuentes de ingreso de contaminación a ambos cerros y al paleocauce contiguo al relleno sanitario. Para esta última fuente, la concentración inicial fue de 1470 mg/l.

Finalmente, el escenario 5 considera, además de las fuentes anteriores, una posible fuga desde el fondo de las lagunas de almacenamiento de los lixiviados a partir del año 30 del período de simulación. La concentración inicial asignada para esta fuente fue de 2200 mg/l.

Resultados, Análisis y Discusión

El modelo de flujo implementado representa adecuadamente la configuración general de las líneas equipotenciales del área para la condición inicial considerada. Las velocidades de escurrimiento estimadas son coincidentes con las reportadas en informes hidrogeológicos antecedentes. Las mismas se encuentran en el orden de los 0,04 m/día, para el sector *Oeste* del área. En las inmediaciones del relleno, el flujo alcanza una velocidad de 0,06 m/día y hacia el sector *Este*, en las cercanías del río Cauca, la velocidad se encuentra alrededor de los 0,15 m/día.

De acuerdo al balance de masa general, las entradas a este sistema se producen a través de las condiciones de borde de recarga (54%), río (33%) y carga constante (13%). Mientras que la salida más significativa se da a través de la condición de borde definida como río (99%). La baja discrepancia obtenida entre los flujos de entrada y salida confirma la buena representación obtenida del sistema acuífero.

La implementación del modelo para el seguimiento de la trayectoria de las partículas, mostró la alta posibilidad de que un contaminante que ingresa al acuífero por la base de los cerros *Antiguo* y/u *Hospitalario* llegue a la *madrevieja,* indicando claramente la incidencia de la misma como potencial zona receptora del flujo proveniente de los cerros. Por su parte, las partículas asignadas en el tramo final del paleocauce, tienen como destino final el río Cauca.

En la Figura 4, se observan los resultados tanto del modelo de flujo como del seguimiento de partículas en la zona de estudio.

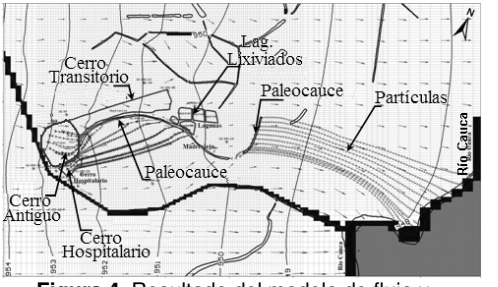


Figura 4. Resultado del modelo de flujo y seguimiento de partículas.

Los resultados obtenidos con el modelo de transporte se analizan para los distintos escenarios planteados.

Escenario 1

La pluma de contaminación originada para el escenario 1 presenta, en la base de los cerros, concentraciones que van desde 261 mg/l (t = 25 años) a 327 mg/l (t = 100 años). En profundidad, las mayores concentraciones se dan a los 10 m (524 mg/l). En los primeros años de simulación (t = 10 años) se produce un avance preferencial del frente de la pluma hacia la *madrevieja*, alcanzando hacia el final del período una extensión de 1200 m y una profundidad de 50 m (C = 10 mg/l). En la Figura 5a, se puede observar la configuración de la pluma para t = 100 años.

Escenario 2

En este escenario se evaluó el ingreso de cloruro al acuífero con una disminución gradual de su concentración durante los 100 años de simulación. En este caso, y para t = 25 años, la concentración máxima en la base de los cerros fue de 136 mg/l. A partir de t = 60 años, se aprecia una notable reducción en la concentración y extensión de la pluma, presentando un tenor de 25 mg/l en la base de los cerros. Para t = 70 años (Figura 5b) la concentración promedia los 12 mg/l, alcanzando un desplazamiento longitudinal de 1300m.

Escenario 3

La Figura 5c, muestra la pluma de contaminación para t = 60 años, es decir luego de 10 años de detenido el ingreso de cloruros desde las bases de los cerros. La concentración promedio de esta pluma residual es de 12 mg/l, y su desplazamiento de unos 900 m desde la fuente de ingreso.

Escenario 4

En el escenario 4 se contempló al paleocauce continuo al relleno sanitario como otra fuente adicional de contaminación. La Figura 6a presenta el período final de simulación (t = 100 años), para el cual se han generado 2 plumas de contaminación: la primera proveniente de los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*; y la segunda tiene su origen en el sector *Este* del paleocauce, con dirección a las inmediaciones del Río Cauca.

Las máximas concentraciones para ese período se dan en el sector del paleocauce, a una profundidad de 20 m (C = 500 mg/l).

En la vista transversal, Figura 6b, se observa que la pluma alcanza, sobre este sector, una profundidad máxima de 76 m y una longitud total de 2700 m.

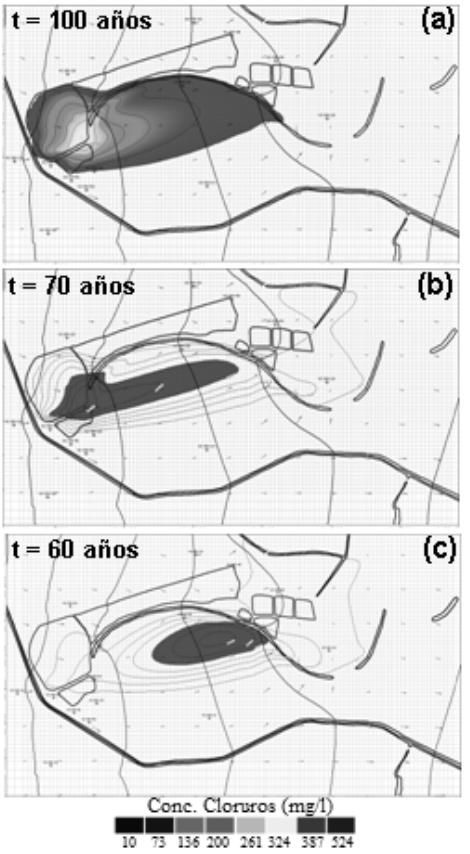


Figura 5. (a) Escenario 1 – 100 Años de simulación. (b) Escenario 2 – Atenuación en 100 años. (c) Escenario 3 – Atenuación en 50 años

Escenario 5

Para el último escenario simulado se consideró, además, una posible fuga producida desde las base de las lagunas de almacenamiento de lixiviado (puntos A y B), la que tendría lugar a partir del año 30.

La Figura 7a presenta los resultados obtenidos para un tiempo de simulación t = 50 años. En ella se aprecia el comportamiento diferencial de la pluma, tanto para el sector de la base de los cerros, como el paleoucauce y las lagunas.

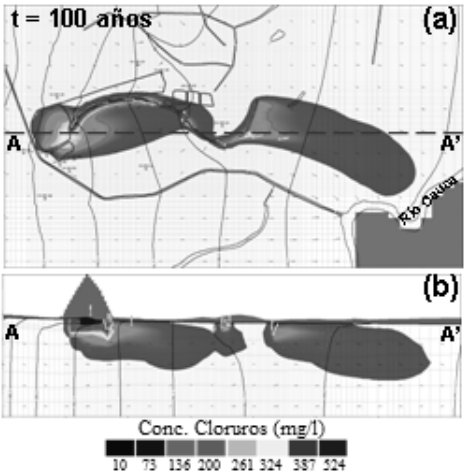


Figura 6. (a) Escenario 4 – Fuente contaminante en cerros y paleocauce. (b) Escenario 4 – Vista transversal.

La pluma generada en la base de los cerros presenta un frente de avance hacia el paleocauce.

En los puntos A y B (lagunas de almacenamiento de lixiviados) se generan dos plumas de contaminación. Cabe destacar que la generada en el punto A descarga en la *madrevieja*, indicando la importancia de dicho cuerpo de agua como vía preferencial de propagación.

Por su parte, en la Figura 7b se puede observar que, para un período de simulación de 100 años, la pluma originada en la base de las lagunas (punto B) adquiere dirección *Este,* alcanzando una longitud máxima de 530 m.

Conclusiones

La realización de este trabajo puso de manifiesto la importancia que reviste un buen conocimiento hidrogeológico del área de emplazamiento de un relleno sanitario. A pesar de la trascendencia que reviste el tema, hasta el momento no se había encarado en la ciudad de Cali un estudio integral, que tuviera en cuenta los distintos aspectos relacionados a la disciplina hidrogeológica, necesarios para caracterizar el estado del sistema hídrico subterráneo y su posible afección debido a la emisión continua de una carga contaminante generada en el relleno sanitario de Navarro.

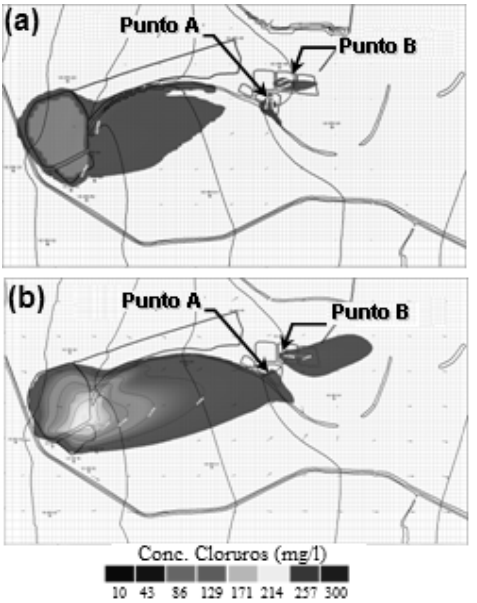


Figura 7. (a) Escenario 5 – tiempo de simulación 50 años. (b) Escenario 5 – tiempo de simulación 100 años

Con relación a los rasgos hidrogeológicos más importantes, el sector estudiado de Navarro presenta las características definidas a nivel regional para la zona plana del valle geográfico del río Cauca. La unidad hidrogeológica que revistió mayor importancia a los fines de este trabajo fue la *Unidad A*.

Para la representación de la posible trayectoria del agua percolada a través de los residuos depositados en el relleno de Navarro, se implementó un modelo matemático hidrogeológico, bajo la condición de régimen estacionario. Esta herramienta permitió representar con fidelidad el funcionamiento hidrodinámico del área de estudio.

Se identificó como el principal ingreso de lixiviados al sistema acuífero es el que ocurre a través de las bases de los cerros "*Antiguo*" y "*Hospitalario*" y a través del paleocauce (*madrevieja*). Esta última por ser una receptora directa de los lixiviados por escurrimiento superficial o de infiltración de los cerros contiguos. Otro sector en el cual se podría producir un eventual ingreso de contaminantes al acuífero es el que corresponde a las lagunas de almacenamiento de lixiviados, en especial debido a la cercanía del nivel freático y posición topográfica.

Respecto a los escenarios de transporte propuestos, los tres primeros contemplaron como única fuente de ingreso del contaminante la base de los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*. A pesar de las diferencias existentes entre los tres escenarios respecto al modo de ingreso de la fuente de cloruros al sistema hídrico subterráneo, los tres mostraron que, en los primeros años de simulación, el sector de la *madrevieja* constituye una vía de avance preferencial.

El escenario 4, que contempla además la presencia de lixiviado a lo largo de *madrevieja*, da como resultado la formación de dos plumas importantes: la primera de ellas generada desde la base de los cerros y la segunda desde la propia *madrevieja*. Esta posibilidad estaría indicando que la calidad del agua subterránea que descarga en el río podría verse afectada. Esta posibilidad debe ser tenida en cuenta ya que el río Cauca es la principal fuente de abastecimiento de agua de la ciudad de Santiago de Cali.

Finalmente, en el escenario 5 se consideró una posible fuga a través de las bases de las lagunas de almacenamiento de lixiviado a partir del año 30. La pluma generada en una de ellas (desde el punto A) descarga rápidamente sobre la *madrevieja* mientras que la pluma generada desde el punto B se desplaza en dirección al río Cauca.

Se estima que los resultados alcanzados en con este trabajo contribuyen al conocimiento del estado actual del sistema acuífero en el área del antiguo relleno sanitario de Navarro, y constituyen un elemento de juicio objetivo en relación al deterioro del recurso producto de la actividad humana.

Agradecimientos

Al Grupo de Aguas Subterráneas de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca por la información proporcionada.

Referencias

Anderson M. P. y Woessner W. W. 2002. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. Academic Press Inc., San Diego, California.

CVC - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. 2001. *Impacto del Basurero de Navarro sobre la calidad de las aguas subterráneas*. Informe de la Subdirección de Gestión Ambiental. Grupo de Aguas Subterráneas.

DAPM-CON-05. 2005. *Estudio de Hidrogeología – Área Con Régimen Diferido De Navarro (ARDN)*. Departamento Administrativo de Planeación Municipal – Alcaldía de Santiago de Cali. Colombia.

Gelhar, L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K.R., (1992). "A critical review of data on field scale dispersion in aquifers". Water Resources Research, 28(7): 1955-1974.

INGEOMINAS. 2003. Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental. *Informe Respuesta Sísmica del Subsuelo en el Sector de Navarro – Cali - Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali* - Convenio N° 02 de 2002, subproyecto de geología. Bogotá. Colombia.

McDonald M. y Harbaugh A. 1984. *MODFLOW, A modular three- dimensional finite difference ground-water flow model*. U. S. Geological Survey, Open-File Report 83-875, Chapter A1, Washington, DC, USA

Pollock, D.W. 1989. *Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 89-381, Denver, USA.

Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2005. *Visual Modflow User´s Manual*. Waterloo. Ontario, Canadá.

Xu, M., Eckstein, Y. (1995). "Use of least-square method in evaluation of the relationship between dispersivity and scale". Groundwater, 33(6), 905-908.

Zheng, C. 1990. *MT3D: A Modular 3-D Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems*. Report to the United States Environmental Protection Agency, 170 pp. (http://www.epa.gov/ada/csmos.html).

Zheng, C. y Bennet G. D. 1995. *Applied contaminant transport modeling: Theory and practice*. John Wiley and Son's. New York. USA.

Análisis de Sensibilidad Ambiental en sistemas acuíferos fisurados de la cuenca del río Santa Lucía, Uruguay.

Jorge Montaño [1], Mario Hernandez [2], María del Carmen Alvez [1], Mauricio Montaño [1], Alvaro Califra [3] y Marcos Bonjour [1]

[1] Geoambiente SRL, Río Branco 1438 of. 101, Montevideo Uruguay.
[2] Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina
[3] UDELAR, Facultad de Agronomía, Cátedra de Suelos, Montevideo, Uruguay
Mail de contacto: info@geoambiente-uruguay.com

RESUMEN

En Uruguay, los acuíferos fisurados representan casi el 68% de la superficie del País. En el sur, estos acuíferos están compuestos por rocas ígneas y metamórficas de edad precámbrica, cubiertos parcialmente por una delgada capa de depósitos superficiales que no superan los 10m de espesor, determinando una gran sensibilidad frente a potenciales contaminantes en zonas donde se emplaza una intensa actividad antrópica. En este caso se desarrolla un método de vulnerabilidad basado en la identificación de las zonas acuíferas y los diferentes amortiguadores físicos y químicos de los suelos que componen la cobertura rocosa. Estos datos integrados mediante herramientas SIG permiten analizar la información espacial representada en mapas temáticos. El resultado se presenta en una carta final de sensibilidad donde se separan diferentes zonas con variaciones en los grados de vulnerabilidad, la cual proporciona una herramienta de gran importancia para el ordenamiento territorial basado en la protección de los recursos hídricos
Palabras clave: acuífero, fisurado, sensibilidad ambiental, SIG

ABSTRACT

In Uruguay, fissured aquifers represent nearly 68% of the area of the country. In the south, these aquifers are composed of igneous and metamorphic rocks of Precambrian age, partially covered by a thin layer of surface deposits that do not exceed 10 m in thickness, determining a great sensitivity to potential contaminants, in zones where it is located intense human activity. In this case, we developed a Method of Sensitivity based on the different buffer zones and physical and chemical properties of the soil cover. These data were integrated using GIS tools to analyze spatial information represented in thematic maps. The result is presented in a final sensitivity map which separate different areas with varying degrees of vulnerability, which provides a very important tool for land use planning based on the protection of water resources
Keywords: aquifer, fissured, environmental sensitivity, GIS

Introducción

La cuenca del Río Santa Lucía, cubre en total una superficie de unos 14.000 km2. Su principal curso de agua abastece a la ciudad de Montevideo y el Sur del país, lo que representa un 60% de la población del Uruguay. (Fig.1) En toda el área se concentran zonas productivas importantes pertenecientes principalmente a pequeños propietarios, tamberos, chacras y escasas industrias químicas.

Un 60% del área de la cuenca, aproximadamente unos 9.000 km^2, corresponde a acuíferos fisurados, con rocas pertenecientes al basamento cristalino, compuestas principalmente por rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrica, cubiertas parcialmente por suelos y depósitos sedimentarios correspondientes a la Formación Libertad.

Debido a la intensa actividad antrópica que se desarrolla en la zona, es factible que los potenciales contaminantes puedan acceder al acuífero a través del medio no saturado, o directamente en el caso que el acuífero esté cerca de la superficie, o debido al mal uso del recurso por medio de pozos mal diseñados y entubados.

La metodología de trabajo se basa en la integración de datos mediante la utilización de herramientas SIG. La caracterización de la sensibilidad ambiental se realiza considerando la vulnerabilidad del acuífero basada en la capacidad de amortiguación natural de la zona no saturada. Específicamente se definen amortiguadores edafológicos y geológicos basándose en la carta de suelos del Uruguay, y en una extensa base de datos de perforaciones para abastecimiento de agua de los pequeños

productores que permiten ajustar los espesores de las capas suprayacentes al basamento.

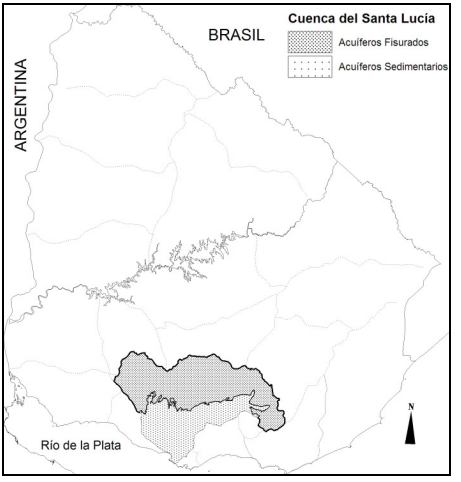


Fig. 1. Ubicación de la Cuenca del Río Santa Lucía.

De esta manera es posible estimar la amortiguación química (edafológica) en función de la capacidad de intercambio catiónico, y la física (geológica) a partir del tiempo de transferencia, influida por el espesor de los depósitos sedimentarios.

Metodología empleada

La metodología se fundamenta en los factores que inciden en la vulnerabilidad y son considerados para la caracterización de la sensibilidad ambiental en la cuenca y definen las características del medio no saturado y subsaturado.

- Suelos: Actúa uno de los principales factores regulador del grado de vulnerabilidad de los acuíferos en función de la amortiguación física, química y biológica.
- Zona no saturada: Refuerza la acción amortiguadora de los suelos y es esencial su rol en el caso que la cobertura edáfica sea nula o de escaso espesor.
- Zona saturada: Los acuíferos fisurados sin techo protector son altamente susceptibles a la contaminación.
- Recarga: Incide en la vulnerabilidad por ser el vehículo de los potenciales contaminantes.

Los suelos actúan como un medio de depuración natural y de reciclaje de las aguas. Los procesos de depuración más activos se dan en las primeras capas, correspondientes a los horizontes A y B.

La amortiguación química se presenta en función de la Capacidad de intercambio catiónico, lo que estará regulada por la proporción de materia orgánica y arcillas de tipo 2:1 (Illita, clorita, montmorillonita y vermiculita).

Caracterización del medio.

Los suelos predominantes en la zona de acuerdo a la Carta de Reconocimiento de suelos del Uruguay (MGAP, 1976) pertenecen al grupo de los Brunosoles (Argiudoles de acuerdo al Soil Taxonomy) correspondiente a las unidades San Gabriel – Guaycurú (SG-G), Isla Mala (IM), y Valle Aiguá (VA) (Fig.2).

Son suelos oscuros, con alto contenido de materia orgánica y texturas medias principalmente en los horizontes superficiales. Presentan una secuencia A-B_t-C, con un horizonte B generalmente argilúvico, (Argílico de acuerdo al Soil Taxonomy) de color oscuro.

Amortiguación química – Suelos

En la Tabla 1 se resume los datos referentes a la capacidad de campo expresada en mm, (cc-m) y a la conductividad hidráulica en flujo saturado en mm por hora (Chfs-mmh).

Tabla 1. Capacidad de campo y conductividad hidráulica de los principales grupos de suelos presentes en el área de estudio. [1]. Estimado a través de datos granulométricos y SPAW – Inédito, Califra,A.

Unidad	Agua cc-m	Chfs-mmh[1]
SG-G	90	4
IM	102	1
VA	90	1,2

Los argiudoles de estas Unidades, San Gabriel – Guaycurú (SG-G), Isla Mala (IM) y Valle Aiguá (VA) se caracterizan por una alta capacidad de intercambio catiónico, clasificándose como suelos con una amortiguación química edáfica de media a alta. (Montaño, 1999).

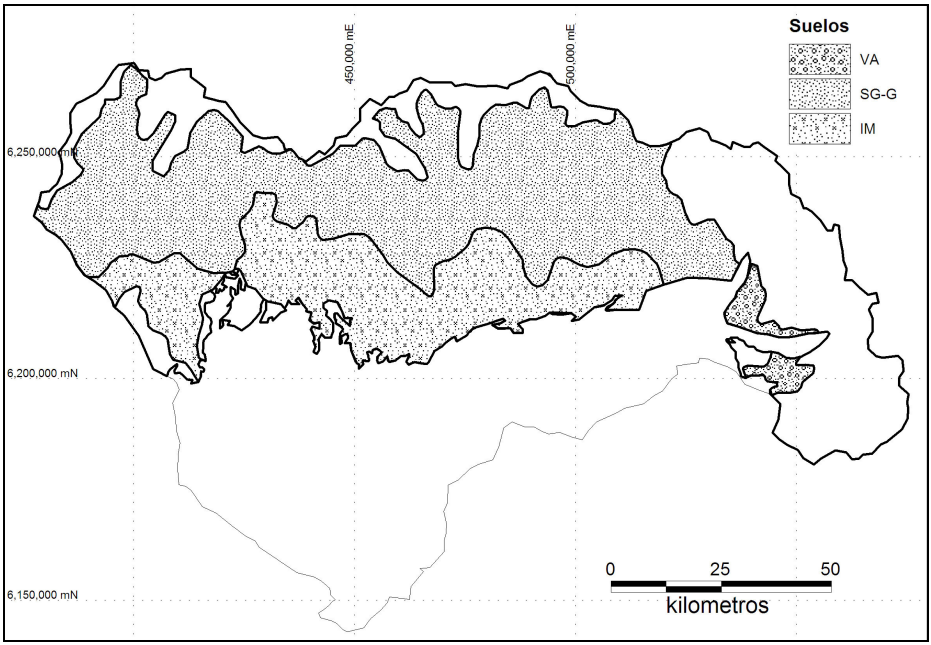


Fig.2. Clasificación de los suelos pertenecientes al área de estudio

Los niveles de acumulación de arcillas generalmente expansivas en el horizonte B, se expanden en condiciones de alta humedad generando barreras de muy baja permeabilidad, limitando e impidiendo muchas veces el pasaje de agua y por tanto de contaminantes hacia el subsuelo.
Este efecto se mide a través de la determinación del tiempo de tránsito. (Montaño, 1999), el cual para los brunosoles se establece en 71 días, (2,4 meses)

Amortiguación física - Geología

La cobertura sedimentaria del basamento cristalino corresponde a depósitos pertenecientes a la Formación Libertad (Pleistoceno Superior), correlacionable con limos pampeanos desarrollados en la llanura Chaco paranaense de Argentina. Son pelitas bien seleccionadas (loess) y mal seleccionadas (lodolitas) de tonalidades pardo a pardo rojizas con clastos dispersos en forma caótica en una matriz limo-arcillosa, siendo común la presencia de carbonato de calcio.
La permeabilidad media de la Formación Libertad es muy baja con velocidades de 0,012 m/día.

El tiempo de transferencia, se calcula en función de la permeabilidad media y el espesor de la formación.
Valores medios para la Formación Libertad (Montaño, 1999)

Espesor medio: 5-10
Espesor saturado: b – 2 m
Permeabilidad vertical k – 0,012 m/día
Gradiente hidráulico vertical: iv – 1

Aplicando Darcy, (Custodio y Llamas, 1983) se calcula la velocidad de transferencia aparente en 0,12 m/día, por lo que el tiempo de tránsito será:

Tt= espesor/ velocidad = 0.6 días (14.4 hs)

Para la determinación de los espesores de los sedimentos se contó con información de una base de datos de perforaciones para abastecimiento de agua, con un total de 123 registros de pozos distribuidos en la cuenca que captan agua del acuífero fisurado.

Los datos se encuentran georeferenciados, y proporcionan información acerca de la profundidad del pozo, nivel estático, nivel dinámico, caudal, y litologías atravesadas. Con estos datos se realizó un mapa de profundidad

del basamento. (Figura 3) y la elaboración de un mapa de rangos de espesor (Figura 4)

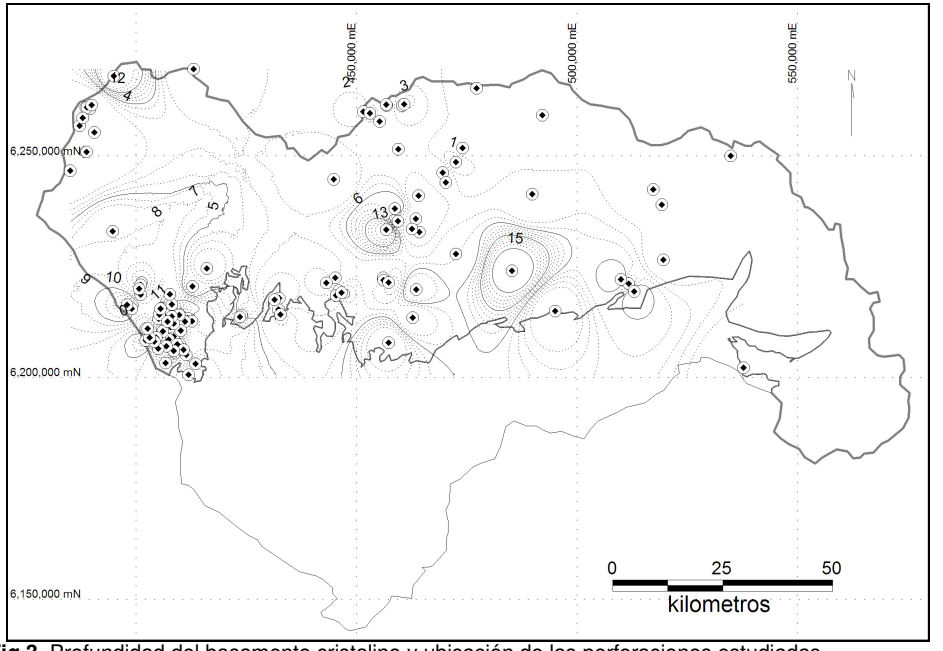


Fig.3. Profundidad del basamento cristalino y ubicación de las perforaciones estudiadas**.**

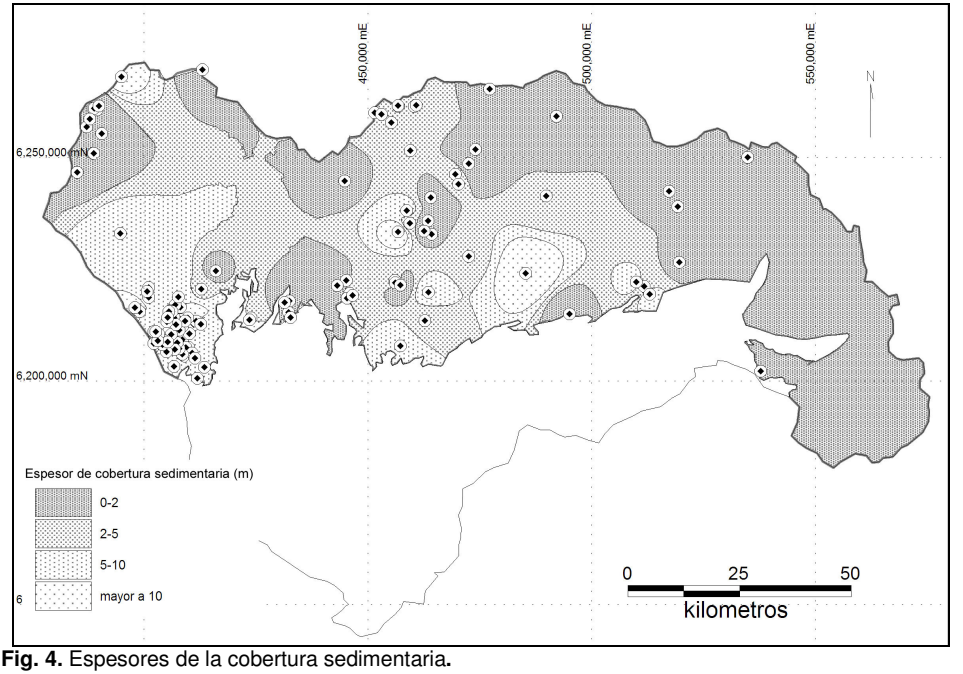


Fig. 4. Espesores de la cobertura sedimentaria**.**

Matriz de vulnerabilidad.

A través de los datos estudiados es posible determinar una matriz de vulnerabilidad asignándole un índice en función de la capacidad de amortiguación de los factores considerados.
El valor de la C.I.C. (Capacidad de intercambio catiónico) no se considera en la matriz de cálculo ya que las tres unidades de suelo (IM, VA, SG-G) corresponden al mismo grupo de suelos, Brunosoles, y sus valores son semejantes.

Tabla 2. Índice de vulnerabilidad en función del espesor sedimentario

Espesor sedimentario (m)	Índice de vulnerabilidad
0-2	0 (MUY ALTA)
2-5	0,5 (ALTA)
5-10	1 (MEDIA)
Mayor a 10	1,5 (BAJA)

Tabla 3. Índice de vulnerabilidad en función de la unidad de suelo y la conductividad hidráulica en flujo saturado, medido en milímetros por hora. (Chfs – mmh).

Unidad	Chfs-mmh	Índice de vulnerabilidad
VA	1,2	0,5 (MEDIA)
SG-G	4	0 (ALTA)
IM	1	0,5 (MEDIA)

Estos resultados se integran en una matriz que clasifica diferentes rangos de sensibilidad.

Tabla 4. Sensibilidad ambiental

Coeficiente	Sensibilidad
0-0,5	MUY ALTA
1	ALTA
1,5	MEDIA
2	BAJA

Tabla 5. Matriz de sensibilidad

Coef.[1]. Coeficiente de vulnerabilidad en función de la conductividad hidráulica en flujo saturado.
Coef.[2]. Coeficiente de vulnerabilidad en función del espesor de la cobertura sedimentaria.

Brunosol	VA (Valle Aiguá)				SG-G (San Gabriel - Guaycurú)				IM (Isla Mala)			
Coef.[1]	**0,5**				**0**				**0,5**			
Espesor sed	0-2	2-5	5-10	≥10	0-2	2-5	5-10	≥10	0-2	2-5	5-10	≥10
Coef. [2]	**0**	**0,5**	**1**	**1,5**	**0**	**0,5**	**1**	**1,5**	**0**	**0,5**	**1**	**1,5**
Índice	**0,5**	**1**	**1,5**	**2**	**0**	**0,5**	**1**	**1,5**	**0,5**	**1**	**1,5**	**2**
Sensibilidad	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Media	Muy Alta	Alta	Media	Baja

El mapa de sensibilidad ambiental comprende 4 escalas de valores, determinados a partir de la matriz de sensibilidad. Los resultados obtenidos permiten observar que un 60% del área estudiada correspondiente a los acuíferos fisurados pertenecientes a la cuenca del Río Santa Lucía, se clasifica como zona de muy alta sensibilidad ambiental, un 23% como zona alta, 14% media, y solamente un 3% a sensibilidad baja.

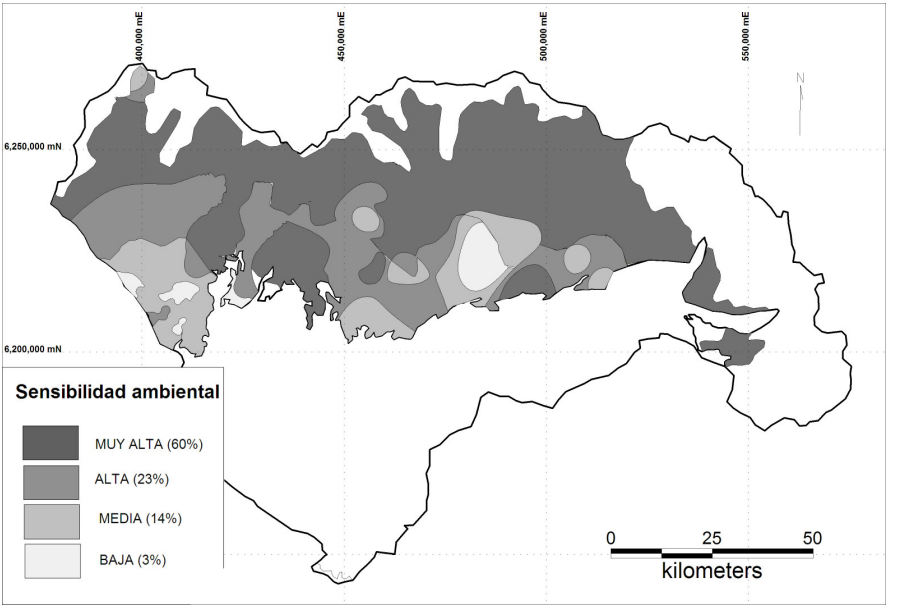


Fig. 5. Mapa de sensibilidad ambiental

Conclusiones y recomendaciones.

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología de caracterización de la sensibilidad ambiental de los acuíferos fisurados a partir de la vulnerabilidad de acuíferos en función de los parámetros de atenuación natural de la zona no saturada y subsaturada.

El mapa de sensibilidad ambiental comprende 4 escalas de valores, determinados a partir de la matriz de sensibilidad. De los resultados obtenidos se observa que solo un 3% del área estudiada (223 km^2) corresponde a zonas de baja sensibilidad ambiental, un 14% (885 km^2) a zonas de sensibilidad media, 23% (1454 km^2) a zonas de sensibilidad alta, y el 60% (3852 km^2) a zonas de muy alta sensibilidad ambiental.

Esta información es útil a la hora de determinar la implantación de actividades potencialmente contaminantes como lo son la ubicación de los tambos y feedlot característicos de la zona.

Se destaca la importancia de la Cuenca del Río Santa Lucía, ya que la misma abastece a más de un 60% de la población del Uruguay. Los acuíferos fisurados representan un poco más de la mitad del área de la cuenca y un 83% de los mismos está situado en zonas de alta a muy alta sensibilidad por lo que es necesario el desarrollo de una legislación que contemple la protección dentro del área, y se implemente un monitoreo permanente para evaluar su estado, y que permita corregir y mejorar las condiciones de la cuenca

Referencias

Custodio, E. y Llamas M. R. 1983. *Hidrología subterránea*. Ed. Omega. Barcelona.

MGAP, 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay.

Montaño Xavier, J, 1999. Caracterización y vulnerabilidad de sistemas hidrogeológicos discontinuos, Cuenca del Arroyo Carrasco, Montevideo, Uruguay. *Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires.*

SPAW – Soil – Air – Plant - Water Field & Pond Hydrology Version 6.02 75 Keith Saxton, *USDA Agricultural Research Service, Washington State University.*

Construcción de pozos para extracción de agua mediante pala barreno en el Chaco Salteño

Guillermo Baudino[1], Franklin Gomez Godoy[1], Hugo Meri[1] y Gabriela Pitzzú[2]

[1] Centro de Investigación y Desarrollo INTI-Salta, Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Av. Rodriguez Durañona 822 (4400) Salta, Argentina.
[2] Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Salta, Av. Bolivia 5455. Salta
Mail de contacto: gbaudino@inti.gob.ar

RESUMEN

El presente trabajo sintetiza las experiencias de construcción de pozos para extracción de agua subterránea mediante métodos manuales, llevadas a cabo en la región del Chaco Salteño, por el Centro INTI-Salta, en cooperación con la Secretaría de Recursos Hídricos de Salta y la Subsecretaría de Agricultura Familiar. El método desarrollado consiste en la combinación del excavado mediante pala barreno hasta atravesar la zona no saturada, el hincado de cañería plástica ranurada, la entubación mediante filtros y cañería plástica por dentro de la cañería de revestimiento y la introducción de prefiltro de grava seleccionada en el espacio anular entre ambas cañerías. El agua obtenida carece de sólidos en suspensión, lo que prolonga la vida útil de los equipos de bombeo. El bajo costo de las herramientas y la posibilidad de recuperar las cañerías en caso de obtener resultados negativos, hace que el método sea adecuado para la exploración.
Palabras clave: Agua, Derecho humano, Apropiación colectiva

ABSTRACT

This paper synthesizes the experiences in construction by manual methods of wells for groundwater extraction, carried out in the region of the Chaco Salteño by the Centro INTI-Salta, in cooperation with the Secretary of Water Resources of Salta and the Subsecretary for Family Farming. The developed method consists in the combination of the excavation with a bore shovel until crossing the unsaturated zone, the driving of a slotted plastic casing, the intubation using plastic filters and tubes within the casing and the introduction of selected gravel pre-filter in the void space between the two pipes. The water obtained has no solids in suspension, and therefore the lifetime of the pumping equipment will be incresed. The low cost of the tools and the possibility of recovering the pipes in case of negative results, makes the method suitable for exploration.
Keywords: Water, Human right, Collective appropriation

Introducción

El acceso a fuentes de provisión de agua es un derecho humano reconocido por la ONU en el año 2010. Sin embargo en nuestro país existen regiones en las que este derecho está seriamente restringido y donde el acceso al agua es una limitante para el desarrollo social, territorial e industrial. Como parte de las actividades de investigación y extensión del Centro INTI Salta, en cooperación con el Programa de Transferencia Tecnológica para la Economía Social, en el tema "Tecnologías de acceso al agua" se presentan los avances en el desarrollo de técnicas manuales innovadoras en la perforación de pozos para acceder al agua subterránea, que permitan su apropiación colectiva por parte de productores agropecuarios, campesinos y comunidades originarias de la región del Chaco Salteño. Para favorecer la apropiación de las innovaciones propuestas, se ha tenido en cuenta una serie de factores que condicionan el diseño, para que el producto sea económico y durable, de construcción, mantenimiento y administración fácil y segura, al mismo tiempo que los materiales de construcción y reparación tengan disponibilidad en los comercios de la zona. De esta manera los actores colectivos (asociaciones de productores campesinas y comunidades originarias) tienen la oportunidad de, aprender y administrar las tecnologías, así como los beneficios o soluciones que ellas aportan.

Objetivo

El objetivo de las tareas llevadas a cabo en la región del Chaco Salteño es el desarrollo y la aplicación de tecnologías que permitan el acceso a los recursos hídricos subterráneos y su aprovechamiento sustentable a los productores agropecuarios.

Metodología

El desarrollo tecnológico se llevó a cabo a través del relevamiento y selección de los métodos de perforación manuales utilizadas en la región y la introducción de técnicas usuales en la industria de la perforación mecánica.

La combinación de métodos fue probada en terreno mediante la realización de un taller con los productores locales, en el cual se concretó la perforación, la entubación y el ensayo de producción (Puesto Las Malvinas, Figura 1.).

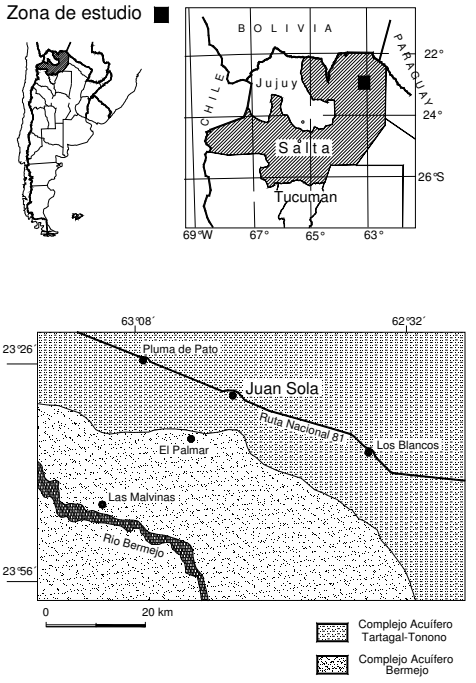


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

Ubicación

La zona de estudio se encuentra en el noreste de la Provincia de Salta, Argentina, en el Municipio de Rivadavia Banda Norte, cuya cabecera es la localidad de Coronel Juan Solá (Estación Morillo), del Departamento Rivadavia.

Características regionales

Población

Los niveles de pobreza ubican al Departamento Rivadavia entre los de mayor proporción de necesidad básicas insatisfechas (NBI) del país (Martínez, 2011). En dicha región, viven familias de productores campesinos agrupados en parajes rurales y comunidades originarias de la cultura wichi, en vinculación estrecha con el ambiente. Ambos grupos poblacionales aprovechan sustentablemente productos del monte (miel, frutos, animales y leña) y trabajan una ganadería caprina y bovina extensiva bajo monte. Existe asimismo una alta conflictividad vinculada al territorio, generada por el avance de la frontera agrícola.

Clima

La región del Chaco Salteño está caracterizada por un clima semiárido, con un promedio de precipitaciones de 576 mm anuales, que se concentran en el verano. En el resto del año en general no registran lluvias y las elevadas temperaturas (con máximas diarias mayores a 40 ºC en el verano) hacen que la escasez de agua sea una severa limitante para el desarrollo socio-económico.

La variabilidad interanual de las precipitaciones es muy importante. El análisis de las estadísticas pluviométricas históricas (Bianchi y Yañez, 1992) indica que se han registrado entre los años 1938 y 1990 importantes períodos de sequía, en los que el total anual ha sido inferior a los 400 mm (años 1938, 1945, 1948, 1958, 1973 y 1977).

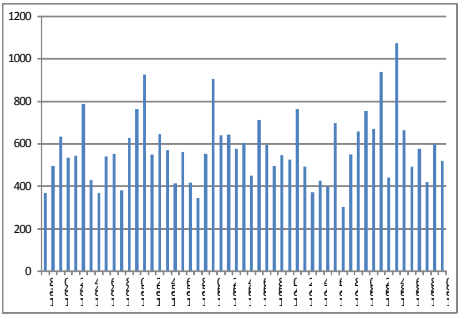


Figura 2. Precipitaciones anuales (mm) período 1938-1990.

Hidrogeología regional

Desde el punto de vista de la hidrogeología regional, en la zona de estudio se encuentran tres Complejos Acuíferos (Figura 1): el Complejo Acuífero Bermejo, el Complejo Acuífero Tartagal-Tonono y el Complejo Acuífero Terciario Subandino (García, 1.998). Este último infrayace a los dos primeros.

De acuerdo al citado autor, la columna hidroestratigráfica está compuesta por una cobertura de sedimentos cuaternarios de entre

20 y 30 m de espesor, por debajo de la cual se disponen sedimentitas del Terciario cuya potencia supera los 3.000 m.

Los sedimentos modernos consisten en arenas finas a muy finas, limo y arcilla y son de origen aluvial, depositados por el río Bermejo al pie de las Sierras Subandinas en la porción occidental de la Llanura Chaco-Paranaense.

Los principales reservorios de agua subterránea, en el cuaternario (C.A. Bermejo), son las lentes de arena fina a muy fina, que en general poseen recarga local proveniente de la infiltración de las lluvias estivales, o bien del escurrimiento superficial esporádico.

Los acuíferos situados por debajo de los sedimentos cuaternarios se encuentran en las sedimentitas del Terciario (C. A. Terciario Subandino) y existen numerosos antecedentes de perforaciones que han alumbrado reservorios que albergan agua de elevado contenido salino.

Hidrogeología local

La zona de estudio se caracteriza por su relieve plano, una suave pendiente hacia el este-sudeste y una altura sobre el nivel del mar de 200 m. A nivel local, tanto los acuíferos correspondientes al Complejo Acuífero Bermejo, como los que han sido asignados al C.A. Tartagal- Tonono, están alojados en sedimentos cuaternarios.

La distribución areal de los reservorios está estrechamente vinculada con los antiguos cauces del río Bermejo, que ha divagado por su llanura de inundación desde comienzos del holoceno.

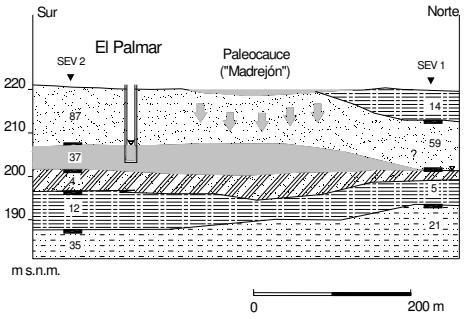
Los acuíferos del C.A. Tartagal-Tonono, en la zona de estudio, se relacionan con los derrames distales de los ríos Tartagal e Itiyuro y poseen un contenido salino considerablemente mayor a los del C.A. Bermejo.

Los niveles freáticos varían entre 8 y 20 metros bajo la superficie, en función de la topografía y las condiciones de recarga locales.

El agua albergada en los reservorios modernos posee una gran heterogeneidad en su composición química. El contenido salino de las perforaciones o pozos excavados en estos acuíferos varía entre 300 a 20.000 mg L^{-1}.

En algunos casos, las menores concentraciones se encuentran en las inmediaciones de paleocauces (“madrejones”), en los que se concentra el escurrimiento superficial esporádico generado durante las precipitaciones estivales. Sin embargo, la heterogeneidad de los sedimentos hace que esta situación no sea generalizable a todos los casos. Fecuentemente el agua alumbrada de perforaciones someras (entre 8 y 30 m bajo la superficie) es de calidad muy deficiente.

En general, inmediatamente por debajo de los acuíferos cuaternarios con baja concentración salina, se encuentran capas que contienen agua de mayor salinidad. En algunos casos no existen estratos impermeables que separen ambas capas, por lo que la gran mayoría de los sedimentos se encuentra dispuesta por encima del agua salada.



Referencias

SEV 2 ▼ Sondeo Eléctrico Vertical

12 Valor de Resistividad (Ωm)

Límite entre capas

Arena

Arena saturada con agua dulce

Arena saturada con agua salobre

Limos y arcillas

Arena con limo y/o arcilla

Nivel freático

Figura 3. Modelo hidrogeológico de un acuífero libre local (Puesto El Palmar, Figura 1.)

Cuando estos pozos son sometidos a una extracción intensiva, se produce un desmejoramiento de la calidad, razón por la cual debe ser interrumpida la producción. Los productores reportan que frecuentemente la calidad mejora luego de la temporada de lluvias (entre noviembre y marzo).

En la localidad de Coronel Juan Solá, cabecera del Municipio, la secuencia hidroestratigráfica ha sido perforada hasta los 120 m bajo la superficie. Se cuenta con legajos de 5 perforaciones en el éjido municipal, que brindan información sobre los acuíferos

alumbrados entre 45 y 117 m de profundidad. Actualmente se encuentran en funcionamiento 2 obras, que proveen agua de calidad apta para consumo humano desde el punto de vista físico-químico. Los caudales específicos varían entre 1,4 y 9 m^2/h/m, los caudales obtenidos oscilan de 11 a 50 m^3/h y la conductividad eléctrica registra una variación de 1,11 a 1,38 mS cm^{-1}.

Fuentes de aprovisionamiento de agua

Las fuentes de aprovisionamiento de agua más comunes son el escurrimiento superficial esporádico durante la época de lluvias y los acuíferos someros.

El escurrimiento superficial del agua de las lluvias del verano se concentra en cauces temporales o bien en antiguos cauces del río Bermejo, donde permanece algunos meses y es intensamente utilizado por los productores. En algunos casos este escurrimiento es embalsado mediante la construcción de represas. Las inversiones necesarias para este tipo de obras, la complejidad técnica y el riesgo de impacto ambiental en caso de desbordes, hacen que los pequeños productores no estén en condiciones de acceder a la construcción de estos embalses.

La perforación de pozos para captar y aprovechar las capas acuíferas existentes, es una tarea compleja y con elevado costo y alto riesgo de resultados negativos. La mayor parte de los acuíferos situados a profundidades accesibles a los pequeños productores (desde el punto de vista técnico y económico), poseen agua subterránea de calidad deficiente por el exceso de sales disueltas.

Los acuíferos con agua dulce están distribuidos de manera muy irregular tanto en sentido horizontal como vertical.

En los casos en que se alumbra agua subterránea de buena calidad, los productores agropecuarios pueden diversificar su producción y agregar valor a los productos primarios, mejorando sus ingresos y su calidad de vida.

La extracción del agua subterránea en general se realiza mediante electrobombas sumergibles, que requieren un generador de 3 a 5 kVA y que poseen la limitante de un desgaste muy acelerado debido a que los filtros utilizados en el revestimiento de los pozos son ineficientes para la retención de las partículas sólidas arrastradas por el ingreso del agua al pozo.

Vista la problemática y las oportunidades de subsanarlas a través del desarrollo de tecnologías apropiadas, el trabajo se centró en:

- Técnicas de exploración para la detección de acuíferos con agua dulce.
- Recuperación de métodos de perforación mediante herramientas manuales y mejora de las mismas.
- Innovaciones tecnológicas en la construcción e instalación de filtros y prefiltros para impedir el ingreso de partículas de arena y limo al pozo.

Resultados

Exploración de acuíferos

Indicadores: Los productores ganaderos del Chaco Salteño utilizan la presencia de determinadas especies vegetales (por ejemplo el Algarrobo blanco: *Prosopys alba*) y su comportamiento a lo largo de los años, como indicadores de la presencia de acuíferos con agua dulce cuyo techo se encuentra a profundidades de hasta 20 metros aproximadamente. La correspondencia entre indicadores y calidad del agua, pero sobre todo la cantidad disponible, no siempre es positiva, pero puede ser utilizada como una guía de prospección para orientar la búsqueda.

Geoeléctrica: La metodología de prospección geofísica en corriente continua (Sondeos Eléctricos Verticales mediante dispositivo Schlumberger) es sumamente útil para la detección de capas acuíferas de agua dulce, por el contraste existente entre las resistividades de las capas saturadas con baja concentración salina (valores entre 35 y 100 ohm.m, Figura 3 SEV 2) y capas de arcilla o saturadas con agua salobre (valores entre 1 y 10 ohm.m, Figura 3, SEV 1)

Técnicas de perforación

Los poceros de la zona utilizan diversas herramientas de perforación manual, con las cuales en algunos casos, mediante grandes esfuerzos y sorteando dificultades técnicas, logran alumbrar agua subterránea.

De las herramientas usuales, se han seleccionado para esta experiencia, las siguientes:

Pala barreno: la utilización de herramientas de perforación manuales, como la pala vizcachera o pala barreno, permite profundizar la excavación con un diámetro de hasta 200 mm, siempre y cuando las paredes del pozo sean estables. Cuando se producen derrumbes, existe el riesgo de pérdida de las herramientas, por lo cual se recurre a la entubación con cañería de plástico de 160 mm y la perforación debe continuar con una pala de menor diámetro, 120 mm.

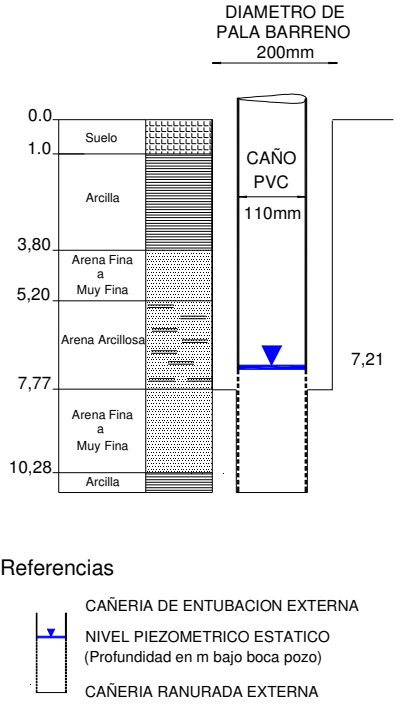


Figura 4. Esquema de cañerías al finalizar la primera etapa

Al llegar al nivel freático, en general es imposible avanzar con la pala barreno, por lo cual se debe introducir cañería de 110 mm, abierta en su extremo inferior y ranurada en un tramo que se infiere como espesor del acuífero.

Sonda: para avanzar con la profundización, se debe extraer el material que compone el acuífero mediante un dispositivo conocido como "sonda", que consiste en una cañería de acero de 60 mm de diámetro dotado de una válvula de retención en su extremo inferior. Esta sonda es introducida por dentro de la cañería de 110 mm suspendida por una cuerda, y con movimiento de vaivén la arena acuífera ingresa por el extremo inferior y es retenida por la válvula. Al mismo tiempo que se retira el material, la cañería de revestimiento va siendo introducida en la excavación, para evitar que se derrumben las paredes.

Una vez que se alcanza la base del acuífero, o bien cuando no puede introducirse la cañería a mayor profundidad, se concluye esta etapa (Figura 4). Se considera que un espesor de 2 a 10 m de acuífero permite obtener agua para cubrir las necesidades mínimas de provisión familiar.

Construcción de filtros

El pozo construido hasta esta etapa está en condiciones de producir agua y pueden extraerse muestras para su análisis físico-químico. Esto es especialmente útil ya que pueden extraerse muestras para determinar su aptitud para diferentes usos. Sin embargo, el arrastre de partículas sólidas hace que la vida útil sea muy breve, tanto por el embancamiento del pozo como por el desgaste del equipo de bombeo.

Para subsanar este problema se experimentó la instalación de una segunda cañería ranurada en la zona acuífera, de 90 mm de diámetro, por dentro de la cañería de 110 mm. En el espacio anular entre ambas cañerías se coloca grava seleccionada, cuya granometría se calcula mediante el método de Nold (Custodio y Llamas, 1996). Desde el punto de vista económico esta metodología permite reducir costos constructivos, ya que el volumen de prefiltro necesario (4 L/m) es mucho menor que en el utilizado cuando se debe instalar prefiltro entre las paredes del pozo y los filtros.

El prefiltro puede prepararse en forma manual mediante dos zarandas, a partir de grava aluvial local, lo que hace a este material sumamente accesible a los pequeños productores.

Operativamente también se tiene la ventaja de que el prefiltro desciende con mayor facilidad y puede constatarse su correcta colocación frente a la zona de admisión (Figura 5).

El diámetro de la cañería y filtro permite la instalación de una electrobomba de 75 mm de diámetro externo y potencia de ½ a ¾ HP, con capacidad de producción de 1.000 a 7.000 $L.h^{-1}$, en función de la productividad del acuífero y la altura manométrica alcanzada.

Conclusiones

El método de perforación propuesto combina técnicas manuales sencillas y efectivas, que permiten el acceso al acuífero freático de manera rápida y económica.

Las herramientas utilizadas son fácilmente reproducibles por los interesados.

La entubación puede realizarse con cañerías disponibles en los comercios de la zona de estudio, a precios accesibles para los pequeños productores.

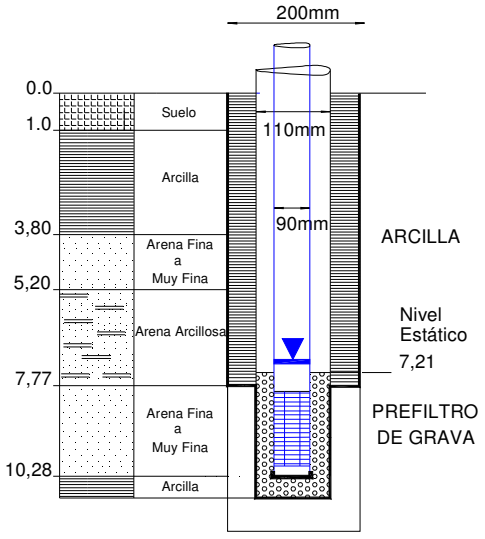


Figura 5. Esquema de cañerías, filtros y prefiltro de la obra finalizada

En caso de obtener agua de calidad química deficiente, las cañerías pueden recuperarse para un nuevo intento de captación.

El área de admisión (filtro y prefiltro) también puede ser construida con materiales disponibles en la zona.

El volumen de prefiltro necesario es pequeño, por los que no incrementa los costos de manera significativa.

El agua obtenida carece de sólidos en suspensión, por lo que la metodología propuesta resuelve el principal problema de las obras de captación de agua subterránea en la zona.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer especialmente a la Familia de Guzmán, propietarios del Puesto Las Malvinas, Municipio de Coronel Juan Solá, Departamento Rivadavia, Provincia de Salta, por su hospitalidad durante las tareas de campaña, así como a los participantes del "Taller de construcción de pozos con pala barreno", por la experiencia de intercambio de conocimentos realizada.

Asimismo se agradece a la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Salta, por todo el apoyo recibido.

Referencias

Bianchi, A.R. y Yañez, C.E. 1992. Las precipitaciones en el Noroeste Argentino. INTA-EERA. Salta.

Custodio, E. y Llamas, R. 1996. Hidrología Subterránea. Ed. Omega. Barcelona.

García, R. 1998. Hidrogeología del Chaco Boreal Salteño. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta.

Martínez, E. 2011. La pobreza, en realidad: las varias pobrezas. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires. Aportes INTI – 14: 2-68.

Características hidrogeomorfológicas del humedal costero de Atalaya (Argentina)

Melo Marisol [1,2], Carol Eleonora [1,2], Laurencena Patricia[1,3], Deluchi Marta [1,3]

[1]Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata 64 n°3 La Plata.
[2]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
[3]Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).
.

Mail de contacto: eleocarol@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMEN

El objetivo del trabajo es realizar una caracterización hidrogeomorfológica del humedal ubicado en la localidad de Atalaya, en el litoral del estuario medio del Río de la Plata. Para ello se realizó un estudio geomorfológico y geológico en base a análisis de imágenes satelitales y relevamientos de campo. Posteriormente se efectuó un muestreo de agua subterránea somera para la determinación del contenido en iones mayoritarios. Los resultados obtenidos permiten reconocer, dentro del humedal sectores con agua dulce cuya existencia está determinada por la presencia de remanentes de antiguos cordones conchiles. La identificación de estas fuentes de agua dulce es de utilidad para planificar el desarrollo de la región y el uso sustentable del agua.
Palabras clave: planicie costera, humedal, lente de agua dulce, hidroquímica.

ABSTRACT

The aim of this work is to carry out a hydrogeomorphological characterization of the wetland located in Atalaya (littoral of the middle Río de la Plata estuary). The study of the geomorphological and geological features was based on satellite images and field surveys, as well as groundwater samples for the determination of major ion content. The results allow us to recognize freshwater sectors whose existence is determined by the presence of remnants of old shell ridges. Identifying these freshwater sources is useful for planning the development of the region and the sustainable use of water.
Keywords: coastal plain, wetland, freshwater lens, hydrochemistry.

Introducción

Los humedales son zonas donde el nivel freático aflora o se encuentra muy próximo a la superficie, o donde la tierra está cubierta por agua temporal o permanentemente (Custodio 2010). En particular, los humedales costeros son ambientes hidrológicos complejos donde las características hidrodinámicas e hidroquímicas del agua dependen de distintos factores tales como la influencia mareal, la geología, la geomorfología, las características climáticas, etc. (Lopez Geta y Fornes Azcoiti 2009).

En el litoral del Río de la Plata se desarrolla un extenso humedal asociado a la planicie costera del río, que se extiende por aproximadamente 320 km (Fig. 1). Se reconocen en este ambiente una gran variabilidad química en el agua subterránea, la cual está regulada por diferentes procesos dependiendo de las características propias del sector del humedal estudiado (Logan et al. 1999, Carol et al. 2008, Carol et al. 2009, Carol et al. 2013).

La localidad de Atalaya es un pequeño poblado donde viven aproximadamente 400 habitantes permanentes llegando a duplicarse durante el verano. La población de las áreas rurales se abastece de agua a través de perforaciones someras, mientras que en el pueblo existe servicio de red de agua potable. No obstante, durante el período estival hay una demanda de mayores volúmenes de agua que no alcanzan a ser cubiertos por el servicio de red, debiendo recurrir los habitantes del pueblo a abastecerse también a través de perforaciones someras. Esto determina una estrecha relación entre los recursos subterráneos de agua dulce y el crecimiento poblacional. El objetivo del trabajo es realizar una caracterización hidrogeomorfológica del sector del humedal ubicado en la localidad de Atalaya (Fig. 1). Este estudio permitirá identificar las fuentes de agua dulce lo cual será de utilidad para planificar el desarrollo de la región.

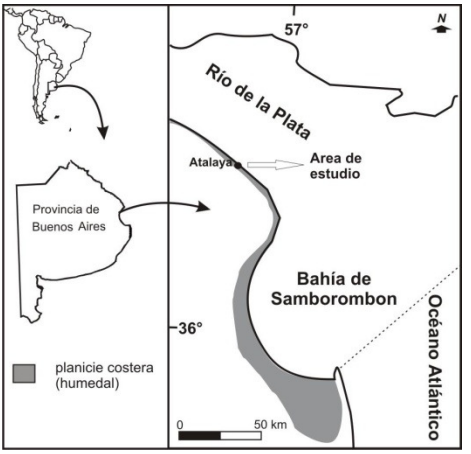


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Metodología

Con el fin de identificar ambientes con características geohidrológicas distintivas se realizó el reconocimiento geomorfológico del área a partir del análisis de cartas topográficas a escala 1:50.000, fotografías aéreas e imágenes satelitales.

Posteriormente se generó una red de monitoreo donde se midieron niveles y se efectuó el muestreo de agua subterránea somera. La recolección, preservación y análisis químico de las muestras de agua fue realizada según los métodos establecidos por la American Public Health Association (1998). En los puntos de toma de muestras de agua se determinó *in situ* la conductividad eléctrica y temperatura del agua con un equipo portátil. En laboratorio se determinó el pH y la concentración de bicarbonato, cloruro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y potasio.

Los resultados de las concentraciones de los iones mayoritarios se analizaron mediante gráficos hidroquímicos.

Resultados

Características hidrogeomorfológicas

El área analizada se desarrolla entre la cota 15 msnm y la cota 0 msnm, correspondiente al Río de la Plata. Se pueden diferenciar dos ambientes geomorfológicos: la llanura continental y la planicie costera (Fig. 2), cuyo límite coincide aproximadamente con la cota de 5 msnm.

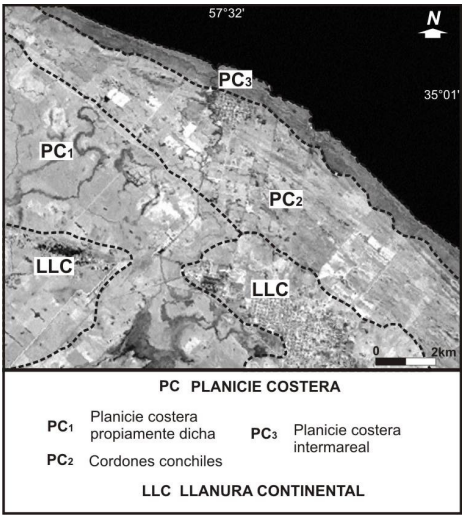


Figura 2. Unidades geomorfológicas

La llanura continental tiene escasa representación dentro del área de estudio, presentan suelos bien drenados, sin estancamiento de agua.

Dentro de la planicie costera se reconocen tres subambientes: planicie costera propiamente dicha, cordones conchiles y planicie costera intermareal. La primera presenta una superficie llana con un escurrimiento superficial de desarrollo meandriforme, con planicies de inundación amplias que dada la escasa pendiente conforman bañados adyacentes a los cauces.

Los cordones conchiles se disponen en forma paralela a la línea de costa. Son de fácil identificación en la imagen satelital por la alternancia de líneas claras y oscuras que se entrecortan. Las líneas de tonos claros se corresponden con las partes más elevadas donde aflora el material calcáreo y las líneas de tonos oscuros con las zonas más deprimidas, con presencia de humedad en superficie o próxima a ella, dependiendo de las condiciones hidrológicas. Los cordones se reconocen en el campo como suaves ondulaciones. La explotación saltuaria del calcáreo ha nivelado el terreno quedando escasos sitios donde se conserva la fisonomía original. En los sectores con relieve más pronunciado es fácilmente detectable la presencia de los cordones conchiles, que en algunos casos, preservan la vegetación natural de *celtis tala*.

La planicie costera intermareal es la franja adyacente al Río de la Plata, emplazada por

debajo de la cota de 2,5 msnm. Es un área inundable, con agua en superficie durante gran parte del año, que recibe el flujo mareal desde el estuario y tiene vegetación abundante, típica de áreas de marisma.

El agua subterránea somera se asocia al acuífero libre que se aloja en los Sedimentos Postpampeanos y Pampeanos (Fig. 3).

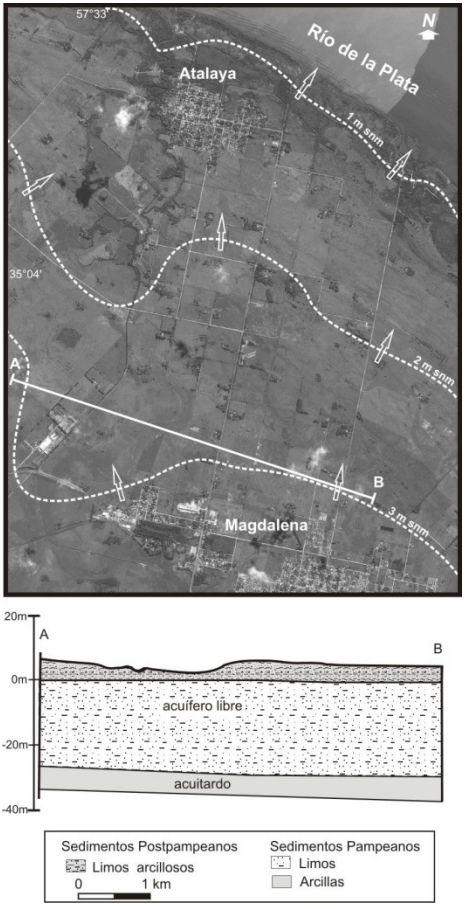


Figura 3. Mapa de flujo de agua subterránea somera y perfil hidrogeológico

Los Sedimentos Postpampeanos afloran en toda el área de planicie costera y están formados por limos grises a verdosos con restos de conchillas con un espesor cercano a los 6 m. En el ambiente de los cordones conchiles los sedimentos están compuestos por restos de conchilla y arenas (Fig. 3).

Los Sedimentos Pampeanos afloran en la llanura continental y se desarrollan debajo de los Postpampeanos en el ámbito de planicie costera. Constituyen depósitos limosos a arcillosos de coloración pardo rojiza o amarillenta de aproximadamente 25 m de espesor que presentan en la base una arcilla de color gris azulado de 10 m de espesor (Fig. 3).

Los niveles freáticos se encuentran próximos a la superficie (generalmente a menos de 1 m de profundidad). El flujo subterráneo regional es hacia el Río de la Plata y el local hacia loa arroyos y zonas deprimidas, siendo el gradiente hídrico del orden de 10^{-3} (Fig. 3).

Características hidroquímicas

La caracterización de las muestras de agua a partir de los diagramas de Stiff permite reconocer una relación entre la química del agua subterránea y la geomorfología (Fig. 4).

En la llanura continental el agua tiene una conductividad eléctrica menor a 700 µS/cm y es de tipo bicarbonatada cálcica magnesiana. La concentración de bicarbonato es de 565 mg/L, la de calcio 85 mg/L y la de magnesio de 66 mg/L.

En el humedal la química del agua varía en cada sub-ambiente. En la planicie costera propiamente dicha el agua es predominantemente bicarbonatada sódica con valores medios de conductividad eléctrica de 2229 µS/cm. Las concentraciones de bicarbonato y sodio son poco variables, siendo los valores medios de 823 mg/L y 307 mg/L, respectivamente.

En el ambiente de cordones conchiles se diferencian dos tipos de agua. Las muestras extraídas de pozos ubicados sobre los cordones conchiles son predominantemente bicarbonatadas cálcicas a magnesianas de baja salinidad, con conductividades eléctricas del agua medias de 2385 µS/cm. Los contenidos de bicarbonato varían entre 125 y 870 mg/L, los de calcio entre 23 y 224 mg/L y los de magnesio entre 18 y 110 mg/L.

En las zonas deprimidas que existen entre los cordones el agua es clorurada sódica con salinidades muy variables (entre 1216 y 7750 µS/cm). Las concentraciones de cloruros varían entre 192 y 2455 mg/L y las de sodio entre 185 y 1805 mg/L.

Por su parte en el área de planicie intermareal el agua es al igual que en el Río de la Plata, bicarbonatada cálcica a clorurada con una conductividad eléctrica media 3382 µS/cm. El contenido medio de bicarbonato es de 702 mg/L, el de calcio es de 152 mg/L y el de cloruro es de 782 mg/L.

Figura 4. Gráficos de clasificación de aguas de Stiff para los distintos sectores del humedal.

Conclusiones

Las características hidrogeomorfológicas de cada sub-ambiente del humedal (planicie costera, cordones conchiles y planicie intermareal) determinan que existan variaciones espaciales en la química del agua subterránea somera. Las fuentes de abastecimiento de menor salinidad se asocian a lentes de agua dulce cuya existencia está determinada por la presencia de remanentes de antiguos cordones conchiles. Estos sitios de mayor permeabilidad favorecen la recarga de las precipitación y permiten la acumulación de agua dulce en el acuífero. Si bien el sub-ambiente de cordones conchiles tiene una gran extensión dentro del humedal, la presencia de sectores deprimidos con agua clorurada sódica salina hacen que las reservas de agua dulce sean muy limitadas y su explotación requiere de una planificación para evitar la salinización de los pozos con el agua salina adyacente.

Referencias

American Public Health Association. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington,DC.

Carol, E., Kruse, E., Pousa, J. 2008. Environmental hydrogeology of the southern sector of the Samborombon bay wetland, Argentina. Environmental Geology 54: 95-102.

Carol, E., Kruse, E., Mas Pla, J. 2009. Hydrochemical and isotopical evidence of ground water salinization processes on the coastal plain of Samborombón Bay, Argentina. Journal of Hydrology, 365: 335-345.

Carol, E., Mas Pla, J., Kruse, E. 2013. Interaction between continental and estuarine waters in the wetlands of the northern coastal plain of Samborombón Bay, Argentina. Applied Geochemistry DOI: 10.1016/j.apgeochem.2013.03.006.

Custodio E. 2010. Aguas subterráneas y humedales en zonas llanas. *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*, 39 – 49.

Logan, W., Auge, M., Panarello, H., 1999. Bicarbonate, sulfate and chloride water in a shallow, clastic-dominated coastal flow system, Argentina. Ground Water 37, 287–295.

Lopez Geta J.A., Fornes Azcoiti J.M. 2009. La geología e hidrología en la investigación de humedales. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N°28. 306 p.

Heterogeneidades hidrogeológicas de la Cuenca inferior del Río Uruguay

Marcos Bonjour[1], Jorge Montaño[2] y Mario Hernández[2]

[1] Facultad de Ciencias, UDELAR, [2] GeoAmbiente SRL, [3] Universidad Nacional de la Plata
Mail de contacto: bon1387@hotmail.com

RESUMEN

Se puntualizan las principales divergencias existentes respecto a la hidrogeología en ambas márgenes del Río Uruguay. El afloramiento de formaciones de edades cuaternarias de gran capacidad acuífera en el margen argentino utilizadas para riego de cultivos de arroz con caudales superiores a 500m^3/h (Formación Ituzaingó y Formación Salto Chico), condicionan a que la extracción del agua subterránea en casi su totalidad corresponda a acuíferos superficiales. En la cuenca litoral uruguaya sin embargo los acuíferos más productivos son los de edad cretácica y los caudales que se alcanzan son sensiblemente inferiores a los que se consiguen en la Provincia de Entre Ríos. Las divergencias hidrogeológicas presentes en ambos países corresponden a discontinuidades de origen tectónico coincidente con el cauce del río, que han producido un hundimiento relativo de los sedimentos cretácicos en la margen derecha (Argentina), que afloran en la margen izquierda (Uruguay).
Palabras clave: acuífero, cuenca, perforación, asimetría.

ABSTRACT

To instances of the hydrogeology of both margins of the Uruguay River divergences are spelled. The age formations outcrop high-capacity quaternary aquifer in the Argentine margin used to irrigate rice crops with flows exceeding 500m3 / h (Formation Ituzaingó and Formation Salto Chico), to determine groundwater extraction almost entirely corresponds to surface water. In the Uruguayan Coastal Basin aquifers however most productive are those of Cretaceous age and flow rates are achieved are significantly lower than those achieved in the province of Entre Rios. The hydrogeological differences in both countries correspond to discontinuities of tectonic origin coincident with the channel of the river that have produced a relative sinking cretaceous sediments in the right margin (Argentina) that outcrop on the left side (Uruguay).
Keywords: aquifer, basin, drilling, asymmetry.

Introducción

En el conocimiento del potencial social y productivo de un área, no se puede evadir el estudio de las fuentes del agua, ya sean ríos, lagos o acuíferos. Es imprescindible contemplar con claridad cada una de las opciones para la correcta toma de decisiones.

Es conocido que en el área litoral uruguaya y en la Provincia de Entre Ríos (Argentina) existen acuíferos que se han venido explotando desde hace décadas para abastecimiento público de poblaciones y riego. Sin embargo existen aspectos no del todo claros en el sector uruguayo por falta de un análisis hidrogeológico del subsuelo en el área. Otra limitación es la información de perforaciones que, o bien no cuentan con datos fehacientes o es posible hallarla esparcida en diferentes entidades públicas y privadas, en muchos casos incompleta. Dado este contexto, unificar el conocimiento hidrogeológico del área es de por si un objetivo a alcanzar, pero lo más significativo es la posibilidad de contar con información suficiente para caracterizar satisfactoriamente los acuíferos cretácicos del litoral como base para un posterior modelo conceptual.

Este trabajo se enmarca en el convenio entre las universidades de La Plata (Argentina) y de la República, para el estudio geo-hidrogeológico de la cuenca inferior del río Uruguay, apoyado fundamentalmente en el producido por Montaño et al. (2012). Se presentan los resultados sobre las características hidrogeológicas del área las causas de la generación de asimetrías del potencial hidrogeológico entre los acuíferos de ambas márgenes.

Objetivos

Realizar una caracterización hidrogeológica de las formaciones sedimentarias cretácicas de la Cuenca Litoral de Uruguay (formaciones

Mercedes y Guichón) y analizar las diferencias entre los acuíferos de ambos países.

Área de estudio

Abarca la Cuenca Litoral uruguaya que ocupa parcialmente los departamentos Salto, Paysandú, Río Negro, Soriano, Colonia, Durazno y Flores, junto con el área colindante de Entre Ríos (Argentina), que es incluida dentro de este trabajo como sitio de análisis y comparación (Figura1).

Esta zona está situada entre los paralelos 31º00' y 34º00' Sur y meridianos 57º00' y 59º00' Oeste aproximadamente, en un área total de 50000 km^2.

Fig. 1. Ubicación del área de estudio.

Contexto geológico

Cuenca Litoral

Con aproximadamente 25000 km^2, se continua geográficamente en la Mesopotamia Argentina, presentando sedimentos del Cretácico y Cenozoico, con espesor en torno a los 300m.

El sustrato se conforma en el N y NE por rocas de la Formación Arapey, mientras que en el S y SE se compone de "granito-greenstone" (terreno Piedra Alta). Las principales líneas estructurales del sustrato, condicionaron de forma importante la sedimentación en la cuenca, pudiendo mencionarse la falla Sarandí del Yí-Ao. Solís Grande (Oyhancabal et al. 1993), fallas que afectan derrames basálticos como en Daymán-Bonete con dirección NNW, y lineamientos rumbo NS.

Durante el Neocomiano ocurrió globalmente una regresión marina y regionalmente, se dio un magmatismo fisural que produjo espesos derrames lávicos de la Formación Arapey. Posteriormente la sedimentación continental predominó en cuencas tipo rift, estrechas y profundas. En este contexto distensivo y subsidencia termo-mecánica, producto del peso de los derrames, se generó un espacio sedimentario endorreico, cuyo epicentro se localiza en la Mesopotamia (Goso, 1999).

Se puede mencionar que esta cuenca se continúa en Argentina, pudiendo correlacionarse por ejemplo la Formación Guichón con las formaciones Puerto Yeruá y Saldán, como también la Formación Mercedes con la Formación Mariano Boedo en función de sus características litoestratigráficas.

Formación Mercedes

Definida por Bossi (1966), se ubica en la zona centro sur de la Cuenca Litoral mostrando gran diversidad litológica. En el centro norte del país se apoya discordantemente sobre Guichón y Arapey, en el litoral sur sobre distintas litologías del Terreno Piedra Alta, en tanto que en el centro llega a yacer sobre rocas de las formaciones Cerrezuelo y Tacuarembó. Por otra parte puede ser cubierta discordantemente por las formaciones Fray Bentos y Libertad.

Ford & Gancio (1989) la subdividieron en dos miembros, el inferior conformado por una secuencia grano/estrato decreciente y el superior, a partir de que existe uniformización faciológica. El primero se integra con depósitos de arreglo general granodecreciente y estratificación de tamaño mediano a medio, cuya base son diamictitas o conglomerados, con pelitas calcáreas o calcáreos de poca potencia. El miembro superior se define como una secuencia de areniscas finas a medianas, de selección regular con arena gruesa dispersa. En esta secuencia se intercalan niveles de calizas de hasta 15 m de potencia según Veroslavsky et al. (1998) con presencia ocasional de arena.

Formación Guichón

Se trata de una unidad definida por Bossi (1966), apoyada discordantemente sobre la Formación Arapey, cubierta según su posición en la cuenca por las formaciones Mercedes, Fray Bentos, Salto y depósitos cuaternarios.

Según Goso (1999), el 90% de sus sedimentos serian areniscas finas a medias con matriz pelítica que constituye 30-35% de la roca. Los clastos cuarzosos del esqueleto presentan un grado de selección moderado a bueno.

Cuenca Chacoparanaense

Ocupa un área de 643000 km^2 (Barredo y Stinco, 2010) en las provincias argentinas del centro, Norte y Noreste. Se trata de una cuenca elíptica con eje orientado ENE-WSW y unos 6km de relleno sedimentario y volcánico.

Desde el punto de vista tectónico muestra una tendencia neutra, resultado de la transición entre la subsidencia mesozoica y la progresiva inversión andina.

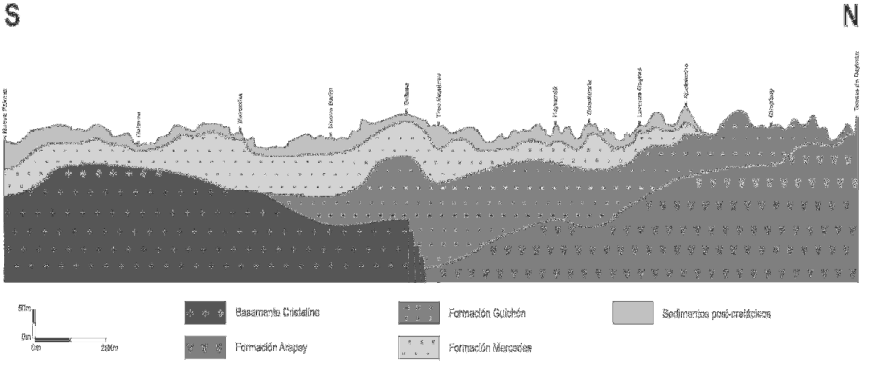


Figura 2. Corte geológico de la Cuenca Litoral

Sin embargo, desde el Paleozoico Inferior se sucedieron episodios de subsidencia localizados en el centro-norte de la provincia de Santa Fé, y en diferentes edades y ubicados incluso en la periferia de la llanura.

La sucesión sedimentaria muestra a escala regional, diferentes fosas, que confieren al basamento formas de cubetas separadas por altos de edades jurásica-cretácica y pre-carbonífera, en el alto Pampeano-Chaqueño (Chebli et al., 2000).

Los depósitos de plataforma conformaron ciclos regresivos-transgresivos, alcanzando un espesor de 5000 metros e incluyendo materiales ígneos (Fernández Garrasino et al 2005).

Durante la orogenia gondwánica de la secuencia Carbonífera-Pérmica. La subsidencia durante esta etapa estuvo asociada a la flexión litosférica, como resultado de procesos orogénicos y posterior período de extensión

A partir del Triásico adquirió rasgos de una cuenca de rift continental, con relleno fluvio lacustre controlado por la evolución de fallas. Durante el Jurásico, fue sometida al efecto de una anomalía térmica previa a la apertura del océano Atlántico, reactivando antiguas estructuras extensionales en un proceso de rifting activo.

Depósitos fluviales apoyados en discordancia sobre el substrato paleozoico de la base de la Formación Tacuarembó (Fernández Garrasino et al 2005) serían la evidencia de un alzamiento regional, seguido por las coladas basálticas de la Formación Serral Geral.

Formación Puerto Yeruá

Estaría constituida (Tofalo y Pazos, 2002) por sedimentos epiclásticos y carbonáticos aflorantes en el NE de Entre Ríos, de Concordia hasta Colón, asignados al Cretácico. Superior.

Estos sedimentos forman cuerpos lenticulares de 1-4m de espesor, con base neta erosiva, compuestos por sucesiones desde conglomerados hasta pelitas. Aparecen modelos de estratificación que sugieren un ámbito de depositación fluvial, con canales de baja a moderada sinuosidad.

Formación Saldán

Es un grupo de litologías sedimentarias cretácicas integradas por conglomerados y brechas con matriz arenosa y algo limosa, con intercalaciones de arenas. Poseen alto contenido calcáreo y poco yeso, fuertemente consolidadas. Puede alcanzar 250m de espesor. Fue interpretada como correspondiente a facies proximales, media y distales de abanicos aluviales en clima árido (Santa Cruz y Silva Busso, 1999).

Formación Mariano Boedo

Se compone de areniscas medias a finas varicolores, con escasa matriz y cemento, de composición cuarzosa. Como litologías subordinadas se presentan arcillitas, junto con cristales de yeso (Chebli et al 2000. El máximo espesor de en la Cuenca Chacoparanaense es de alrededor de 350m.

Caracterización hidrogeológica

En este capítulo se refieren los parámetros hidráulicos de los acuíferos sedimentarios del

litoral uruguayo, así como también los existentes de Entre Ríos.

Con esta caracterización se busca determinar las asimetrías hidrogeológicas existentes entre los dos márgenes del Río Uruguay.

Características hidráulicas del Acuífero Guichón

La información para caracterizar este acuífero proviene del área donde se encuentra semiconfinado a libre, debido a que los datos hidráulicos en el resto de la Cuenca Litoral son escasos por ubicarse por debajo del Acuífero Mercedes y solo pudo determinarse caudal específico. Los valores pueden ser un poco mayores a 1 $m^3/h/m$, pero el promedio se sitúa en 0,45 $m^3/h/m$.

Características de las perforaciones

La profundidad en este caso, depende de diferentes variables, entre ellas; el nivel estático, la cota del sitio, características propias del acuífero y las necesidades de caudal en el momento de realizar la obra. Las profundidades más habituales están en el entorno de los 30 a 60m, pudiendo alcanzar 85m, observado en la perforación 431002 de OSE en Piedras Coloradas, departamento de Paysandú.

Tomando en cuenta los caudales explotados, se observa que el comportamiento habitual es la predominancia de valores bajos. Los caudales promedio más habituales para el acuífero son del orden de 4 m^3/h, pudiendo llegar hasta más de 15 m^3/h, en algunos casos aislados.

Para acuíferos sedimentarios relativamente uniformes se puede esperar que aumentando la profundidad de la perforación también el caudal aumente, sin embargo este comportamiento no se observa aquí. La ausencia de una tendencia implica que el acuífero no sería isótropo y existen variaciones que afectan el rendimiento.

Características hidráulicas del Acuífero Mercedes

El Acuífero Mercedes presenta un comportamiento hidrogeológico variable debido a los cambios litológicos y la cobertura de depósitos sedimentarios post-cretácicos. En términos generales aparece confinado a semiconfinado en la mayor parte del área de estudio. Solo existen ciertas zonas en el borde de la Cuenca Litoral donde aparece el Acuífero Mercedes libre. Por ejemplo al sur de la localidad de Guichón, en las cercanías del Arroyo Grande al norte de la ruta 20 hacia Grecco y en ruta 2 en el tramo comprendido entre las localidades de Cardona y Palmitas.

También puede aparecer en un mismo sector confinado por varios metros de la Formación Fray Bentos generalmente en el tope de las colinas y semiconfinado a libre en zonas bajas (ver figura2).

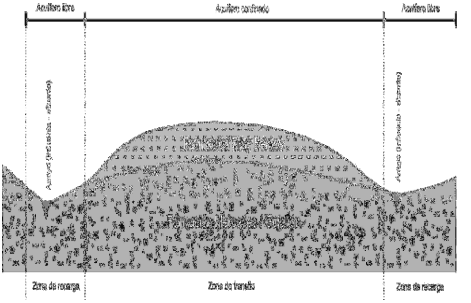


Figura 3. Perfil esquemático de la geomorfología de la Cuenca Litoral.

El caudal específico obtenido en en el área sur del Río Negro es en torno a 0,6$m^3/h/m$, siendo el máximo relevado de 3,8$m^3/h/m$ y el mínimo 0,05$m^3/h/m$. Hacia el Norte se observa un aumento en el caudal específico, con un promedio de 1,03$m^3/h/m$, valor máximo de 6,5$m^3/h/m$ y mínimo de 0,05$m^3/h/m$. La Transmisividad tiene un valor medio de 36 m^2/día, con extremos de 0,667 a 189 m^2/día.

Los Coeficientes de Almacenamiento calculados son indicativos de un comportamiento confinado del acuífero, existiendo en casos aislados de semiconfinamiento.

Características de las perforaciones

En general, las profundidades características de perforaciones que sólo extraen agua del acuífero Mercedes están entre los 30 y 60m, al igual que lo observado en el Acuífero Guichón. Han sido identificados hasta 115m de Mercedes en la perforación 511003 de OSE en la ciudad de Young.

Los caudales característicos oscilan alrededor de 6,5 m^3/h, pudiendo llegar incluso hasta 50 m^3/h. Esta variación esta directamente ligada a la litología; por ejemplo los mayores caudales están asociados a niveles de areniscas gruesas.

Si se tiene en cuenta la profundidad en función del caudal el comportamiento es similar al Acuífero Guichón. No aparece una tendencia clara debido a que las condiciones del acuífero

son muy variables dependiendo del sitio donde se halle el sondeo.

Acuíferos en la Provincia de Entre Ríos

Sobre los basaltos de la Formación Serra Geral en el área de estudio, se apoyan formaciones sedimentarias de edad Cretácica como Puerto Yeruá, Saldán y Mariano Boedo, que son relevantes ya que se trata de depósitos correlacionables en la Cuenca Litoral uruguaya.

Sin embargo y de posterior sedimentación, aparece la Formación Fray Bentos, arcillitas Miocenas de la Formación Paraná, seguidas de las formaciones Ituzaingó (arenas del Plio-pleistoceno) y Hernandarias (arenas y limo-arcillosos del Pleistoceno). La Formación Ituzaingó aloja un acuífero semiconfinado (Montaño et al., 2011), el principal de la región. Esta unidad es muy productiva, con caudales del orden de 100 a 500 m^3/h y Transmisividad de 2500 m^2/d. La Formación Hernandarias contiene un acuífero freático muy pobre y de aprovechamiento limitado, comportándose fundamentalmente como techo del acuífero anterior.

Otro importante acuífero en la región es la Formación Salto Chico de edad Plio-Pleistoceno, compuesta por depósitos fluviales de diferente granulometría y con capacidad acuífera muy importante, llegando a erogar según Santi et al (2007) hasta 100 a 600 m^3/h, con caudales característicos de 17 a 108 m^2/h, coeficiente de Permeabilidad medio de 30 a 60 m/d y Transmisividad de hasta 1500 m^2/d.

En cuanto a las características hidrogeológicas de las formaciones cretácicas, no se dispone de mayores datos al respecto debido a lo expuesto anteriormente. La existencia de acuíferos menos profundos y muy productivos, como Ituzaingó y Salto Chico hacen innecesaria la explotación de otros.

Asimetrías Hidrogeológicas

Tal como ya fuese expuesto, la hidrogeología en ambas márgenes cambia significativamente, lo que repercute en la producción y sobre todo en el ámbito de la agricultura. En Argentina existen acuíferos de edad cuaternarios/terciarios con alta capacidad acuífera que permiten el desarrollo agrícola en base a riego. Un ejemplo son los cultivos de arroz regados con agua subterránea . La combinación de este recurso con suelos de alta productividad genera una de las zonas productoras de granos más importante de Latinoamérica y el mundo. En contrapartida, en la Cuenca Litoral uruguaya si bien existen suelos de buena productividad, los acuíferos cretácicos que son aquí los más importantes, no lograrían los volúmenes económicamente viables por hectárea necesarios para regar grandes extensiones.

La respuesta a esta disparidad hidrogeológica en una misma región es que existen discontinuidades tectónicas en principio a lo largo del Río Uruguay que han ejercido una evolución dispar en la sedimentación y por lo tanto en los sistemas acuíferos. Debe señalarse que la caracterización y estudio de estas discontinuidades exceden el alcance de este trabajo, quedando pendiente para los avances en el Proyecto conjunto.

Conclusiones

Las asimetrías hidrogeológicas entre ambos países son notorias y repercuten directamente en los emprendimientos productivos y desarrollo socioeconómico. Un ejemplo es el uso del riego de arroz en Argentina. Los caudales de las formaciones Ituzaingó y Salto Chico pueden llegar hasta 500 m^3/h, mientras que en la Cuenca Litoral el riego en grandes extensiones hasta el momento no es económicamente sustentable con caudales máximos en el entorno de los 60 o 70 m^3/h.

Las divergencias hidrogeológicas corresponderían a discontinuidades tectónicas a lo largo del río generando, por lo menos en un lapso, evolución diferente en ambas márgenes.

Con respecto a la comparación directa de los acuíferos cretácicos en ambos ámbitos, sólo se pudo determinar por datos de perforaciones que los espesores son mayores en el sector argentino. La Formación Mariano Boedo tiene un espesor aproximado 5 veces superior a la Formación Mercedes, mientras que la Puerto Yeruá es 1,5 veces la potencia de la Formación Guichón. La escasez de datos hidrogeológicos de formaciones cretácicas en Entre Ríos obedece a la existencia de acuíferos cenozoicos de alto rendimiento (formaciones Ituzaingó y Salto Chico) que no justifican el alcance de las más profundas.

El Acuífero Mercedes se comporta generalmente como confinado y en ocasiones semiconfinado. Incluso en sitios donde aflora, la presencia en el perfil de niveles impermeables silicificados y pelíticos genera el confinamiento de las capas de aporte.

Respecto a los parámetros hidrogeológicos de la Formación Mercedes, el Almacenamiento varía desde $5{,}0^{-7}$ a $1{,}0^{-3}$ y la Transmisividad se sitúa en torno a 1-190 m^3/día. Este amplio rango corresponde a la variabilidad litológica y los diferentes grados de confinamiento. Las profundidades más frecuentes de los sondeos

ronda en los 47m, con caudales de alrededor de 6,5 m^3/h, con extremos de 40 m^3/h.

El caudal especifico medio es generalmente de 0,94 m^3/h/m, pudiendo alcanzar hasta 6m^3/h/m.

Para la Formación Guichón se pudo constatar que las perforaciones realizadas poseen una profundidad promedio de 43m, con pozos de hasta 85m. El caudal más representativo es algo inferior a 4 m^3/h, pero se relevaron perforaciones con valores superiores a 15 m^3/h.

Por otra parte, para el Acuífero Guichón se registró un caudal específico medio próximo a 0,45m3/h/m, pudiendo superarse los 1m^3/h/m.

No se pudo determinar una relación que vincule el aumento del caudal con la profundidad de las perforaciones en los acuíferos Mercedes y Guichón, debido a la heterogeneidad del medio.

Los depósitos sedimentarios que generan los acuíferos tratados, dan lugar a suelos de alta productividad creando un marco productivo único en el que se hace necesario generar políticas de manejo y protección. En este sentido es imprescindible un correcto ordenamiento territorial para mantener el potencial productivo en el tiempo y comenzar a generar una legislación protectiva de los acuíferos.

Referencias

Barredo S. y Stinco L. 2010. Geodinámica de las cuencas sedimentarias. En: *Petrotecnia. Instituto argentino de petróleo y gas*. 60-62. Buenos Aires.

Bossi J. 1966. Geología del Uruguay. Colección Ciencias Nº2. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República. Montevideo. Uruguay. 237-265 p.

Chebli G.; Mozetic M.; Rossello E.; Buhler M. 2000. Cuencas sedimentarias de la llanura Chacopampeana. En: *Caminos R. (ed). Geología Argentina*. 627-643 p. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires.

Fernández Garrasino C.; Laffitte G.; Villar H. 2005. Cuenca Chacoparanaense. *VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*. Simposio Frontera Exploratoria de la Argentina: 97-114.

Ford, I. & Gancio, F. 1989. Carta Geológica del Uruguay, escala: 1/100.000. *Hoja O-21 Bizcocho*. Facultad de Agronomía, Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo.

Goso C. 1999. Análise estratigráfico do grupo Paysandú (Cretácico) na bacia do litoral, Uruguay. Tese Doutorado, Campus de Rio Claro, Instituto de Geociencias e Ciencias Exatas, Universidade Estadual Paulista. 29-170.

Montaño, J. , Hernández, M. A., González, N. Hernández, L., Montaño Gutiérrez, M., Trovatto, M.M. y Alvarez, M. P. 2011. Asimetrías hidrogeológicas en los sistemas acuíferos de la cuenca inferior del río Uruguay (Argentina-Uruguay). VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Hidrogeología Regional y Exploración Hidrogeológica.Salta.

Oyhantcabal P.; De Souza S.; Muzzio R. 1993. Geología y aspectos estructurales del borde orogénico en el extremo Sur del Cinturón Don Feliciano. *1er. Simposio Internacional NeoProterozoico-Cámbrico de la Cuenca del Plata; Resúmenes Extensos, 1: 22*. La Paloma - Minas, Uruguay.

Santa Cruz, J. y Silva Busso, A. 1999. Escenario hidrogeológico general de los principales acuíferos de la llanura pampeana y mesopotamia meridional Argentina. *Hidrología Subterránea*. Serie de correlación geológica Nº13: 461-471.

Tófalo O. & Pazos P. 2002. Caracterización de las calcretas de la Formación Puerto Yeruá (Cretácico), en base a su micromorfología (Entre Ríos Argentina). Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA. Revista Asociación Argentina de Sedimentología, Vol 9 nº 2: 127-134.

GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Régimen de dominio de las aguas subterráneas y consecuencias para su gestión, protección, tutela y aprovechamiento

Leonardo F. Pastorino, María de las Nieves Cenicacelaya y Alfredo G. Diloreto

Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales (UNLP), calle 48 e/6 y 7 (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Mail de contacto: pastorinoleonardo@yahoo.com.ar

RESUMEN

En esta ponencia se desarrolla el régimen de dominio de las aguas subterráneas que se define en el Código Civil y que tiene implicancias en otros aspectos vinculados a la gestión, protección y aprovechamiento del recurso. Se plantean distintas cuestiones interpretativas en torno a estas disposiciones y, a continuación, se presenta como algunas provincias trataron de zanjar los problemas trazados por la reforma del Código Civil en 1968 que considera a las aguas subterráneas de dominio público de los estados provinciales, aunque reconoce un derecho al "uso regular", en la medida de "su interés" y "conforme a la reglamentación" de los superficiarios.

Palabras clave: aguas subterráneas - códigos de aguas - Código Civil – constitucionalidad

ABSTRACT

This paper describes the underground water domain regime defined in the Civil Code and that has implications in other aspects related to the management, protection and use of that resource. Several interpretation issues are discussed around those provisions and, next, the way in which some provinces have tried to solve the problems set by the Civil Code reform in 1968, which consideres underground water as being of public domain of provincial states, although it recognizes a right to `regular use´, according to `íts interest´ and `according to regulations´ of landowners.

Keywords: underground water – water law - Civil Code – constitutional review

Introducción

El agua es un elemento particularísimo y de características naturales únicas, a la vez que es esencial para la vida del hombre y de toda la naturaleza y también para el desarrollo de las distintas actividades productivas. Al derecho corresponde regularla ya que cada vez son más y más complejos los conflictos que se generan por su uso, su cada vez más notoria escasez y la contaminación, entre tantos aspectos.

Pero sin lugar a dudas, el primer aspecto al que debe abocarse la regulación del agua es el de la determinación de su régimen dominial. Se trata del primer aspecto en el tiempo, debido a que siempre los conflictos por los recursos se determinaron regulando su distribución y su sistema apropiativo. Pero es también una cuestión principal ya que directamente del régimen dominial se derivan muchas otras decisiones sobre la disposición y uso y sobre la tutela.

El régimen dominial de las aguas en el Código Civil

El Código Civil de 1869, que entrara en vigencia en 1871, decidió sobre el dominio de las aguas, al tratar de las cosas. Dicho régimen fue afectado por la reforma de dicho Código de 1968, operada por la ley 17.711. El Código resolvió un sistema acorde con la filosofía reinante en la época y que había sido consagrada en la Constitución Nacional, de favorecer la privatización de las tierras y tutelar en forma amplia la propiedad privada. Así las cosas, resolvió que muchas de las aguas formaban parte del dominio del propietario fundiario.

Ello no obstante, ya a la época de la sanción del Código, algunos "cuerpos" de agua eran visualizados como entes propios y estratégicos y concitaron la declaración de un dominio público sobre los mismos.

La reforma de 1968 materializó la preocupación de ciertas observaciones críticas de la doctrina y antecedentes reformistas, orientadas más a los usos de tipo consuntivo, sobre los que el reconocimiento de un derecho de propiedad bastante extendido sobre las aguas ponía serios límites. Fundamentalmente avanzó sobre las aguas subterráneas, objeto de este Congreso y de esta ponencia, y sobre "toda agua susceptible de satisfacer un interés general" que se declararon públicas, abriendo una extensa y aún irresuelta discusión sobre la constitucionalidad de dicha reforma.

Sin poder tratar cada uno de los temas que la doctrina ha descripto y sobre los que se generaron innumerables discusiones, para lo cual remitimos a las obras clásicas del derecho de aguas, sintetizamos el cuadro respecto al régimen dominical dado por el Código Civil vigente de la forma que sigue:

* Aguas de dominio público de los estados (federal o provinciales según el lugar en que las mismas se encuentren, art. 2339 C.C.), pudiendo permitir éstos su uso y explotación a los particulares a través de permisos o concesiones. En esta categoría se encuentran, de acuerdo al art. 2340:

- el mar territorial;
- los mares interiores;
- los ríos (además de sus cauces);
- las aguas que corren por cauces naturales;
- las aguas subterráneas (aunque el mismo artículo reserva el derecho, sometido a un *ejercicio regular*, del propietario del fundo superficiario de extraer las aguas subterráneas en *la medida de su interés* y con sujeción a la *reglamentación*);
- las aguas susceptibles de satisfacer un interés general;
- los lagos navegables.

* En tanto son privadas (de los particulares o de los estados, si se tratara de inmuebles no afectados al dominio público):

- las lluvias que caen en terrenos privados (art. 2635 C.C.);
- las aguas de vertientes que nacen y mueren dentro de una misma heredad (art. 2350 C.C.);
- las aguas que surgen en terrenos particulares mientras no constituyan un curso de agua por cauce natural (art. 2637) y
- los lagos no navegables (art. 2349 C.C.), aunque para algunos autores y ante la indefinición del mismo código, podría interpretarse que éstos tampoco pertenecen al propietario del fundo en el que se encuentren ya que el artículo sólo les otorga el uso y goce de los mismos.

* Finalmente existiría un régimen particular en el art. 2636 que establece que "todos pueden reunir las aguas pluviales que caigan en lugares públicos, o que corran por lugares públicos, aunque sea desviando su curso natural, sin que los vecinos puedan alegar ningún derecho adquirido", lo que podría interpretarse como una liberalidad por parte del soberano.

A pesar que la colocación de este régimen dominical en el Código Civil ha sido más o menos aceptada, no dejó de plantear dudas que se vienen a reinstalar ahora con la definición dada por la reforma de la Constitución Nacional disponiendo que los recursos naturales son del dominio originario de las provincias (art. 124).

Al quedar el cuadro enunciado por el Código Civil como un catálogo de aguas que integran el dominio público, forma de presentación motivada por la excepcionalidad de dicho dominio y por la necesidad de que sea una ley la que afecte las cosas al mismo, el capítulo quedó redactado como propio del derecho público o administrativo, incluido en un Código de naturaleza privada o civil. Según López (1987), la tesis que avala dicha decisión del redactor del Código Civil si bien mayoritaria, fue contestada por Carlos Silveyra y Guillermo Cano, entendiendo que calificar a los bienes como públicos o privados es una facultad privativa del poder público provincial que nunca fue delegada por las provincias en la Constitución y que se refiere directamente a una determinación esencial como ser la composición de su patrimonio público. En tanto que, el principal argumento que se ha sostenido para justificar la inclusión en el Código Civil que debe regular a las personas y bienes privados, es que no se podía, y menos en tiempo fundacionales, regular el dominio privado sin antes delimitarlo, es decir, sin antes decidir que bienes no lo integrarían. Ello en virtud de la regla que todos los bienes que no integran el dominio público, son privados, consagrada por el Código Civil en el art. 2347.

Como se dijera apenas antes, ahora que la Constitución Nacional determina el dominio originario sobre los recursos naturales en las provincias, se suma un argumento más a favor de la tesis minoritaria, puesto que deberían poder las provincias determinar el modo de disponer y proteger sus recursos decidiendo sobre un aspecto tan central del mismo. Ello no obsta, sin embargo, al argumento esgrimido por la tesis mayoritaria, ya que el dictado del Código Civil ha sido consentido al Congreso Nacional

por la Constitución Nacional originaria. Claro que nunca se determinó el contenido que debería tener y que resulta el tema más propio del derecho público, pero también se debe decir que si la explicación dada por la tesis mayoritaria fue aceptada, estimo yo también por un criterio organizacional, no habría un argumento definitivo que pudiera sostener que aún con una declaración expresa sobre el dominio de los recursos naturales, al Congreso no se le pueda haber delegado la función de clasificar los bienes de acuerdo a su titularidad dominial, como ha hecho el Código Civil; cuestión que, seguramente, traerá más de una interpretación judicial en el futuro más o menos cercano.

Aguas subterráneas y otras aguas de interés general

Sin lugar a dudas, los temas más conflictivos con relación a las aguas son los dos introducidos con la reforma de la ley 17.711, el de las aguas subterráneas y el de "toda agua que tenga o adquiera la aptitud de satisfacer usos de interés general".

Las aguas subterráneas antes de la reforma indicada, por la falta de una mención expresa, podían quedar comprendidas dentro de la propiedad del superficiario en virtud de la disposición del art. 2518 aún no derogado y que en su primer parte dispone "la propiedad del suelo se extiende a toda su profundidad, y al espacio aéreo sobre el suelo en líneas perpendiculares. Comprende todos los objetos que se encuentran bajo el suelo, como los tesoros y las minas, salvo las modificaciones dispuestas por las leyes especiales sobre ambos objetos". En línea acorde, el art. 2637 todavía reconoce de propiedad del superficiario a las aguas que "surgen" o "broten", según la versión actual o anterior a la reforma de la ley 17.711.

La disputa por las aguas subterráneas y los avances de los conocimientos científicos habrían motivado, sin embargo, otras interpretaciones. Así, López (1987) indica algunos autores que, ya antes de la reforma, las consideraban públicas por aplicación del inciso 3º -inciso donde casualmente se las incorpora luego- siempre que corrieran por cauces naturales "subterráneos". Pero el mismo López recuerda también la postura de otros autores y de la Corte Suprema que, en "Provincia de Mendoza contra Compañía de Ferrocarriles Gran Oeste Argentino y Buenos Aires al Pacífico" (JA T. XII, p. 648) seguían sosteniendo la propiedad del superficiario.

El texto actual las convierte en públicas lo que, si se sostiene que antes eran privadas, puede interpretarse como una expropiación sin indemnización y, por lo tanto contraria al texto del art. 17 de la Constitución. Máxime en base a la idea que entiende a las aguas subterráneas como dentro de la categoría de las aguas que tienen o pueden adquirir aptitud de satisfacer necesidades generales implicando una declaración en abstracto que viola el "principio de justicia por compensación" que crea la inviolabilidad de la propiedad garantizada en el art. 17 C.N.

Para evitar ese tipo de reclamo, la misma reforma adoptó en el texto ciertos recaudos, los que, a mi juicio son insuficientes. Dejó a salvo "el ejercicio regular del derecho del propietario del fundo de extraer las aguas subterráneas en la medida de su interés y con sujeción a la reglamentación". Qué se entiende por "ejercicio regular", por "la medida de su interés", cuál es el alcance de la reglamentación y si ésta puede poner un costo al uso del agua, constituyen algunas discusiones que la misma reforma abrió en la doctrina. También, ciertas interpretaciones, a mi juicio no del todo acordes con los restantes alcances del ejercicio del derecho de propiedad que, vale la pena recordar, según el Código Civil es exclusivo, perpetuo y absoluto con sólo las limitaciones que surgen del Código y del ejercicio del Poder de Policía que, obviamente, no puede excluir el dominio mismo.

Se distinguió, por ejemplo, diciendo que el superficiario no puede considerarse expropiado si al tiempo de la reforma no explotaba o extraía el recurso subterráneo, relacionando esto con la teoría de los derechos adquiridos. Creo que esta postura olvida la disposición del art. 2510 que dispone que "el dominio es perpetuo, y subsiste independientemente del ejercicio que se pueda hacer de él. El propietario no deja de serlo, aunque no ejerza ningún acto de propiedad, aunque esté en la imposibilidad de hacerlo, y aunque un tercero ejerza con su voluntad o contra ella, a no ser que deje poseer la cosa por otro, durante el tiempo requerido para que ésta pueda adquirir la propiedad por la prescripción".

Más inviable resultaría el argumento de Moisset de Espanés (López, 1987) que cree que las aguas subterráneas no alumbradas antes de la reforma, es decir, no aprovechadas, al no ser susceptibles de tener valor no eran directamente cosas por el art. 2312. Choca esta interpretación con el art. 2510 citado e introduce un argumento de una gravedad institucional superlativa si por analogía se aplicara a todas

las cosas adheridas a una propiedad que su dueño no utiliza (Pastorino, 2009).

Entonces, el camino posible para plantear la validez de la reforma o su carácter no expropiatorio es analizar si en el caso las aguas integran un cauce subterráneo e insistir con esa teoría que las encuadraba en el dominio público antes de la reforma en tal supuesto. Caso contrario, se tendrá que reconocer que cualquier afectación patrimonial que por aplicación del nuevo texto del inciso 3º del art. 2340 se le ocasione al superficiario, deberá conllevar su indemnización. Obviamente, la excepción está dada por el art. 2510 citado y es la de la usucapión (Pastorino, 2009).

Aún más grave es el caso de las aguas que tengan o adquieran la aptitud de satisfacer usos de interés general. Desde ya, si esas aguas eran antes de la reforma considerada privadas, no puede cambiárseles el régimen sin indemnización, pero mucho menos se puede dejar sometida esa consecuencia –el paso de ser privadas a ser públicas- a un hecho futuro indicado con el vocablo "adquieran" y a las necesidades variables de una sociedad en expansión. Acá comparto la opinión del querido maestro López que dice al respecto que se debe considerar esta incorporación de la ley 17.711 como una declaración genérica de utilidad pública, de las tantas que abundan en el derecho agrario, quedando la afectación librada a la discrecionalidad de las autoridades públicas que evaluarán el caso concreto, debiendo, llegado el caso, indemnizar al sujeto privado expropiado.

En conclusión antes esbozada por Pastorino (2009), si la intención del legislador de 1968 fue la de avanzar en un sistema que contemple a todas las aguas de dominio público debido al interés superior que las mismas tienen para nuestra sociedad y para los procesos ambientales, hubiera hecho un enorme favor a las generaciones actuales optando por otro sistema. Hubiera podido declarar todas las aguas, sin distinciones complejas y hasta absurdas, del dominio público pudiendo haber reconocido todos los derechos posibles respecto al uso a los superficiarios del momento y de por vida, declarando el bien intransmisible por actos entre vivos o por sucesión hereditaria. En ese caso sí, los sucesores no tendrían derecho, y se hubiera evitado una discusión que, luego de cuarenta años no sólo perdura sino que empieza recién a demostrar sus consecuencias, ya que es éste el tiempo en que se hace evidente la escasez del agua (Pastorino, 2009).

Digo dominio público porque era la hipótesis imperante en ese momento. En el presente, creo que se podría optar por soluciones, a mi juicio mejores, como la de considerar el agua un bien común de carácter inapropiable, garantizando simplemente los usos a partir de una adecuada reglamentación del Estado y con un sistema de decisión, y gestión ampliamente participativo, postura que hemos presentado en las audiencias públicas por la reforma al Código Civil (Pastorino, 2012).

La respuesta de las provincias a través de los Códigos de Aguas

Hemos planteado la importante relación entre la definición dominial con otros aspectos a regularse. Ello hace que, si bien ya el Código Civil dispuso que los bienes del dominio público eran provinciales o del Estado Federal, según donde se encuentren, y que ahora la Constitución Nacional determina que los recursos naturales son del dominio originario de las provincias, la clasificación de algunas aguas como de dominio privado y la solución que la reforma del Código Civil de 1968 dio a las aguas subterráneas, sigue influyendo directamente en las legislaciones provinciales.

Sobre aguas definidas como públicas, es claro que los poderes provinciales como titulares de dicho dominio público son muy superiores ya que claramente abarcan la disponibilidad y no sólo una regulación de policía de las actividades o usos que puedan hacer los privados sobre su dominio. También recordamos que en el caso de dominio público, el derecho al uso del recurso se deberá resolver a través de instituciones de derecho administrativo (público), fundamentalmente la concesión y los permisos que alcanzan en materia de aguas una particular fisonomía.

El problema con las aguas subterráneas y las dudas sobre su constitucionalidad acrecientan las dificultades para optar por un criterio de regulación a nivel provincial y atentan contra la eficacia de las normas definidas.

Así las cosas, puede evidenciarse una primitiva opción por regular a nivel provincial sólo las aguas públicas, entendiendo que sobre aquellas no existían dudas de los poderes provinciales y en sintonía con la ideología codicista de protección a la propiedad privada. Habiendo en el Código Civil ciertas restricciones, especialmente vinculadas con las cuestiones de vecindad, es decir privadas, y no de poder de policía, es decir en miras a intereses generales, la primer reacción fue la de

abstenerse de regular en función o en ejercicio del poder de policía sobre las aguas privadas. Más modernamente, se avanzó sobre esta posibilidad, es decir, buscando contemplar regulaciones completas del recurso, reconociendo la unicidad del mismo y manteniendo el Código Civil diferentes posibilidades en cuanto a la titularidad del dominio, el criterio fue el de regular las aguas públicas a partir de los poderes derivados de la dominialidad estatal y las privadas a través del poder de policía. Claro que, sin poder en estas breves páginas ahondar en esta cuestión de derecho administrativo, el poder de policía daría facultades de control respecto al uso, imponiendo conductas y obligaciones, pero quedaría controvertido que dicho poder llegue al punto de limitar o condicionar la disponibilidad de los bienes privados más allá de una razonable tolerabilidad que, bajo la forma de restricción, tenga alcance general, se disponga por ley y no termine por desvirtuar los derechos de disposición y aprovechamiento de la propiedad misma reduciendo considerablemente el beneficio económico que ella podría ofrecer o prestar. De esta diferenciación entre regulación en relación al dominio público o en relación al poder de policía surgirían consecuencias también concretas de otra índole, como ser la posibilidad o no de establecer un canon por el uso del recurso. En el caso de que las aguas sean públicas, el mismo estará aceptado, mientras que difícilmente pueda admitirse un canon a pagar por las aguas propias.

Como ejemplo de lo que venimos marcando, citamos al Código Rural para los Territorios Nacionales (ley 3088 de 1894) que inicialmente rigió en varias de las actuales provincias y dispuso sobre las aguas de ríos y arroyos (art. 214). En la primera ley de la provincia de San Juan, (ley 312 de 1928) se trataron las aguas superficiales, incluyéndose referencias a las aguas subterráneas más tarde, en el Código de Aguas (ley 4.426 de 1978 con modificatorias).

Por el otro lado, algunos códigos de aguas, como el de Jujuy (ley 161 de 1950), determinan que rigen el uso de las aguas públicas, pero que, además, dispone normas de policía para las aguas privadas. En igual sentido, el de Santiago del Estero (ley 4869 de 1980) regula las aguas públicas pero, también, “las restricciones” a las aguas privadas.

La Provincia de Mendoza, pionera en el derecho interno de aguas, intentó adaptarse a la reforma del Código Civil produciendo un cambio legislativo que derogó la decana ley general de aguas de 1884, reemplazándola en 1974 por la vigente ley 4035. Por la ley de 1884 se entendía que las aguas podían ser del titular del dominio superficiario o de quien pudiera alumbrarlas según que las aguas fueran extraídas por pozos ordinarios (en el primer caso) lo que hacía que las aguas se integraran a dicho dominio del fundo) o por pozos cartesianos. Se entreveía de esa forma otra interpretación, a mi modo de ver con poco sustento en la normativa del Código, de que las aguas subterráneas podrían ser cosas sin dueño o *res nullius*. Por la segunda ley citada se estableció que quien ya estaba usando el agua subterránea a la fecha de su entrada en vigencia, se transformaría en concesionario de pleno derecho, salvo que en un plazo de 90 días reclamase una indemnización, lo que haría perder el derecho de uso. Esta solución no habría generado ninguna contienda judicial, ni provocado que alguien pretendiese la indemnización en lugar del derecho a uso que varió de un derecho de índole propietaria a uno de índole concesional. Pero también es cierto que dicho régimen fue sólo aplicable a las perforaciones que se encontraban legalmente registradas y autorizadas por la autoridad competente, mientras que para los usos no registrados se estableció un plazo para solicitar la concesión con cargo de que de no hacerlo se debería cesar en el uso del recurso sin derecho a indemnización alguna.

En el caso de la Provincia de Córdoba, el Código de Aguas sancionado por decreto-ley 5589/73 distinguió aquellas aguas alumbradas que contaban con una sentencia judicial que las declaraba integrantes del dominio privado, las que no podrían concretar el traspaso decidido por el Código Civil al dominio público sin contar con la pertinente indemnización, de aquellas otras que no contaban con la sentencia citada. Para estas últimas, se consideraba que la reforma de la ley 17.711 había efectivizado la afectación en el entendimiento que antes de dicha ley tampoco eran claramente privadas, ante la falta de certeza jurídica.

De la lectura del Código cordobés surge una detallada casuística para lograr que aquellos derechos reconocidos anteriormente a la sanción de la ley 17.711 puedan transformarse al sistema común que reconoce la dominialidad pública del agua subterránea, generando un proceso voluntario por el cual los titulares de derechos preexistentes, aún con sentencia judicial que reconociera un dominio, puedan presentarse a solicitar ante la Autoridad la conversión de dicho derecho, con los alcances

que hubiera tenido, en una concesión administrativa.

Así, el Código de Aguas de Córdoba plantea la cuestión en sus disposiciones transitorias y finales. El art. 277 indica una regla general en el sentido que "los aprovechamientos anteriores a la vigencia de este código, legítimamente realizados conforme a la ley 3997, darán derecho a su titular a obtener concesión del mismo uso y jerarquía que la anterior, sin otro recaudo que la presentación de su título dentro de los ciento veinte días desde la fecha de vigencia de este código". El artículo siguiente indica que "los titulares de los aprovechamientos aludidos en el decreto 9782/70, sin otro recaudo, son titulares de la concesión otorgada por ese decreto".

Específicamente, el art. 279 plantea una "discrepancia sobre la naturaleza de las aguas" disponiendo que: "los que pretendan tener derecho al uso de aguas que podrían considerarse privadas antes de la sanción de la Ley Nacional 17.711 y que ahora, por aplicación de ese cuerpo legal, son públicas, deberán denunciar su aprovechamiento a la autoridad de aplicación dentro de los noventa días de la fecha en que este código entre en vigencia, indicando volumen o por ciento del caudal que utilizan, uso efectuado y superficie cultivada- si es para riego- en el mismo plazo. Podrán solicitar concesión para el uso que vienen efectuando, la que les será acordada sin otro recaudo que verificar la exactitud de la declaración".

En tanto, el art 280 reconoce derechos adquiridos: "cuando exista sentencia pasada en autoridad de cosa juzgada que declare privadas a aguas que conforme la ley 17.711 son públicas, su titular podrá en cualquier momento renunciar a su derecho y obtener concesión de uso de las aguas que aprovecha por título de derecho civil". Por el artículo siguiente "igual derecho que el del artículo anterior podrá ejercer el titular de aguas que son privadas, según el régimen vigente".

"Los titulares de aprovechamientos de hecho deberán solicitar concesión conforme a las normas del libro II, título II, capítulo. III de este código. Si esta solicitud es presentada dentro de los noventa días de la vigencia de este código, la concesión les será acordada siempre que exista caudal suficiente una vez abastecidas las concesiones aludidas en los arts. 277, 278 y 279 y el uso aludido en el art. 280 de este código" (art.282).

El art. 283 delegó en el Poder Ejecutivo la facultad de prorrogar los plazos indicados en los artículos 277, 279 y 282.

Siguiendo este mismo modelo, podemos citar el Código de Aguas de Santiago del Estero, el cual aprobado por ley 4869 de 1980, dispone en forma similar en los artículos 276 a 283, bajo el título de "Disposiciones transitorias y protección de situaciones consolidadas".

Otro caso, con redacción bastante más simple y enunciando solo el reconocimiento de "derechos adquiridos" es el de la Provincia de Neuquén, cuyo art. 60 declara respetar los derechos adquiridos sobre aguas subterráneas hasta la sanción del mismo y no hasta la modificación de la ley 17.711, algunos años anterior. El Código fue aprobado por ley 899 de 1975. En tanto, también en las disposiciones transitorias se delega al Poder Ejecutivo la conformación de un procedimiento, a dictarse en los seis meses siguientes a la sanción de la ley, para sanear y convertir los derechos preexistentes sobre aguas, en especial los del art.60 mencionado (arts. 197 a 199).

Resta finalmente decir, que aun admitiéndose la constitucionalidad de la reforma de 1968, lo cierto es que la misma, si bien califica el dominio de las aguas subterráneas como públicas, reconoce en el superficiario un derecho a su "uso regular". También esta terminología deja bastantes interrogantes. ¿Qué es regular? ¿Es conforme a las reglas o reglamentos, y por lo tanto la forma y cantidad queda determinada por dichas normativas?; ¿es sinónimo de uso racional, es decir de aquél que no lleva al agotamiento, y por lo tanto la reglamentación también puede limitar la cantidad en miras del aprovechamiento común y sostenible?; o ¿es conforme a los usos y costumbres tradicionales, por lo tanto se trata de equiparar la cantidad autorizada con aquella que se venía utilizando previo a la reforma o aquella que los nuevos superficiarios podrán demandar en un esquema de uso tradicional excluyendo emprendimientos nuevos y que dispongan del recurso por sobre la media normal?.

Aquí el Código de Santiago del Estero contempla algunas disposiciones que parecen enrolarse en esto último precepto. Al legislar sobre aguas subterráneas, impone el principio general de la necesidad de permiso o concesión administrativa para el alumbramiento del agua (art.160), la autoridad deberá otorgar un máximo de agua a extraer por mes o por año (art. 168), aunque por principio todas son eventuales y quedan sujetas a las posibilidades del acuífero (art. 161). Por ellas, la Administración fijará el costo del agua (art. 6). En cambio, por el art. 159 no se requiere de permiso o concesión cuando concurran los siguientes supuestos: a)

la perforación sea efectuada o mandada a efectuar por el propietario del terreno sin el auxilio de medios mecánicos; b) el agua se extraiga por baldes o recipientes movidos por fuerza humana o animal o molinos movidos por agua o viento; pero no por artefactos accionados por motores y c) el agua se destine a necesidades domésticas del propietario superficiario o del tenedor del predio. En tales casos deberá darse aviso a la autoridad de aplicación la que está autorizada para solicitar la información que establezca el reglamento y para realizar las investigaciones y estudios que estime pertinentes.

En la Provincia de Buenos Aires el Código se refiere, como objeto de regulación, a todo el recurso hídrico provincial (incluyendo, por primera vez, incluso, al Río de la Plata). Incluye a las aguas del dominio público y a las aguas privadas, dando indicaciones particulares en cada caso. Hace algunas referencias que confirman la adhesión al sistema dominical dispuesto por el Código Civil e incluso el título IX referido a limitaciones al domino parece haberse redactado complementando algunas restricciones impuestas en el Código Civil, de lo que da confirmación el decreto reglamentario (ver arts. 137 y 138 del decreto 3511/08). Concretamente, sobre aguas subterráneas dispone que su uso y aprovechamiento se rige por el Título III que refiere a las aguas y cauces públicos, con lo que parece no dejar blanco a dudas respecto a que las aguas subterráneas lo sean.

Aquí si determina un juego de derechos diferentes para los superficiarios, pero no en cuanto a la disponibilidad del agua o al derecho a su uso "regular". Todos pueden explorar aguas subterráneas en suelo propio, salvo una prohibición específica de la Autoridad del Agua (AdA, que a su vez puede aconsejar al Poder Ejecutivo la fijación de zonas de vedas), pero sí debe solicitarse autorización para la perforación. En cambio, en los terrenos de terceros sólo se puede explorar con autorización de la AdA.

El art. 86, dispone acerca del derecho reconocido por el inciso 3 del art. 2340, pero aparentemente en vía incidental, es decir, una vez que se otorga un derecho de exploración o explotación por terceros, ya que se reafirman todos los derechos de propiedad reconocidos por el Código Civil, pero con las restricciones que impone el Código de Aguas (vinculadas con la tolerancia de terceros explorando o explotando en su propio fundo) y se exige una citación para que haga valer los derechos al uso regular, en el domicilio real, si se conociere, en el constituido ante la AdA o, sino, por edictos (art. 86). Esta regulación parece, a pesar de su vaguedad, partir de la idea de que nadie tiene nada que reclamar hasta tanto alguien no comience a explorar o explotar en su propio fundo. Tal vez esa política se basa en que, en líneas generales, nunca se había reglamentado, cobrado o afectado en algún modo por la extracción del agua subterránea en el propio fundo. Sin embargo, el Código tampoco aclara nada de lo que pasaría en caso que una explotación autorizada pusiera en riesgo el caudal o de las aguas subterráneas para propietarios colindantes o que, aún más alejados, toman agua del mismo acuífero. Como en otros casos en los que, en la práctica, parece que la disposición del Código Civil no genera demasiadas controversias o inquietud, es de notar que este art. 86 no ha sido reglamentado por el decreto 3511/08).

Conclusiones

Hemos puesto en evidencia que la regulación del dominio de las aguas subterráneas es todavía una cuestión irresuelta. Se discute aún la potestad de ser regulada en el Código Civil; la constitucionalidad de la norma del art. 2340 inc. 3 que las contempla y se han esbozado muchas interpretaciones para justificar dicha constitucionalidad. A su vez, se ha mostrado como las provincias intentan perfeccionar el sistema del Código Civil a través de sus Códigos de Aguas, consolidando la opción por la calificación publicista aunque reconociendo que la cuestión no quedó zanjada con la reforma al Código Civil. Sobre esas respuestas provinciales, basadas fundamentalmente en la idea de reconocer derechos adquiridos previos y la consideración de que los mismos se obtuvieron al usar o extraer el agua, ya hemos puesto también nosotros nuestros interrogantes. Finalmente, la reforma del Código introdujo una cláusula compensatoria reconociendo los derechos al uso regular, cláusula también de ambigua interpretación y, por ende, de muy difícil implementación en los códigos o normas provinciales.

Así las cosas, queda esperar alguna definición con efecto expansivo a nivel de la Corte Suprema o un cambio legislativo para poder salir de este estado de incertidumbre. Mientras ello no ocurra, las respuestas provinciales pueden tener un grado de eficacia en tanto y en cuanto signifiquen en la práctica no afectar en forma considerable los derechos derivados de la propiedad evitando planteos

judiciales al respecto. Un margen de actuación de hecho existe. Son para analizar en profundidad, para quien busque un modelo a seguir, las aplicaciones concretas en Mendoza u otras provincias signadas por la escasez. En el caso de Buenos Aires y otras caracterizadas por la abundancia, parece aceptarse en beneficio del ambiente y de una gestión integral y apropiada del recurso toda reglamentación de policía, pero quedan dudas de lo que pueda ocurrir en caso de que se determinen cánones por extracción o se limite la misma en forma tal que se afecte el derecho de disposición y el correlato económico de todo derecho propietario. Llegado a ese punto, la doctrina ha ofrecido algunas interpretaciones que avalan una postura mayoritaria a favor de la convalidar el dominio público del Estado, pero, aún así, la palabra final estará en el Poder Judicial que seguramente se pronunciará considerando iguales cuestiones antes anunciadas, es decir, la intensidad de la afectación patrimonial a los superficiarios.

Referencias

Cano, G., 1979, *Recursos hídricos internacionales de la Argentina,* Víctor P. de Zavalía, Buenos Aires.

Cano, G., 1935, El derecho de aguas en el anteproyecto de Código Civil*, La Ley*, T.7, Secc. Doctrina, p. 43.

López, J., 1987, El derecho de aguas en la legislación federal*, Anales*, T. XXVI, Academia Nacional de Derecho y Ciencias Sociales de Córdoba, p. 23.

Pastorino, L., 2009, *Derecho agrario argentino*, Abeledo Perrot, Buenos Aires.

Pastorino, L., 2012, Ponencia presentada en la Audiencia Pública para la Reforma de los Códigos Civil y Comercial de la Nación, realizada el día 28 de agosto de 2012, disponible en http://ccycn.congreso. gob.ar/ ponencias/buenosaires/

Gestión del agua subterránea en el centro-este de La Pampa: una propuesta de actuación ante factores de incertidumbre hidrológica

Carlos Schulz [(1)], Eduardo Mariño[(1)], Pablo Dornes[(1)], Eduardo Castro[(1)(2)] y Cristina Dapeña[(3)]

[(1)] Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina, Avda Uruguay 151, 6300, Santa Rosa, La Pampa. TE. (+54)(2954) 425166
[(2)] Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina. Coronel Gil 353, 6300, Santa Rosa, La Pampa.
[(3)] Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS, CONICET-UBA), Argentina. Pabellón INGEIS - Ciudad Universitaria - Ciudad Autónoma de Buenos Aires – Argentina. T.E.: (+54) (11) 4783-3021/2/3

Mail de contacto: cjschulz@exactas.unlpam.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo pretende introducir una discusión de una compleja situación hidrológica de la región Centro-Este de La Pampa, donde las peculiares características hidrológicas del ámbito subhúmedo-seco siempre han trasladado una situación al campo social y económico que hay que solucionar. Ante esta situación, las aguas subterráneas juegan un papel sumamente importante en estas condiciones de incertidumbre y se establecen como un recurso importante moderador en la planificación en un área de extrema fragilidad hidrológica. Por eso se pretende que, a partir del conocimiento hidrogeológico se pueda comprender y corregir la actividad socio económico de la región. Como resultado se demuestra que es posible obtener elementos de gestión en un área de extrema variabilidad hidrológica, con un factor importante de incertidumbre, a partir del conocimiento y trasladar los mismos a la actividad socio económico de la región y a su vez que sirvan como soporte para la toma de decisiones.
Palabras clave: La Pampa, Gestión, Agua Subterránea

ABSTRACT

This paper aims to introduce an analysis of a complex hydrological situation of the Central-East of La Pampa, where the peculiar hydrological characteristics of field-dry subsumed always been perceived as a serious problem that is transferred to the social and economic fields to be solve. In this situation, groundwater plays a major role in these conditions of uncertainty and constitutes a regulatory element of planning in an area of extreme fragility hydrological from knowledge, and moves them to the socio economic development of the region. As a result it is shown that it is possible to obtain management elements in an area of extreme hydrological variability, with a factor of uncertainty based on knowledge and move them to the socio economic development of the region and in turn serve as support for decision.
Keywords: La Pampa, Management, Groundwater

Introducción

Cuando se hace referencia a regiones, semiáridas y Subhúmedas del planeta se está denominando, indudablemente, áreas que carecen del agua en cantidades suficientes como para satisfacer sus variadas necesidades. Sin embargo, estas áreas poseen características ecosistémicas que las diferencian nítidamente de otras. Así, por ejemplo, es posible destacar en ellas el tipo de vegetación que sustentan, la fragilidad manifiesta de los ecosistemas inmersos, la presencia de poblaciones humanas que viven con escasos recursos de agua y la escasa importancia económica que se les asigna, salvo que dichas áreas contengan recursos naturales valiosos no renovables (oro, cobre, plata, petróleo, etc.), o sean zonas destinadas al turismo o a actividades de otra índole, como las militares o la experimentación científica. De igual forma, estas áreas se caracterizan por la presencia importante de procesos de desertización, todo lo cual hace más drásticas las condiciones de vida de las poblaciones que las habitan. Problema que se ve agravado

cuando la poca agua disponible se ve restringida por el contenido de elementos minerales en exceso que la torna no apta para determinados usos.

En el marco descrito, el elemento diferenciador de estas zonas, lo constituye la carencia de recursos hídricos, los cuales son aportados de forma irregular, en cantidades bajas o muy bajas, y con importantes grados de torrencialidad, con lo que se configura un cuadro difícil de predecir. Asimismo, las poblaciones ligadas a estos territorios y los consiguientes usos que hacen del agua, provocan una demanda social de regulación de este recurso, lo que hace que en innumerables ocasiones se den fuertes conflictos entre personas, comunidades y países, dada la importancia estratégica del agua para el crecimiento económico de estas regiones.

Lo anterior configura un contexto en donde se aprecia, por una parte, una alta demanda de recursos hídricos, y por la otra, una escasa oferta natural. Las situaciones descritas generan irremediablemente, más temprano o más tarde, conflictos de todo tipo, a los que se debe responder con esquemas de solución. Para ello, se requiere una cultura que supere tales enfrentamientos, definida por la reflexión y la acción, generadoras ambas de una adecuada tecnología social (Pizarro Tapia 1999).

Por otra parte según Auge (2004), hay un componente biológico natural que tiende a mantenerse en equilibrio con el ambiente y el resto de los recursos naturales (agua, suelo, aire). Pero el instalado artificialmente (cultivos, plantaciones) y las practicas y actividades desarrolladas por el hombre arado, riego, drenaje, fertilización, fumigación, construcciones urbanas, viales, e hidráulicas y otras como basurales, industrias, efluentes, etc.) son las que generan las mayores alteraciones en el comportamiento del Recurso Hídrico subterráneo. En este sentido, los parámetros más afectados son la reserva, la productividad y la calidad.

Dentro de este contexto se ubica la región noreste de La Pampa donde ante un cambio mínimo en el régimen pluviométrico implica periodos de sequia o inundaciones, con un efecto sumamente importante en las economías regionales que descansan en las aguas subterráneas como elemento amortiguante para cualquiera de los usos. Por supuesto que ante determinadas situaciones el conocimiento de la hidrología en un área de llanura, el factor de incertidumbre hídrica, las implicancias sociales que esto conlleva y las decisiones que se tomen en la gestión tienen un camino en común: el uso sustentable de un recurso que, escaso, es el único que mantiene la vida y la producción en el área.

El área de estudio seleccionada se ubica en el NE de La Pampa, delimitada por el meridiano de 64º00' al Oeste y el límite con la provincia de Buenos Aires y los paralelos de 35º00' al Norte y 36º50' al Sur. La zona tiene una longitud norte-sur de aproximadamente 100 km, y un ancho medio de 40 km, lo que hace una superficie de unos 4000 km^2 (Fig. 1).

Geomorfológicamente corresponde a la subregión "Planicies Medanosas" o a la unidad "llanura pampeana de modelado eólico superimpuesto y desde el punto de vista fisiográfico y en sentido regional, puede

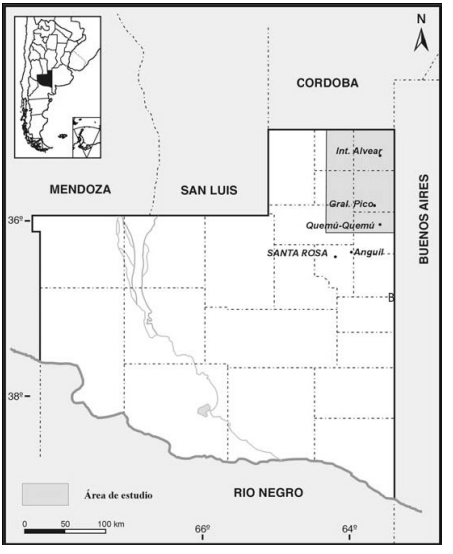


Figura 1. Ubicación del área de estudio

considerarse como una extensa llanura con suave pendiente hacia el Este, con un gradiente del orden de 0,4 m/km (Cano et al., 1980). Sobreimpresas a este relieve muy uniforme se destacan, a lo largo del sector central de la región y con un rumbo aproximado NNW-SSE, geoformas medanosas elongadas o médanos aislados que hacia el Sur del área se enmascaran con otra alineación de rumbo transversal. Las geoformas mayores de rumbo NNW-SSE, se presentan como "dorsales" positivas y uniformes de importante extensión longitudinal, que limitan por el Oeste con amplias depresiones subparalelas y de carácter endorreico, en tanto que hacia el Este engranan suavemente con el ambiente de llanura. En

algunos sectores se presenta una alternancia de franjas con relieve positivo y negativo, en tanto que en otros se trata de elevaciones aisladas entre las cuales se disponen pequeños bajos ocupados por lagunas, ocasionalmente según la situación hidrológica imperante.

Es importante recalcar la importancia que tienen los datos historicos para el estudio de las aguas subterráneas y su posterior gestiòn. Los mismos datan desde el año 1970 principalmente por la necesidad de obtención de agua potable para los pobladores de la región. Desde el punto de vista del aprovechamiento sustentable del recurso también se estudian los mecanismos de recarga del sistema acuífero. Actualmente, las aguas subterráneas son el único recurso de abastecimiento de agua de toda esta área bajo estudio.

La situación hidrológica en el área es controvertida. Por un lado existe una necesidad de localizar nuevas fuentes de agua potable de buena calidad para abastecer la población habitante de la región y los usos productivos, así como conocer el volumen de explotación correcto a fin de no agotar o dañar el recurso. Por otro, se presentan periódicamente eventos extremos como sequías o inundaciones donde los déficits o excesos hídricos ocasionan daños de distinta índole, sumados a grandes pérdidas económicas. Para estos casos puntuales se han realizado estudios para mitigar esas situaciones, evaluar los impactos ambientales y lograr un manejo integrado de la cuenca.

El agua de lluvia, la subterránea y la superficial son parte del mismo ciclo hidrológico, por lo tanto, se considera de suma importancia obtener un modelo de funcionamiento de la dinámica del agua superficial y subterránea y la interacción entre ambas a fin de lograr un uso sustentable del recurso hídrico de la región. La caracterización ambiental que incluye el uso que el hombre ha realizado históricamente y actualmente de estos ambientes, complementará y permitirá inferir sobre diferentes situaciones en el mismo modelo (Moscardi, 2010).

Estos factores dividen a la Provincia en tres regiones hídricas con gran contrastes entre ellas, subhumeda-seca con una deficiencia de -20 mm anuales ubicada al este, una región semiárida que se encuentra entre los -20 y -40 mm de deficiencia anual en el centro de la Provincia y una región seca por debajo de los -40 mm (Cano et al., 1980). Es a partir de estas regiones que se podemos analizar a la hidrogeología de La Pampa como tres grandes áreas. Por supuesto que la de mejor producción, ya sea desde el punto de vista de la calidad como de la cantidad, se encuentra en el Centro-Este de la provincia, con algunas áreas de significativa importancia. A esta zona la podemos ubicar en el límite Sur-Oeste de la llanura Pampeana donde la hidrodinámica del agua subterránea tiene particularidades hidrológicas particulares. Es por todo esto que se impone en estos casos el concepto de región hídrica como manejo integral en la planificación y gestión de los Recursos Hídricos y no de acuífero como expresión hidrogeológica.

Es a partir de lo mencionado anteriormente que se puede puntualizar que, como en toda el área de la llanura pampeana, no se encuentra una división de las aguas definida con claridad, lo que complica aún más el establecimiento de un orden hidráulico. Las divisorias, en mucho de los casos, son dinámicas y depende de la distribución espacial, magnitud y duración de los eventos de las lluvias.

Las pendientes oscilan entre 1/1000 a 1/10000. Las geoformas suaves, la incertidumbre en la recarga y el variación, en los últimos 30 años en los regímenes de lluvia, presentan un fragilidad importante en las disponibilidades hídricas. Por un lado en años húmedos, la precipitación excede la evapotranspiraración y como estos excesos no pueden ser drenados por el flujo subsuperficial, el nivel freático se eleva hacia la superficie del terreno donde escurren hacia los bajos que, cuando se llenan, producen escurrimientos superficiales o inundaciones, el rápido cambio en la cultura de los consumos del agua, el cambio en los sistemas productivos, etc. con una consecuencia ambiental importante. Por otro lado, una merma en las precipitaciones se traduce rápidamente en un descenso de los niveles freáticos, la desaparición de las lagunas, el incremento en los consumos de agua y una resistencia de los sistemas socioeconómicos a volver a este tipo de condiciones hidrológicas propias de la región.

Se puede decir entonces que muchos conceptos de la hidrología clásica, por sí mismo no pueden explicar por ahora la hidrodinámica del agua subterránea en esta zona. Esto nos crea un problema aún mayor y nos obliga a un conocimiento regional aún más acabado. Es aquí donde cobra dimensión en la zona de llanura el concepto de *región hídrica*, palabra poco incorporada en la hidrogeología clásica y en las legislaciones vigentes y además resistidos por muchas autoridades de aplicación de ámbitos provinciales que, si bien está contemplada en muchas legislaciones vigentes a la hora de actuar este criterio no se emplea. Se reconocen a las cuencas y regiones hídricas

como los espacios geográficos para la gestión de las aguas y la integración de la política ambiental, sin perjuicio de la división político territoriales de la Provincia (Ughetti, E et al., 2011).

En este marco, el presente trabajo, pretende realizar un análisis de la situación de la zona subhúmeda-seca y semiárida de La Pampa ubicada en el Centro-Este de la misma y que las caracterice someramente desde una perspectiva hidrológica y social. Posteriormente, se propondrá un marco estratégico de actuación, que tienda secuencialmente a una adecuada gestión del agua, con el fin de superar la situación de conflicto que pudiera surgir.

En la región Este Centro Este de la Provincia de La Pampa esta variabilidad climática se constituye en una zona de transición entre subhúmeda y árida y es un factor fundamental a tener en cuenta en la gestión del agua, causando incertidumbre para la parte de la población que depende, en el aspecto productivo, exclusivamente de la precipitación anual. En estas áreas de riesgo la variabilidad climática también influye fuertemente, tanto en la disponibilidad de recursos hídricos, como en el manejo del agua, dependiendo también de otros factores climáticos, como por ejemplo las heladas. En algunos lugares esta variabilidad se encuentra fuertemente vinculada con los fenómenos hidrológicos que originan alta o baja temperatura en la región.

A partir de estos conceptos podemos decir que, tanto el sistema productivo agrícola ganadero, como el consumo por parte de la población es pluvio-dependiente, directa o indirectamente, ya que la ocurrencia de una variabilidad climática en la zona causa sequías en algunos años y exceso de agua o inundaciones en otros, en otras palabras, este tipo de gestión puede contribuir a indicar la probabilidad de anomalías climáticas (por ejemplo asociadas a un año Niño o Niña) y sus efectos sobre el desarrollo de una sequía (afectando principalmente al secano) y sobre las lluvias que afectan el manejo de los acuíferos (recarga).

También la recarga juega un papel sumamente importante ya que es muy sensible a las altas precipitaciones y de manera intensiva con ascensos rápidos de los niveles freáticos. Pero es muy importante destacar el comportamiento de la misma en toda la región, donde se observa la oscilación de tres freatígrafos ubicados en tres sectores distantes 50 km uno de otro con ciclos iguales (Figura 2).

Todo ello verifica la trascendencia de la existencia de un recurso hídrico subterráneo con importantes limitaciones en cantidad y calidad. Así, parece evidente que debiese existir un objetivo global que tienda, por medio de estrategias adecuadas, a la preservación de los recursos hídricos en cantidad y calidad, en términos temporales y espaciales.

En cualquier caso ésta es una razón más para disponer de una red de control hidrogeológica adecuada que detecte los cambios hidrológicos tanto sobre los aspectos relativos a la cantidad y a la calidad, como a los ecológicos y ambientales. Y sobre la operación del proyecto correspondiente. Nunca se insistirá suficientemente en la importancia de los datos en hidrología y en la necesidad de plantear y operar adecuadamente las redes hidrológicas y organizar las bases de datos. Sin datos hidrológicos adecuados no es posible hacer una buena planificación hidrológica.

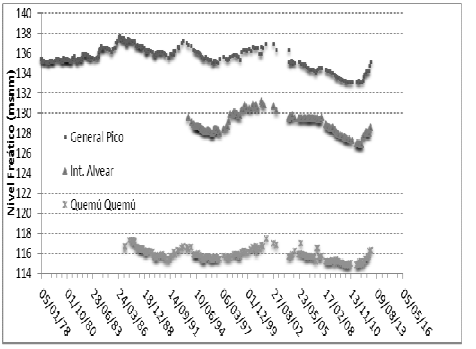


Figura 2. Variación piezometrica

Marco Hidrogeológico

El principal recurso del agua en la región lo constituye el acuífero Pampeano con carácter predominantemente acuitardo, lo constituye la formación Cerro Azul (Linares,*et al;*1980) y a la que podría asignarse una edad del Mioceno Superior (Goin *et al*, 2000). Ésta se caracteriza por constituir una secuencia sedimentaria integrada por arenas muy finas y limosas, en sus términos superiores, en tanto que en profundidad se hace más limosa hasta limo-arcillosa. Esta formación está cubierta por una capa arenosa eólica de espesor variable de granometría gruesa en la base y de fina a media en la mayor parte del perfil. En algunos sectores esta capa tiene una potencia muy reducida y no participa como roca almacén del agua subterránea pero incide fundamentalmente en el proceso de infiltración del agua de lluvia.

Si bien el escurrimiento subterráneo regional es hacia el Este, la configuración geomorfológica expuesta determina distintas situaciones en cuanto a la dinámica del agua subterránea. Las formas elevadas del relieve se comportan como áreas de recarga, en tanto que las depresiones de ubicación ínter medanosas actúan como áreas de descarga, formando lagunas o bañados, permanentes o temporales. Las áreas de conducción se localizan en los sectores intermedios entre los anteriores, tienen un relieve predominantemente llano y pendiente oriental. Las áreas de recarga constituyen importantes acuíferos para la región, algunos de ellos objetos de explotación intensiva o parcial, para la atención de servicios públicos de provisión de agua potable. Su baja salinidad y contenido aceptable de elementos perniciosos se extiende solamente hasta profundidades de 25 ó 30 m, más allá de las cuales, si bien se mantiene un contenido salino apropiado, se hace notorio el incremento, tanto del flúor como del arsénico. Las aguas de descarga, por el contrario, resultan en muchos sectores, prácticamente inaprovechables, tanto por los elevados tenores salinos o por excesos marcados de los oligoelementos mencionados, aun en aguas de moderada salinidad.

Si bien el escurrimiento subterráneo regional es hacia el Este, la configuración geomorfológica expuesta determina distintas situaciones en cuanto a la dinámica del agua subterránea. Las formas elevadas del relieve se comportan como áreas de recarga, en tanto que las depresiones de ubicación intermedanosas actúan como áreas de descarga, formando lagunas o bañados, permanentes o temporales. Las áreas de conducción se localizan en los sectores intermedios entre los anteriores, tienen un relieve predominantemente llano y pendiente oriental. Las áreas de recarga constituyen importantes áreas dentro de los acuíferos para la región, algunos de ellos objetos de explotación intensiva o parcial, para la atención de servicios públicos de provisión de agua potable. Su baja salinidad y contenido aceptable de elementos perniciosos se extiende solamente hasta profundidades de 25 ó 30 m, más allá de las cuales, si bien se mantiene un contenido salino apropiado, se hace notorio el incremento, tanto del flúor como del arsénico. Las aguas de descarga, por el contrario, resultan en muchos sectores, prácticamente inaprovechables, tanto por los elevados tenores salinos o por excesos marcados de los oligoelementos mencionados, aun en aguas de moderada salinidad.

Los acuíferos alojados en ambiente medanoso son los principales recursos hídricos con que cuenta la provincia de La Pampa para el abastecimiento de agua destinada al uso urbano y rural. Las acumulaciones arenosas crean condiciones favorables para la infiltración del agua de lluvia, fuertemente condicionada por el marco climático, sus propiedades hidráulicas permiten una explotación con rendimientos superiores a los obtenidos en otros ámbitos y además incrementan localmente la posibilidad de acceder a agua de mayor aptitud para distintos usos (Giai et al., 1998). Estas cualidades dan lugar a su selección como los sitios preferenciales para la ubicación de obras de captación. Dichos medios son sensibles al régimen de explotación y cuando éste es inadecuado se produce un marcado deterioro cuantitativo y cualitativo del recurso. La correcta gestión de estos acuíferos requiere contar con una variada información básica, entre la cual la estimación de la recarga constituye un aspecto técnico relevante. Así, sin dejar de reconocer que se produjeron aportes significativos a partir de valiosas investigaciones anteriores, se considera de interés proponer un nuevo esquema tendiente a profundizar el conocimiento existente sobre una de las principales áreas acuíferas antes descriptas.

Considerando que para la correcta planificación y gestión hídrica es de fundamental importancia contar con una estimación ajustada de la recarga, se pretende obtener información que resulte de utilidad para la toma de decisiones correctas tendientes al uso racional de los recursos hídricos subterráneos, ya sea para consumo humano, ganadero o riego.

El esclarecimiento de las vinculaciones entre la recarga y la hidrodinámica y entre ambas y la calidad del agua subterránea aportará herramientas metodológicas aplicables en las tareas de localización de sectores acuíferos de mejor calidad para los usos precitados.

Descripción de la situación actual del problema

Los fenómenos hidrometeorológicos extremos dañan los bienes y la integridad física de las personas, en una cadena compleja de impactos que afectan prácticamente a todas las dimensiones del desarrollo humano. La forma en que se prepara la sociedad frente a condiciones extremas del clima como las ondas de calor, las lluvias intensas, o las sequías prolongadas; es un elemento determinante de la vulnerabilidad de los países en el futuro (Calcagno, A et al., 2000).

En la zona en estudio, la variabilidad climática se asocia con fenómenos con importantes impactos socioeconómicos y ambientales. La misma se relaciona con la ocurrencia de sequías severas o con lluvias intensas. Si los efectos de este extremo climático se incrementan, la zona se verá expuesta a eventos extremos de origen hidrometeorológico, a menos que se corrijan prácticas sociales que incrementan la vulnerabilidad. Bajo este panorama, la planificación, la gestión y la acción frente a los riesgos hidrometeorológicos cobran gran relevancia.

La construcción de capacidades de adaptación frente a los potenciales impactos del cambio climático depende de las decisiones que se tomen desde hoy en el campo tecnológico, social, económico y ambiental; en la definición de medidas de adaptación, en el uso de herramientas para planear con incertidumbre, y en el desarrollo de mejores condiciones reactivas y preventivas ante eventos extremos.

Las reflexiones aquí plasmadas surgen en respuesta a la necesidad de tratar la gestión integral de riesgos de origen hidrometeorológico, como un tema trascendental para la región. A partir del conocimiento de los peligros climáticos, del análisis de las condiciones de fragilidad hídrica y de diferentes experiencias vinculadas con la adaptación y el manejo de recursos hídricos; se plantean líneas de acción orientadas hacia la construcción de capacidades de adaptación de la región a las adversidades.

Este análisis de la relación agua-clima-sistema productivo-factores sociodemográficos intenta incidir en el espacio de vinculación entre los actores que generan el conocimiento y quienes diseñan y aplican política pública. Se trata de pensar de una manera distinta los temas de vulnerabilidad hídrica, de los riesgos frente a la variabilidad climática y en particular frente a los eventos hidrometeorológicos extremos, para proponer estrategias de acción que sumen las capacidades del gobierno a la acción de la sociedad.

Por otra parte, el análisis de los factores sociodemográficos que pudieran incrementar los riesgos surge de la necesidad de una estructura institucional vinculada con el tema, con objeto de orientar la acción hacia el manejo integral de riesgos hidrometeorológicos en los ámbitos regional y nacional. El presente trabajo pretende un acercamiento entre el análisis de un problema socio-productivo-ambiental a partir de la visión sistémica y el conocimiento del clima. Se tratará de brindar fundamentos teóricos claramente expresados y bases metodológicas para determinar amenazas y condiciones de vulnerabilidad ante el cambio climático, en el área en cuestión a distintas escalas de espacio y tiempo. Los planteamientos vertidos son importantes insumos para avanzar en la elaboración de Programas Estatales de Acción Climática.

También se pretende obtener elementos de planificación a partir del conocimiento que generan los datos y la información disponible y reflejar también la utilidad del conocimiento ante el planteamiento de este tipo de problemas. Se debe aprovechar la oportunidad y los insumos que tenemos para planear la adaptación exitosa a los efectos previsibles del cambio climático.

Asimismo, en este tipo de regiones, es extraordinaria la variabilidad ambiental de los ecosistemas acuáticos. Ello se pone de manifiesto en la heterogeneidad espacial y las variaciones temporales de sus componentes físicos, químicos y bióticos. El balance hídrico negativo, característico de estas regiones, sitúa al área en extremos ambientales que pasan desde períodos de sequía a eventos de inundación de escasa duración. Tres factores clave determinan esta variabilidad: la temporalidad de las aguas, las interacciones del agua superficial, subsuperficial y subterránea y la tipología del sustrato. Todos ellos contribuyen a configurar el cuadro hidroquímico y su variabilidad espacial y temporal, a seleccionar los componentes biológicos y sus relaciones y a marcar las características metabólicas del ecosistema. Todas estas cuestiones deben tenerse en cuenta para la gestión de los sistemas hídricos en esta tipo de ambiente (Usunoff et al., 1999).

Discusión y Conclusiones

Se puede afirmar que, un elemento básico a tener en cuenta es la importancia del agua subterránea en la zona de estudio como recurso vital para el mantenimiento de la vida; como recurso económico; como recurso social con implicaciones culturales, recreativas, educativas, etc.; y como recurso polifuncional, por las prestaciones que ofrece a los más diversos sectores productivos.

A partir de estos conceptos los factores de incertidumbre hidrológicos, fundamentalmente por pequeños desplazamientos en positivo o negativo de las isohietas, influyen de manera considerable en la región a través de inundaciones o sequias.

A partir de estos conceptos, la respuesta pasa por variadas causas, como que la población local no percibe claramente los

problemas ambientales ligados a la gestión del agua y sus implicaciones. Ello es así porque los fenómenos de degradación del agua en muchas ocasiones son de lenta manifestación física. Asimismo, no existe una difusión importante y continua que se traduzca en una educación ambiental efectiva y eficiente. Además, los recursos hídricos, a no ser que el mercado les asigne una importancia determinante por la existencia de posibilidades de negocios de alta rentabilidad, no presentan una relevancia que los haga merecedores de la atención de las autoridades. Por último, no existen las adecuadas investigaciones ni las suficientes actuaciones técnicas para detener los procesos de degradación del recurso o incrementar su preservación, en tanto que el único aspecto que tiende a crecer exponencialmente es el de los aprovechamientos. Por lo tanto, es casi imposible hablar de integralidad, cuando cada sector productivo o social hace con el agua lo que mejor le parece o, por lo menos, tiende manifiestamente a defender sus propios intereses. Esto último no debería extrañar, salvo que esa estrategia lleva implícita la degradación de los recursos hídricos, una menor eficiencia de aprovechamiento y un impacto ambiental muy importante.

Se puede decir que la participación organizada de los actores en torno a la toma de decisiones, la orientación técnica, el conocimiento en particular de la zona, en un medio natural altamente demandante de soluciones sistémicas, como son las zonas subhúmedas-seca y semiáridas de La Pampa es de vital importancia para este tipo de propuesta de actuación ante factores de incertidumbre hidrológica

La conformación de Grupos de Trabajo en Gestión del Agua en este tipo de regiones y, en particular, de Recursos Hídricos, que en función de ciertos aspectos metodológicos, orienten la definición y praxis de un Plan de Ordenación Territorial.

La incorporación en el acervo de trabajo de la necesidad de interactuar con sus interlocutores, de los diversos actores endógenos y exógenos al área en estudio. Con ello se pretende obtener marcos sinérgicos de trabajo, en un espacio territorial definido.

La obtención de orientaciones técnicas de planificación estratégica, física y socioeconómica, que permitan abordar efectiva y eficientemente el desarrollo de Planes de Ordenación Territorial.

Por último, la importancia de establecer un Plan de Trabajo, a través de un documento sintético y pragmático, resultado de una acción concertada y, por ende, poseedor de la legitimidad necesaria para su puesta en marcha, ejecución, evaluación y retroalimentación.

Referencias

Auge, Miguel (2004) *Regiones Hidrogeologias Republica Argentina y Províncias de Buenos* Aires, Mendoza, Santa Fé. Inédito. La Plata.

Cano, E., Casagrande, G.; Conti, H.A. Fernandez, B.; Hevia, R.; Lea Plaza, J.C.; Maldonado Pinedo, D. ; Martinez, H. ; Montes M.A. y Peña Zubiate, C.A. ;1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. INTA-Gobierno de La Pampa-UNLPam, 493 pp., Santa Rosa.

Calcagno, A.; Mendiburo, N. y Gaviño Novillo, M.; 2000. Agua para el siglo XXI: de la visión a la acción. Informe sobre la gestión del agua en la República Argentina. Global Water Partnership. Argentina.

Giai, S.B. y Tullio, J.O. ;1998. Características de los principales acuíferos de la provincia de La Pampa. Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, Revista, 12:51-68.

Goin, F., Montalvo C.I. y Visconti, G.; 2000. Los marsupiales (Mammalia) del Mioceno Superior de la Formación Cerro Azul (provincia de La Pampa, Argentina). Estudios Geológicos, 56 (1-2): 101-126.

Linares, E., E.J. Llambías y C.O. Latorre, 1980. Geología de la provincia de la Pampa, República Argentina y geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas. Asociación Geológica Argentina, Revista, XXXV (1): 87-146.

Moscardi C., 2010. Relación hidrológica e hidroquímica entre lagunas y acuíferos del noreste de la provincia de La Pampa, desde una perspectiva hidrológica - ambiental. Tesis Maestría en Ciencias Hídricas, UNLPam. La Pampa. Inédito.

Pizarro Tapia, Roberto, 1999. Análisis de la gestión del agua en zonas áridas y semiáridas: una propuesta de actuación. Afers Internacionals, núm. 45-46, pp. 11-33. Fundación CIDOB.

Ughetti, E. y Schulz, C. 2011. Gestión del agua potable en la localidad de Intendente Alvear La Pampa – Argentina. En Temas Emergentes en la Gestión de las Aguas Subterráneas. Tomo 1. Pág. 81-88. Editores: Díaz Eduardo, García Rodolfo y Rocha Verónica. Universidad Nacional de Salta y AIH Grupo Argentino. Editado por AIH-GA. E-Book. ISBN 978-987-27407-0-2. Salta, Argentina.

Usunoff, E.; Varni, M; Rivas, R. y Weinzettel, P. (1999). Hidrogeología de Grandes Llanuras: La Pampa Húmeda Argentina, Boletín Geológico y Minero, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Pag: 47-62. España.

Diagnóstico ambiental aplicado ao manejo e gestão da microbacia do Córrego Monjolo, Chapada Guimarães, Mato Grosso, Brasil

Mileny Batista de Souza[1], Prudêncio Rodrigues de Castro[2] y Alteredo Oliveira Cutrim[2]

[1]Mestranda da Pós-graduação em Recursos Hídricos,UFMT, Av. Fernando Corrêa, s/nº Coxipó 78060-900 Cuiabá-MT, Brasil
[2] Professor do Dep.Geologia Geral, ICET, UFMT, Av. Fernando Corrêa, s/nº Coxipó 78060-900 Cuiabá-MT, Brasil
Mail de contacto: milenygeo@yahoo.com.br

RESUMEN
Arroyo de la cuenca Monjolo, insertado en el Rio Cuiabá, es la principal fuente de captación para el abastecimiento de la ciudad de Chapada dos Guimarães-MT. El uso de la tierra y la urbanización de la cuenca circundante pueden poner en peligro su potencial hídrico. El presente trabajo es identificar los problemas ambientales y de ahí proponer el plan y la gestión de la cuenca. Para la preparación de la evaluación ambiental, se observó cinco aspectos: la vegetación, la erosión, los residuos, el agua y la vivienda (VERAH), con el fin de detectar los problemas ambientales, se realizaron mediciones de flujo exutório de la cuenca. La vivienda y las invasiones causaron cambios en el entorno natural que traen diversas consecuencias como la eliminación de la cubierta vegetal, el sellado del suelo, la erosión y la sedimentación, entre otros. Recomienda que la reforestación con especies nativas, pavimentos permeables para facilitar la infiltración del agua de lluvia.
Palabras clave: diagnóstico, cuenca, gestión de las cuencas

ABSTRATC
The micro watershed of Monjolo Creek, an affluent of Cuiabá River, is the main water supply to the city of Chapada dos Guimarães-MT. The soil use and the urbanization in the surroundings of this micro watershed can jeopardize its hydric potential. This study consisted on the identification of the main environmental problems in order to propose a management plan for this micro watershed. To this aim, five aspects were evaluated: vegetation, erosion, residues, water and homing (VERAH diagnostic). Water flow measures at the Monjolo Creek outfall were carried out. The housing states and invasions caused modifications in the natural environment with several consequences such as withdraw of the vegetal coverage, soil impermeabilization, erosion and silting, among others. It is advisable to develop the reforestation of this region with native species and use of permeable pavements to facilitate rain water infiltration
Key words: diagnostic, micro watershed, management watershed

Introdução

Em decorrência do aumento populacional, atrelado ao processo de urbanização que ocorreu de forma acelerada e sem planejamento, promoveu grande pressão sobre os recursos naturais.

A ocupação imprópria dos recursos naturais têm atingido níveis críticos, ocasionando a retirada da cobertura vegetal, construção inadequada de estradas, causando especialmente problemas de erosão, assoreamento e impactos dos recursos hídricos (Ribeiro et al., 2001).

O avanço da urbanização sobre os mananciais pode ter como consequência a deterioração das fontes de suprimentos superficiais e subterrâneas (Tundisi, 2003), além da extinção de nascentes e perda da perenidade de cursos dágua.

As nascentes marcam a passagem da água subterrânea para a superfície e pela formação dos canais fluviais, podem ser classificadas como: perenes (fluxo contínuo), temporárias (fluxo apenas na estação chuvosa) e efêmeras (brotam durante a chuva, permanecendo por horas ou até mesmo alguns dias). As nascentes perenes alimentadas constantemente pelos aquíferos colaboram para a manutenção dos fluxos dos rios e córregos, mesmo em períodos de estiagem (Calheiros et al., 2004).

Os corpos hídricos em suma, são essenciais para o desenvolvimento econômico, para a qualidade de vida das populações humanas e para a sustentabilidade ambiental.

A microbacia do córrego Monjolo, localizado no município de Chapada dos Guimarães, estado de Mato Grosso (figura 1, lado esquerdo superior), é afluente do Rio Cachoeirinha, que ao unir-se com o Rio Lagoinha dá origem ao Rio Quilombo, que por sua vez é afluente do Rio da Casca, que é afluente do Rio Manso, sendo este afluente do Rio Cuiabá, afluente do Rio Paraguai que faz parte da grande bacia do Prata.

É importante ressaltar que o a microbacia do córrego Monjolo é a principal fonte de captação para o abastecimento da cidade de Chapada dos Guimarães, que constantemente sofre com a ausência desse bem indispensável à manutenção da vida.

Sendo assim, o presente trabalho consiste em identificar os problemas ambientais e a partir de então, propor o plano de gestão e manejo.

Caracterização da área de estudo

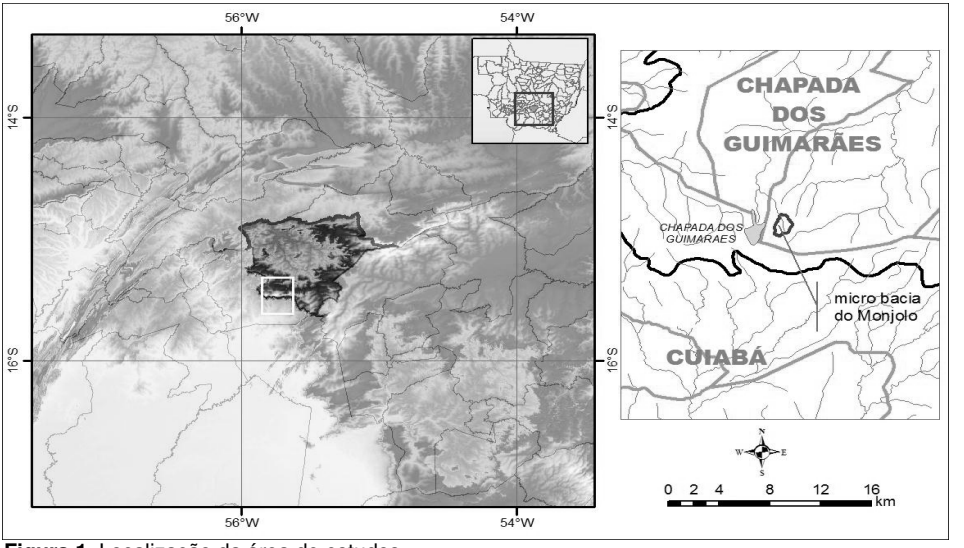


Figura 1. Localização da área de estudos
Fonte: Marques, A. K. 2011.

A área encontra-se em sua grande parte no Planalto do Casca, que é uma subunidade do planalto dos Guimarães, como ilustra a figura 1(lado esquerdo). Apresenta também uma pequena parte, ocupada por algumas nascentes e afluente do rio principal na subunidade Chapada dos Guimarães.

Corresponde a uma área que sofreu acentuado rebaixamento erosivo, comportando cotas altimétricas que vão desde os 350 m até aproximadamente 760 m (Radam Brasil, 1982).

A noroeste se encontra o Planalto do Casca, corresponde às áreas drenadas pelas cabeceiras dos rios da Casca, Manso e Quilombo, afluentes do rio Cuiabá, com altitudes entre 350 e 600 metros.

Em seu interior, ocorrem relevos residuais de topo plano que acompanham o nível topográfico da Chapada dos Guimarães. A porção norte/noroeste, do Planalto dos Guimarães, é contornada pelas superfícies rebaixadas da Depressão Alto Paraguai-Paranatinga; a leste-nordeste, pela Depressão do Araguaia; e a sul, pela escarpa de cuesta do Caipó.

Na margem direita do córrego Monjolo, ocorre solo arenoso, resultante de um processo de coluvionamento, e que recobre a couraça ferruginosa. Acredita-se que a areia quartzosa foi transportada de locais mais altos, sendo proveniente da Botucatu.

O relevo da microbacia do Monjolo apresenta-se em sua seção de maior altitude aproximadamente 840 metros de elevação, chegando a sua seção mais baixa a 735 metros

acima do nível do mar. A vegetação é do tipo Savana, predominantemente por cerrado entremeada por matas ciliares e de galeria.

Material e métodos

Para a realização do diagnóstico ambiental da microbacia foi utilizado o método VERAH, proposto por Oliveira et al. (2008), aplicado com êxito em microbacias do estado de São Paulo, com o propósito de detectar os problemas ambientais. É um instrumento de descrição do meio com interferência na realidade. Os cinco temas usados para a elaboração do presente trabalho, são as iniciais que compõe o termo VERAH: vegetação, erosão, resíduos, água e habitação.

Para diagnóstico da microbacia do córrego Monjolo, *a priori* foram realizadas pesquisas bibliográficas, analise de imagens de satélites, delimitação da área da microbacia do córrego Monjolo e confecção do mapa cartográfico utilizado para o reconhecimento em campo. A etapa seguinte consistiu no reconhecimento da área da microbacia fazendo-se observações referentes aos cincos temas, bem como a aplicação do questionário socioeconômico e ambiental, cadastro de eventos do meio físico (erosão), levantamento de dados junto à Prefeitura de Chapada dos Guimarães e a classificação dos resíduos sólidos.

Para a obtenção dos dados referentes à vazão, utilizou-se o método do flutuador, para a aplicação do método e necessário conhecer a área da seção transversal de escoamento do curso d´água e a velocidade média da corrente, para se determinar a velocidade de deslocamento utiliza-se um objeto flutuante, medindo o tempo gasto para que o mesmo se desloque na seção determinada (Ramos, 2006).

De acordo com Santos (*apud* Filho, *et al.*, 2009), deve apresentar o trecho mais retilíneo, com margens paralelas, apresentando no mínimo duas vezes o comprimento da largura, além de boa visibilidade. A seção de monitoramento está localiza-se à montante da captação de água, neste mesmo local está fixada a régua limnimétrica.

A seção delimitada possui 10 metros comprimento, sinalizada com estacas e barbantes, estabelecendo-se assim, o inicio e termino da seção. Após a delimitação realizou-se a batimetria, com um bastão de madeira e fita métrica, medindo-se o nível de água no inicio e no termino da seção. Em seguida, com o uso de uma bolinha plástica oca flutuante e um cronômetro, foi cronometrado o tempo gasto pelo objeto durante o seu deslocamento na seção determinada.

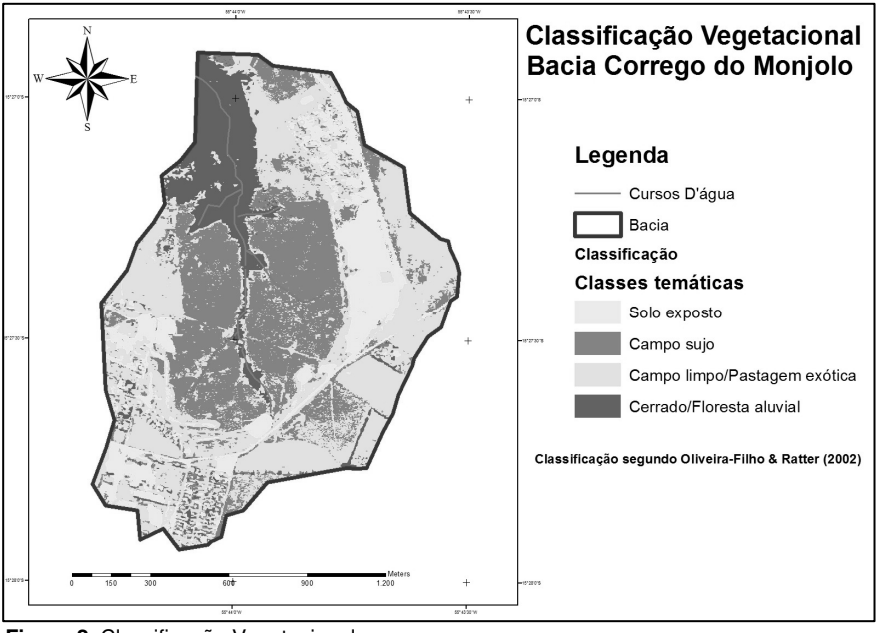


Figura 2. Classificação Vegetacional
Fonte: Santos, C.C.P. 2011.

O cálculo da vazão foi realizado mensalmente, por meio de treze medições diárias sucessivas do tempo de deslocamento, totalizando dez medidas anuais.

Resultados e discussão

A observação e análise dos vários aspectos que compõem a microbacia, tais como a vegetação, erosão, resíduos, água e assoreamento, e habitação, conforme propõem o método VERAH, permitiu a elaboração de um quadro síntese contendo as características, bem como as recomendações de caráter preventivo e corretivo aos principais problemas identificados.

Vegetação

O levantamento florístico aleatório permitiu observar a presença de vegetação arbórea, arbustiva e herbácea, classificadas como campo sujo, campo limpo e cerrado, bem como áreas com solo exposto, como ilustra a figura 2. Observou-se ação antrópica que suprimiu a mata, facilitando a ação direta da água da chuva sobre o solo, aumentando assim, o surgimento de erosões, a contaminação da água, além do assoreamento do córrego Monjolo.

Erosão

Os processos erosivos ocasionam diversos impactos ambientais, tais como degradação do solo, desaparecimento de mananciais e acentuação das inundações urbanas. (Guerra, 2005). Com os processos erosivos grandes volumes de sedimentos são transportados causando assim assoreamento, diminuição da capacidade de escoamento de condutos, rios e lagos urbanos, bem como transporte de poluentes agregados aos sedimentos, que contaminam as águas pluviais (Tucci et al, 1998).

As erosões encontradas possuem características semelhantes, iniciando pelo processo erosivo denominado de sulcos que evoluíram para ravinas rasas e/ou profundas, devido à concentração da água das chuvas e o tipo do solo, algumas evoluíram atingindo o nível mais crítico do processo a erosivo a voçoroca, que atingem lençol freático e apresentando o fenômeno *piping*.

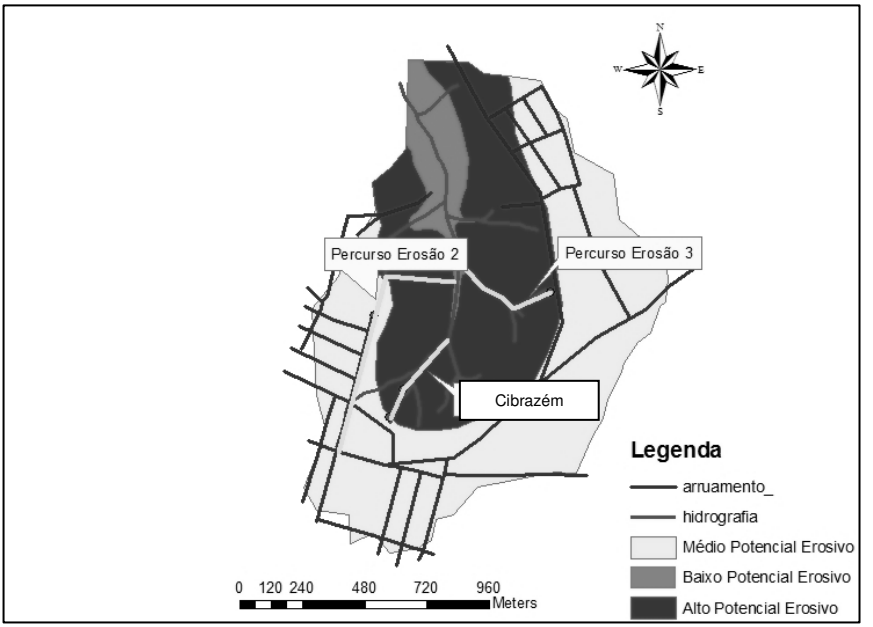


Figura 3. Mapa potencial erosivo
Fonte: Marques, A. K. 2011.

Com as medidas aproximadas de cada erosão foi possível ter o volume aproximado de terra que foi deslocado em direção ao curso d'água. Estes dados podem ser analisados no Quadro 1.

Quadro 1. Volume aproximado de terra assoreado para o Córrego Monjolo.

Erosão	Volume Assoreado (m^3)
Cibrazém	15.816
Aclimação	5.425
Vista Alegre	14.385

A compartimentação morfopedológica da microbacia permitiu classificar o potencial erosivo em três níveis, conforme figura 3. Na mata ciliar e/ou de galeria, ao longo do córrego, encontra no compartimento de baixo potencial erosivo. O nível médio quanto ao potencial erosivo é o local mais alto da microbacia, onde se encontram as cabeceiras do córrego, para onde avança a urbanização de baixa renda, por meio de um movimento social de luta pela posse do solo urbano, denominado invasão.

O compartimento de alto potencial erosivo corresponde às encostas mais declivosas que fazem a transição do topo do Planalto dos Guimarães para o Planalto do Casca, em cujos talvegues se desenvolvem. Os sedimentos gerados pela erosão por sua vez acabam por provocar ao longo do tempo o assoreamento do córrego Monjolo, reduzindo a disponibilidade hídrica.

No início do desenvolvimento desses processos erosivos ocorreram colapsos de solo, que assoreou completamente o reservatório de captação de água, interrompendo o abastecimento urbano por vários dias.

Resíduos sólidos e habitação

A área urbanizada da microbacia comporta um total de 1.111 domicílios com uma população de 3.590 habitantes (IBGE, 2010), conforme discrimina o quadro 2.

Quadro 2. Estimativa de domicílios e numero de habitantes dos bairros amostrados

Bairros	Numero de Domicílios	Hab.
São Sebastião	750	2.400
Sol Nascente	200	660
Vista Alegre	95	313
Aclimação e Santa Elvira	66	217

Fonte: IBGE, 2010.

Sendo que o bairro São Sebastião apresentou o maior numero de domicilio, consequentemente de população, e o bairro Aclimação e Santa Elvira o menor numero em relação ao domicilio e população. Os conjuntos habitacionais presentes no perímetro da microbacia do córrego Monjolo foram identificados como consolidáveis, necessitando de uma melhor infraestrutura básica como: arruamentos, redes pluviais, energia elétrica, iluminação pública.

O questionário socioeconômico e ambiental foi aplicado em 18 estabelecimentos do Bairro Sol Nascente (69 moradores), 14 no Vista Alegre (56 moradores), 12 no São Sebastião (58 moradores) e 3 no Aclimação (8 moradores).

Dentre os resíduos gerados nos bairros inseridos na microbacia do córrego Monjolo, o São Sebastião e o Sol Nascente geraram maior percentual de resíduos seco, 80% e 62% respectivamente. Os resíduos molhados foram gerados em maior quantidade nos bairros Aclimação e Vista Alegre (57%).

Dentre os resíduos sólidos inorgânicos encontrados no bairro Sol Nascente, o maior percentual foi atingido pela geração de papel (19%), no Vista Alegre, os mais gerados foram o plástico, com percentual de 22%, seguido de papel – 21% , mesmo com a presença de um Ponto de Coleta de Garrafas PET na entrada do bairro, comprovando a necessidade de se realizar trabalhos de Educação Ambiental.

O bairro São Sebastião gerou grande quantidade de resíduos inorgânicos na categoria outros (tecido, isopor, vela, cortiça, metais, etc.), cujo percentual é de 64%.

Dos resíduos inorgânicos encontrados no bairro Aclimação, destacou-se o papel (20%). Dos resíduos sólidos gerados nos bairros inseridos na microbacia do Córrego Monjolo, 100% são de origem domiciliar e apenas no bairro Sol Nascente teve a participação de um estabelecimento comercial representando 6% de resíduos sólidos de origem comercial e 94% de origem domiciliar.

Os bairros contam com a coleta dos resíduos gerados que tem por destino final o lixão, no entanto, foi possível observar resíduos ao longo do córrego, além disso, em alguns pontos devido a ausência de saneamento ocorre o despejo do esgoto na área da microbacia. São fatores que consequentemente colocam em risco a qualidade da água.

Água

A área de drenagem da microbacia totaliza 1,69 km^2, com um perímetro de 5,52 km. Trata-se de uma microbacia pouco suscetível a enchentes em condições normais de precipitação, ou seja, excluindo-se eventos de intensidades anormais, pelo fato do coeficiente

de compacidade apresentar o valor afastado da unidade (1,19) e, quanto ao seu fator de forma, exibir um valor baixo (0,60).

Assim, há uma indicação de que a bacia não possui forma circular, possuindo, portanto, uma tendência de forma alongada. Tal fato pode ainda ser comprovado pelo índice de circularidade, possuindo um valor de (0,697).

A densidade de drenagem encontrada na bacia hidrográfica do Córrego Monjolo foi de 1,25 km/km^2. De acordo com Villela e Mattos (1975), esse índice pode variar de 0,5 km/km^2 em bacias com drenagem pobre a 3,5 km/km^2, ou mais, em bacias bem drenadas, indicando, assim, que a bacia em estudo possui baixa capacidade de drenagem.

A densidade de drenagem é um fator importante na indicação do grau de desenvolvimento do sistema de drenagem de uma bacia, esses valores ajudam substancialmente no planejamento do manejo da bacia hidrográfica.

O sistema de drenagem da bacia em estudo, de acordo com a hierarquia de Strahler, possui ramificação de segunda ordem, o que significa pouca ramificação para a escala do mapa utilizado. Com os dados obtidos pelas coletas, observou-se que o córrego apresenta uma pequena vazão. Os meses de maio a setembro apresentaram as menores vazões, valores compreendendo de 0,04 m^3/s a 0,06 m^3/s, esse fato está diretamente relacionado com a sazonalidade da região, correspondendo ao período de pouca pluviosidade interferindo diretamente na vazão da microbacia do Monjolo.

Mesmo apresentando uma pequena vazão, o córrego Monjolo é responsável por mais de 50% do abastecimento da cidade de Chapada dos Guimarães.

Quadro síntese da microbacia do córrego Monjolo

	DIAGNÓSTICO	PROBLEMA	RECOMENDAÇÕES
VEGETAÇÃO	**Casa de Máquinas da SAAE:** localizado na Área de Preservação Permanente (APP). A fitofisionomia encontrada no local é do tipo Cerradão. **Presença de Pastagens com Plantas Exóticas** predominando a *Brachiaria* sp. **Área Degradada com Solo Exposto** devido à antiga extração de cascalho.	*A casa de máquinas está implantada em local impróprio, a 5m do ponto de captação, dentro da APP, podendo influenciar na qualidade da água do manancial devido óleos e graxas oriundos da manutenção de equipamentos *Facilidade de naturalização no ambiente aumentando o banco de sementes no solo, dificultando a remoção. Altera todo o ecossistema; *Depósito de resíduos sólidos; *Solo lixiviado; *Transporte de sedimentos para a microbacia.	Providenciar a correta implantação da casa de máquinas; *Remoção das espécies exóticas e revegetação com espécies nativas, iniciando com forrageiras; **Revitalização da área degradada:** *Recuperação com reflorestamento imediato; *Construção de uma praça, quadra de esportes ou parque para lazer da comunidade, impedindo que o local se transforme em "lixão".
EROSÃO	**Erosão Cibrazém** - a erosão se inicia na forma de sulco e evolui para ravina com dimensões médias de 4 m de profundidade, 6 m de largura e cerca de 659 m de comprimento. **Erosão Aclimação** - a erosão se inicia com uma ravina rasa e evolui para uma ravina de aproximadamente 2,5 m de profundidade, 4 m de largura e com cerca de 310 m de comprimento. **Erosão Vista Alegre** - a erosão tem cerca de 411 m de extensão e inicia-se com uma Ravina rasa que evolui conforme a declividade do terreno tornando-se uma voçoroca de 7 m de profundidade e 5 m de largura com ocorrência de *piping*.	Assoreamento do Córrego do Monjolo; *Possibilidade de rompimento das barragens de contenção e bacias de infiltração existentes; *A evolução dessas erosões, pode atingir as residências.	*Construção de novas Bacias de Infiltração e obras de manutenção das já construídas; *Instalação de galerias pluviais; *Obras para disciplinar as águas pluvias; *Reflorestamento das áreas mais susceptíveis à erosão; *Reflorestamento das áreas próximas ao Bairro Vista Alegre; *Implantar obras de dissipação de águas de chuva na estrada vicinal que circunda a microbacia.

RESÍDUOS	**Deficiência da Educação Ambiental.** **Presença de Resíduos Sólidos Nas Nascentes do Córrego Monjolo.** **Coleta seletiva nos bairros inseridos na microbacia do Córrego Monjolo.**	*Programas deficientes de Educação Ambiental e falta de sensibilização da população quanto a disposição adequada de resíduos sólidos urbanos. *Presença de resíduos sólidos *Ausência de coleta seletiva nos bairros inseridos na microbacia do Córrego Monjolo.	*Mutirão ecológico visando a retirada dos resíduos dos locais e principalmente, a sensibilização da população. *Implantação da coleta seletiva e projetos de Educação Ambiental; *Incentivar/apoiar as Associações de Catadores.
ÁGUA E ASSOREAMENTO	**Captação de água do SAAE.** *Pequeno barramento de acumulação; *Volume de água captado elevado em relação à vazão do corpo d'água; *Impactos causados por pessoas que visitam o manancial. **Assoreamento do Leito do Córrego Monjolo.**	*O barramento, em certa época do ano, pode extinguir o fluxo d'água a jusante;*Volume de água captado muito próximo à vazão total do córrego;*Contaminação do manancial por coliformes devido à visitação no local. *Os bancos de areia existentes podem diminuir a capacidade hidráulica do córrego e obstruir seu fluxo; *Inundação de trechos da mata ciliar; *O sedimento carreado, afeta a qualidade da água e onera seu tratamento. *Apesar da rede de drenagem ainda estar na fase construtiva, nota-se o assoreamento do dissipador de energia na saída da galeria.	*Requerer junto a SEMA/MT a Outorga de uso da água, de acordo com a Lei Estadual n° 6945/1997 e a Resolução do CEHIDRO n° 27/2009; *Inserir no barramento um ladrão (vertedouro) que garanta a jusante no mínimo 30% da vazão de referência (Q95%) calculada para o córrego; *Monitoramento quali-quantitativo trimestral da água do córrego Monjolo; *Obras de contenção das águas de chuva/sedimento; *Incluir no Projeto de Drenagem; *Escada de concreto e blocos dissipadores na descida da encosta.
HABITAÇÃO	**Bairros Aclimação, Sol Nascente, São Sebastião e Vista Alegre:** *A modificação do meio natural pela implantação de um ambiente urbano implica em alterações nos caminhos naturais da água das chuvas, que deixam de escoar por córregos temporários e passam a deslocar-se por tubos e canais denominados de sistemas de drenagem ou rede de águas pluviais. *Casas de alvenaria com revestimento na maioria dos bairros, e de materiais de madeiras, sendo estabelecidos de acordo com o padrão socioeconômico dos moradores. *Conjuntos habitacionais consolidados com presença de infraestrutura básica (arruamentos, rede pluvial, energia elétrica, iluminação pública). *Áreas de uso rural.	Aumento da frequência e magnitude das cheias, resultado da impermeabilização de grandes áreas, implicando em maior escoamento superficial,. *A ausência saneamento básico ocasiona o lançamento de esgoto, resultando na contaminação do solo e do corpo hídrico; *Transporte e Deposição de sedimentos para o interior da área da microbacia. *A presença de animais no interior da área da microbacia provoca a contaminação do manancial com coliformes, além da compactação do solo e erosão em sulco.	**Adoção de Estruturas de Controle:** *Proibir a construção de novas moradias na área da microbacia. *Elaborar mapa de uso e ocupação do solo, identificando as áreas restritas à ocupação humana; *Serviços de infraestrutura nas áreas já ocupadas; Programas sociais, equipamentos e serviços públicos; Estudo de Impacto de Vizinhança; *Isolamento da área de abrangência da microbacia, com o intuito de proibir a atividade agropecuária no interior da microbacia.

Recomendações Gerais

Através dos dados obtidos e analisados, são sugeridas algumas medidas para a conservação e manutenção da microbacia do córrego Monjolo. Proibir a construção de novas moradias na área da microbacia; serviços de infraestrutura nas áreas já ocupadas, porém visando o menor impacto possível na área da microbacia, sensibilizar a população com programas e informações para que não degrade o entorno da bacia; isolamento da área de abrangência da microbacia, com o intuito de proibir a

atividade agropecuária no interior da microbacia.

Além disso, o reflorestamento com espécies nativas da região e remoção das espécies exóticas; pavimentos permeáveis que facilitem a infiltração das águas pluviais; manutenção e construção de novas Bacias de Infiltração; micro reservatórios de detenção (podem ser aplicados em espaços livres como praças, jardins, quintais); obras de contenção das águas de chuva/ sedimento (diques de contenção, curvas de nível e reflorestamento).

Agradecimento

A instituição UFMT e a CAPES, pelo apoio e incentivo às pesquisas.

Referência

ANA/GEF/PNUMA/OEA. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Estudo técnico de apoio ao PBHSF – nº 13. recuperação e conservação hidroambiental.Brasília – Distrito Federal-2004.

CALHEIROS, R. de Oliveira et al. Preservação e Recuperação das Nascentes.Piracicaba: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios PCJ - CTRN, 2004.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas in Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Org. GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Rio de Janeiro: Bertrand, 2005.

OLIVEIRA, A. M. S et al. Diagnóstico ambiental de microbacia urbana, Método: VERAH. Guarulhos, Laboratório de Geoprocessamento. Universidade de Guarulhos, 2008. Apostila, 16p.

RADAMBRASIL. Folha SD.21. Cuiabá: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. 544 p. il., 5 mapas. 1982.

RAMOS, Vitor Santos. 2006. Uso das técnicas de radiotraçadores e de contagem total em medidas de vazão de sistemas abertos. Dissertação – Universidade Federal do rio de Janeiro: COPPE, 2006.

RIBEIRO, J. C. A; SALOMÃO, F.X.T. A morfopedologia aplicada ao diagnóstico e prevenção dos processos erosivos lineares da bacia hidrográfica do alto Rio da Casca. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia:GO, 03 a 06 de maio de 2001. http://drifte.rc.unesp.br/revistageociencias/22_1/8.PDF

Relatório da disciplina estudos integrados II da bacia hidrográfica do córrego Monjolo. Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos. UFMT: Cuiabá, 2011. Trabalho Acadêmico (Mestrado em Recursos Hídricos). UFMT: 2011.

SANTOS, A.R. Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrográfica do rio Turvo Sujo, Viçosa, MG. 2001. 141f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

TUCCI, C.; COLLISCHONN, W. 1998. Drenagem urbana e controle de erosão. VI Simpósio nacional de controle da erosão. 29/3 a ¼ 1998, Presidente Prudente, São Paulo.

TUNDISI, J. G. Recursos Hídricos. In: O Futuro dos Recursos. Revista Multiciência. São Paulo: Unicamp, Out. de 2003. V.01.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

Metodología de determinación de estrés hídrico en zonas semiáridas como ayuda a la toma de decisiones

Damián Córdoba[1], Juan F. Gallardo[2] y Sonia Amaro[1]

[1] Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH), Calle Vivar 493, 3er Piso, Iquique, Chile.
[2] Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca, Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, Calle Cordel de Merinas, 40-52 (37008), Salamanca, España.
Mail de contacto: damian.cordoba@ciderh.cl

RESUMEN

El estrés hídrico es un tema de gran importancia y desarrollo en la gestión del recurso hídrico de una región, ya que el mismo incide en las características biológicas de los ecosistemas, así como en la disponibilidad del recurso hídrico bien sea en términos de cantidad o de calidad. El desarrollo de metodologías para la determinación de estrés hídrico se basa en la recopilación y elaboración de estudios básicos sobre la caracterización de una región a partir de los componentes físicos (geográficos, geológicos, climáticos, bióticos e hidrológicos) y antrópicos (usos del suelo, actividad socieconómica y demografía). En zonas semiáridas y áridas los componentes físicos y antrópicos están condicionados por las características climáticas de cada región, por tal razón la metodología aquí propuesta se fundamenta en expresar los diversos componentes del análisis de series temporales para la definición de afecciones en un panorama existente de estrés hídrico. tomando como ejemplo una región de la Cuenca Hidrográfica del Duero en España.
Palabras clave: Estrés Hídrico, Semiárida, Series temporales.

ABSTRACT

The water Stress is an important topic in the water resource management for some region, since it affects the biological characteristics of ecosystems specially water resource availability (quantity and quality). The development of methodologies for determination of water stress is based in the recompilation and making of basic studies about the characterization of one region, taking into account the physic (geographic, geologic, climatic, biotic and hydrogeologic) and human (land use, socioeconomic activity and demography) factors. In semiarid and arid zones, the physic and human factors can be influenced by the climatic characteristics of each region, for this reason the methodology presented in the study is based on the analysis of temporal series for the definition of consequences of water stress taking as an example a region from the Duero Watershed in Spain.
Keywords: Water stress, Semiarid, Temporal Series.

Introducción

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) el estrés hídrico se produce cuando la demanda de agua excede la cantidad disponible durante un periodo determinado de tiempo, o cuando la mala calidad limita su uso, provocando un deterioro de los recursos hídricos en términos de cantidad (sobreexplotación del acuífero, ríos secos, etc.) y calidad (eutrofización, contaminación por materia orgánica, intrusión salina, etc.). Dicha diferencia entre la demanda y la disponibilidad depende de factores antrópicos y factores naturales, entre los cuáles el cambio climático se considera como el principal de estos factores al incidir en los restantes. Este factor se incluye como un fenómeno desencadenante del estrés hídrico en los informes del IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático) emitido por el PNUMA.

Normalmente, en ciertos estudios, el análisis del impacto del cambio climático junto con otros cambios causados por el hombre (constituyendo el llamado cambio global) en la disponibilidad de los recursos hídricos se basan en la aplicación de técnicas de *"downscalling"* (técnicas de reducción de escala) sobre modelos de circulación global fundamentados en series futuras de precipitación y temperatura (Sahuquillo et al, 2008). La aplicabilidad de estos estudios puede ser limitada al no tener en cuenta aspectos físicos, bióticos incluso hidrogeológicos que condicionan la distribución de la precipitación, la temperatura y por lo tanto, la disponibilidad de los recursos hídricos.

Un Sistema de Ayuda a la Decisión (DSS por sus siglas en inglés) se refiere a un modelo de datos que posibilita obtener respuestas a preguntas que requieren de un gran número de variables a analizar. Desde este punto de vista, la incorporación del análisis de series temporales en un DSS, permite no solo obtener respuestas inmediatas sino su evolución futura en base a condicionantes temporales.

Las zonas áridas y semiáridas, por lo general tienen un potencial natural (biodiversidad, biomasa, agua, suelo, etc.) y cultural que permiten el desarrollo sostenible. Sin embargo, en las últimas décadas han sido sometidos a un acelerado proceso de degradación de sus recursos naturales y a un cambios en los regímenes hidrológico en estos ecosistemas (ASPAN, 1992).

Zona de Estudio

Para entender el proceso de aplicación de un sistema de apoyo a la toma de decisiones, se ha seleccionado una zona en la Cuenca Hidrográfica del Duero al Noroste de España (Fig.1). la cual fue producto de una división en cinco zonas (A, B, C, D, E), y a su vez, en 12 subzonas de la Demarcación Hidrográfica española. Por lo tanto, el área de estudio corresponde a la Zona D – 11 Bajo Duero.

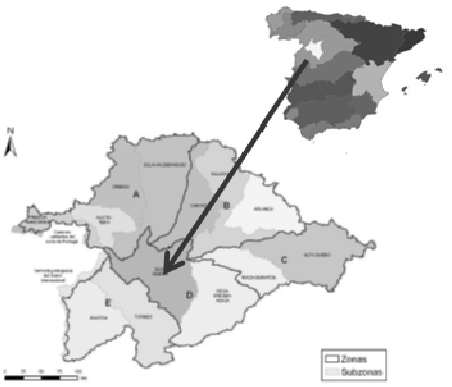
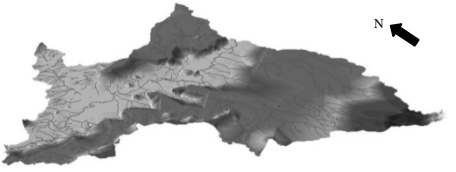


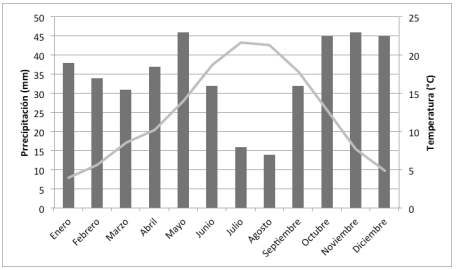
Figura 1. Localización de la zona D - 11 Bajo Duero en la Demarcación Hidrográfica del Duero.

La zona D – 11 Bajo Duero queda definida con 7.599 km^2 los cuales representan el 9,6% de la Demarcación española, incluyendo a las provincias de Zamora, Salamanca, Valladolid, Ávila y Palencia.

Desde el punto de vista físico, la zona D – 11 Bajo Duero presenta una topografía caracterizada por la presencia de picos y cerros, llanuras y laderas, y un valle escarpado con laderas de pendientes fuertes y muy fuertes (Fig.2). La climatología de la zona está representada por un clima mediterráneo (templado húmedo de verano seco) caracterizado por ser un clima continental de zona templada entre los 30˚ y 45˚ de latitud Norte, con una marcada sequia estival motivada por la permanencia del anticiclón subtropical. Asimismo se distinguen inviernos muy fríos con temperaturas medias por debajo de los 6˚C en los meses más fríos (Fig.3).



Fígura 2. Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio. Los valores van desde los 700 m s.n.m. (colores grises claros) hasta los 1200 m s.n.m. (colores oscuros).



Fígura 3. Climograma de la zona D-11 Bajo Duero

Por otro lado, la zona D – 11 Bajo Duero al pertenecer a una cuenca intraplaca de evolución compleja desde el Cretácico hasta el presente, se diferencia de otras regiones debido a las características tectosedimentarias determinadas por una cuenca sedimentaria compuesta de materiales productos de la erosión del Macizo Ibérico y el Sistema Central (Vera, 2004).

Desde el punto de vista hidrológico, el río Duero discurre por el sector central-Norte de la zona de estudio (de E a O; Fig.2), con una longitud de 160 km que representan el 28% de su longitud total. De esta forma (y siguiendo la configuración característica de la cuenca del Duero) el río Duero diferencia un margen septentrional y un margen meridional. Dentro de cada uno de estos márgenes se reconocen

subredes tributarias y un gran número de lagos y lagunas, lavajos y charcas asociados, siendo de gran interés aquellas que configuran el Complejo lagunar de Villafáfila.

En cuanto a las características forestales la serie dominante de la zona de estudio corresponde a los encinares supramediterráneos con la especie Quercus rotundifolia en casi un 90% de su extensión, seguido por la especie Quercus pyrenaica.

Asimismo hacia el sector O se encuentran zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos que se corresponden con la zona de las Arribes del Duero (con un alto valor paisajístico y, por lo tanto, conservacionista).

La ocupación y uso del suelo está representado por los usos agrícolas, en especial los relacionados con los cultivos en secano y en menor proporción, los cultivos de regadío.

Metodología

La metodología propuesta se basa en la recopilación y elaboración de estudios básicos sobre la caracterización de una región a partir de los componentes físicos (geográficos, geológicos, climáticos, bióticos e hidrológicos) y antrópicos (usos del suelo, actividad socieconómica y demografía). Como se ha citado la importancia de los estudios históricos de las variables del ciclo hidrológico para la comprensión de su dinámica en una región, la metodología aquí propuesta se fundamenta en expresar los diversos componentes del análisis de series temporales para la definición de afecciones en un panorama existente de estrés hídrico.

Estudio Temporal

En lo que tiene que ver con algunas evidencias de cambio climático en la zona D – 11 Bajo Duero se han generado indicadores en tres estaciones ubicadas las provincias de Salamanca, Zamora y Valladolid. El estudio se ha realizado en base al análisis de las series diarias de 66 años (01/01/1945 a 31/12/2010) con el fin de cubrir el tiempo recomendable para el estudio de las normales climáticas tanto de temperatura como de precipitación. Las variables empleadas fueron la precipitación acumulada diaria y los valores diarios de temperatura (mínima y máxima del día) utilizando el programa RClimdex 1.0.

En todas las estaciones se garantizó la disponibilidad de los datos por encima del 80% del total de la serie considerada según lo determinado por la Organización Meteorológica Mundial (W.M.O, 2010).

Para la determinación de los cambios temporales en las series de caudales del Río Duero se emplean las series de caudales de tres estaciones de aforo en el río Duero; dos en el río Guadaña y una en el río Valderaduey. Estas series se someten a pruebas estadísticas para detectar tendencias temporales. Estas pruebas estadísticas consisten en estimar la probabilidad de la hipótesis nula (no hay tendencia) que se rechaza cuando tal probabilidad es inferior a un umbral.

La probabilidad de la hipótesis nula disminuye al aumentar la tendencia (positiva o negativa) de la serie, pero aumenta con su variabilidad; de manera que tendencias relevantes desde el punto de vista de los recursos implicados pueden no ser significativas en términos estadísticos si la variabilidad es elevada. Para eludir este problema los resultados de las pruebas estadísticas pueden expresarse de una manera menos estricta que los que se emplean en la refutación científica de hipótesis (Gallart, 2009), pero más adecuada a la toma de decisiones utilizando la escala semicuantitativa de verosimilitud.

Aplicando el mismo criterio de los informes internacionales sobre el cambio climático (IPCC, 2.007), se asigna una escala semicuantitativa para indicar los diversos niveles de confianza de las conclusiones y de las predicciones, basados en las observaciones y en los modelos empleados:

- Virtualmente cierto (confianza superior al 99% en la certeza de un resultado)
- Muy verosímil (90-99% de confianza)
- Verosímil (66-90% de confianza)
- Medianamente verosímil (33 – 66% de confianza)
- Inverosímil (10 – 33% de confianza)
- Extremadamente inverosímil (menos del 10% de confianza)

Posteriormente es necesario estudiar posibles tendencias en los residuales, ya que la existencia de una tendencia indica que existen otros factores, además del tiempo, que contribuyen al cambio de los recursos de la cuenca (o que los datos o el modelo son incorrectos; Gallart, 2009)

Para los dos casos (estudio climático e hidrológico) se ha empleado un nivel de confianza del 90%.

De esta manera, se han determinado 29 indicadores de cambio climático los cuales se generan automáticamente utilizando el programa RClimdex 1.0.

Resultados

Se puede apreciar que los resultados obtenidos presentan (en la mayoría de los casos) una significación estadística admisible que aumentan de esta forma la fiabilidad de los resultados. Sin embargo hay que considerar dos factores: El nivel de confianza empleado (90%) no es el usualmente adoptado en la mayoría de estos estudios (95%); aun así la falta de más puntos de control (estaciones meteorológicas y de aforo) con datos completos y continuos, conllevan a que se obtengan datos con una fiabilidad admisible aunque de baja valoración; por otro lado, los valores de significación no tienen el mismo comportamiento entre las estaciones consideradas.

A partir del estudio temporal, se han obtenido los resultados señalados en la tabla 1. En el caso de la precipitación las conclusiones son muy limitadas debido a la calidad de la información y a la homogeneidad de las precipitaciones en las tres estaciones analizadas. En relación al rango entre la Temperatura máxima y la mínima, los resultados obtenido implica que las estaciones registren con más frecuencia valores extremos tanto de temperatura mínima como de temperatura máxima, aunque el comportamiento de estas variables respecto a los valores actuales, deben analizarse de acuerdo a los eventos anómalos en la zona de estudio.

Por otro lado, para los valores de temperatura mínima (temperatura en la noche) el comportamiento en la zona de estudio no es tan homogéneo, mientras que para la temperatura máxima en el día el comportamiento es el opuesto.

Discusiones

En el informe del 2007 del IPCC expone que “con un grado de confianza alto las proyecciones indican que, hacia mediados del siglo, la escorrentía fluvial anual y la disponibilidad de agua disminuirán en algunas regiones secas en latitudes medias (correspondiente a las zona de estudio) y en los trópicos. También con un grado de confianza alto, numerosas áreas semiáridas experimentarán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático” (IPCC, 2007).

Por otro lado, las sequias han afectado el ciclo hidrológico limitando el rendimiento hidrológico de ríos y acuíferos (Martínez Gil, 2006). Dicho comportamiento se explica si se considera que el aumento de la temperatura conlleva a su vez al aumento exponencial (Martínez Gil, 2006) de la evapotranspiración del conjunto suelo/planta limitándose el agua disponible para las escorrentías directas y para la recarga de los acuíferos del subsuelo (Aguilera y Murillo, 2006). En el caso de las precipitaciones el comportamiento es más discutido debido a la irregularidad tanto espacial como temporal en su distribución (Aguilera y Murillo, 2006) con la incertidumbre si dicho comportamiento responde al cambio climático o se trata simplemente de una crisis cíclica (Martínez Gil, 2006) relacionada por algunos científicos a las manchas solares.

A escala regional, se aprecia un mayor aumento en la temperatura mínima que en la máxima. Salvo en casos concretos como en Salamanca, las tendencias son negativas aunque su nivel de significación es muy bajo en comparación a las otras dos estaciones.

Por otro lado el aumento de la temperatura media ha conducido al aumento de días y/o noches calientes, no siendo muy clara la tendencia regional en cuanto a las heladas se refiere.

Esta anomalía en la frecuencia de heladas se debe a que la atmósfera no se comporta en forma lineal, de manera que no se pueden extrapolar tan fácilmente los resultados. Por esta razón muchos científicos han estudiado los cambios producidos en los regímenes de las heladas, lo que deja claro que explicar el comportamiento de las heladas en la zona de estudio requiere otro tipo de estudios a comparar con los resultados obtenidos en este proyecto.

Dicha tendencia al aumento de las temperaturas se complementa con la disminución de las precipitaciones. Esta disminución en los valores de precipitación se relaciona con lo expuesto por el IPCC respecto a la distribución de dicha anomalía. Este organismo establece que para aquellas latitudes medias es de esperar una disminución de la precipitación en comparación

Tabla 1. Resultados del procesos de análisis de series temporales (Tmax: Temperatura máxima; Tmin: Temperatura mínima)

PARÁMETROS	ESCALA DE VEROSIMILUTD	ESTACIÓN (ES)
Disminución de la Precipitación	Muy verosímil (90-99%)	Valladolid
	Medianamente verosímil (33-66%)	Zamora y Salamanca
Aumento del Rango térmico (Tmax-Tmin)	Muy verosímil (90-99%)	Valladolid, Zamora y Salamanca
Aumento de la temperatura mínima nocturna	Muy verosímil (90-99%)	Valladolid, Zamora y Salamanca
Aumento de la temperatura máxima nocturna	Muy verosímil (90-99%)	Zamora y Salamanca
	Medianamente verosímil (33-66%)	Valladolid
Aumento de noches calientes	Muy verosímil (90-99%)	Zamora
	Verosímil (66-90%)	Valladolid
Aumento de días calientes	Virtualmente cierto (>99%)	Zamora
	Muy verosímil (90-99%)	Valladolid y Salamanca
Aumento de periodos fríos	Verosímil (66-90%)	Salamanca
Disminución de periodos fríos	Muy verosímil (90-99%)	Zamora
	Inverosímil (10-33%)	Valladolid
Aumento de periodos calientes	Muy verosímil (90-99%)	Zamora
	Verosímil (66-90%)	Valladolid
Aumento de la temperatura máxima y mínima en el día	Virtualmente cierto (>99%)	Valladolid y Salamanca
	Muy verosímil (90-99%)	Zamora
Aumento de los días con temperaturas máximas mayores de 25ºC	Virtualmente cierto (>99%)	Valladolid y Zamora
	Medianamente verosímil (33-66%)	Salamanca

a zonas tropicales y de altas latitudes donde es de esperar un aumento en su intensidad.

De seguir este aumento en la temperatura y en la disminución de la precipitación, la tendencia sería a tener:

a) Mayor número de heladas si se continúa experimentando la tendencia regional expuesta.

b) La intensidad de la variación térmica y pluviométrica será más evidente en el valle central de la zona de estudio por presentar los valores más altos de temperatura mensual, y los más bajos de precipitación; mientras que en los extremos de la zona de estudio la intensidad será importante pero menos evidente a lo que térmica y pluviométricamente se refiere.

Aun así esto se intensificará más debido a las variación que experimentarán la vegetación y la hidrografía debido al aumento de la temperatura (IPCC, 2007) y la disminución de las precipitaciones (Feinstein, 2008). Asimismo y de forma más específica, esta variación térmica y pluviométrica modificará la dinámica de los vientos y por lo tanto la estabilidad ecosistémica e hidrológica de las zonas de mayor altitud (en especial de la pequeña porción de la Sierra de Ávila) limitando la supervivencia de la biodiversidad actualmente existente y de los recursos hìdricos que nacen en estas zonas y alimentan al río Duero.

c) La distribución de la intensidad de estas afecciones en cuanto a la temperatura y precipitación se refiere, determinará la distribución de otras variables como la ETP, la ETR y el coeficiente de humedad.

d) El aumento de la temperatura suavizará los periodos de invierno e intensificará los meses de verano.

e) Los meses secos (aquellos donde la precipitación es escaza) es decir, Julio y Agosto serían más intensos llegando incluso a prolongarse la temporada seca.

f) Una tendencia prolongada a la aridez permanente producto de la disminución de la precipitación y la ETR, y del aumento de la ETP ocasionando déficit hídricos muy por encima del valor actual y reservas de agua muy bajas o inexistentes. Esto conllevaría a un aumento de los meses donde predomina totalmente una precipitación escaza produciendo un cambio en el tiempo de las características semiáridas de la zona de estudio a condiciones áridas; aspecto que se corresponde con lo expuesto en el cuarto informe del IPCC (2007).
g) Modificación de las características climáticas asumiendo condiciones de zonas subtropicales e incluso tropicales áridas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede apreciar que para la zona de estudio se puede encontrar un descenso generalizado de 2,7 Hm^3 anuales en las aportaciones, siendo el mes de Marzo el que registra mayores pérdidas y julio como el mes de menores pérdidas, considerando a su vez la significación estadística de los resultados.

Este comportamiento se identifica como una consecuencia de los cambios observados en el clima con un "grado de confianza alto", produciendo no solo una reducción en las aportaciones sino en la anticipación de los caudales máximos primaverales en numerosos ríos así como en los efectos sobre la estructura térmica y la calidad del agua de los ríos y lagos cuya temperatura aumenta al aumentar la temperatura atmosférica (IPCC, 2007).

Con un "grado de confianza alto", numerosas áreas semiáridas (como es el caso de la zona de estudio) experimentarán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático (IPCC, 2007), una tendencia que se observa con los resultados obtenidos en este estudio.

Considerando lo expuesto por Gallart (2009), los otros factores que pueden influir en la variación de las aportaciones pueden estar relacionados directamente con los usos del agua en la región, en especial aquellos asociados a los cultivos en regadío.

Asimismo, si se tiene en cuenta que la demanda hídrica en la demarcación supone más del 90% de las demandas consuntivas totales (aunque puede variar a futuro si se considera la pérdida de importancia que las actividades primarias están experimentando en los últimos tiempos), la disminución de las aportaciones hídricas amenazaría la estabilidad de la economía de la región sobre todo en la rentabilidad y el empleo, ya que el regadío mejora la capacidad de generar empleo en el medio rural de la región.

Esta posible afección se puede considerar grave si se tiene en cuenta que el 63% de la demarcación tiene vocación agrícola, amenazando la producción de alimentos tales como la cebada, el trigo, la remolacha, la alfalfa, las hortalizas, el girasol, las patatas, la avena y otros cultivos menos representativos como el maíz forrajero y las judías.

En el caso de los cultivos de secano, estos fenómenos no tienen una relación biunívoca simple con la cantidad de lluvia anual caída porque dependen también de otros factores, como la distribución estacional no solo de las lluvias, sino también de las temperaturas en relación con los diferentes momentos del ciclo vegetativo de los cultivos (Martínez Gil, 2006). Algo similar ocurre con la vegetación natural.

Estos efectos combinados y percibidos en la zona de estudio coinciden con los "impactos regionales proyectados" por el IPCC en su cuarto informe, donde se especifica que para la región de Europa del Sur las proyecciones indican un empeoramiento de las condiciones (altas temperaturas y sequías) en una región que es ya vulnerable a la variabilidad del clima, así como una menor disponibilidad de agua y una disminución del potencial hidroeléctrico, del turismo estival y, en general, de la productividad de los cultivos.

Existiendo dudas razonables sobre la posibilidad de una tendencia hacia el incremento de la frecuencia y la intensidad de los episodios de sequía, el aumento de la temperatura, el descenso de los caudales de los ríos, incluso la disminución de las precipitaciones es muy probable que estemos experimentando un estrés hídrico cuya intensidad aumentará de seguir la tendencia estimada.

Afección en la Vegetación

Las especies Quercus rotundifolia y pirenaica ocupan una posición intermedia entre los territorios del bosque caducifolio Atlántico centro-europeo y las formaciones mediterráneas xerófilas del sur de la Península Ibérica. La región favorable para su difusión y dominancia corresponde a ambientes submediterráneos caracterizado por cadenas montañosas que benefician la precipitación (Carvalho, 2005).

Las especies Quercus representan la quinta especie forestal española con 660.000 ha (Inventario Nacional Forestal 1986-1996). Se distribuye de Norte a Sur de la península

especialmente en el sector centro-occidental. Se ubican en zonas con una pluviometría de 400 a 600 mm y con alguna sequía estival, una elevada continentalidad y una dependencia de la luz solar. Es bien sabido que la pluviometría constituye un factor decisivo en la dinámica de los ecosistemas mediterráneos. En el caso de la Quercus rotundifolia y pyrenaica ocurre lo siguiente: gran parte del agua (85%) atraviesa el estrato arbóreo, un 1% desciende por las ramas y troncos hasta el suelo y el 15% restante de agua se evapora (Carvalho, 2005) por el calentamiento de la superficie edáfica o bien, la absorben las raíces y se evapora una vez alcanza las hojas (evapotranspiración; Gallardo et al, 2000)

Asimismo, dichas especies se asientan en suelos ácidos, pobres y de baja profundidad de la textura ligera y con baja retención de agua. Pertenecen especialmente a suelos limo-arcillosos que favorecen y conserven más la humedad. Observando las características geológicas de la zona de estudio se puede concluir que se extiende por casi toda el área de estudio, salvo en las litologías carbonatadas (Carvalho, 2005).

Las variaciones del contenido de humedad del suelo a lo largo del periodo vegetativo son un aspecto determinante en el desarrollo de esta especie. Gran parte del periodo de actividad vegetativa coincide con una estación estival seca que ocasiona un déficit estival, variable de año por año, más en relación con la distribución de la lluvia que con la intensidad de estas (Gallardo et al, 2000). El agua invernal es aprovechada como reserva hídrica lo que implica por lo tanto una gran lixiviación del suelo y como consecuencia una disminución de la fertilidad que se manifiesta especialmente en una disminución de las bases, el grado de saturación y el pH (Gallardo et al, 1996). Se puede establecer que en el área de los robles se debe considerar buen año aquellos en el que las lluvias son abundantes antes y durante las primeras fases del ciclo vegetativo (Gallardo, 2005).

La retranslocación es un fenómeno que permite la conservación de un cierto nutriente en una planta, reduciendo sus pérdidas por lavado foliar desde la hojarasca desprendida del dosel. Una retirada prematura de los nutrientes que cada hoja posee tendría un efecto negativo sobre la eficiencia fotosintética de las hojas durante el periodo que les resta de vida (Martín et al, 1996).

Sin embargo, Martín et al. (1996) argumentan que este fenómeno ha experimentado una caída gradual en esta especie debida posiblemente al estrés hídrico en regiones de clima árido y semiárido y, por lo tanto, las especies propias de lugares xéricos muestran índices de retranslocación más bajos, y como consecuencia, la influencia del agua sobre la eficiencia de la retranslocación sería indirecta ejerciendo su efecto sobre la duración del periodo de abscisión (Martín et al, 1996). Por lo tanto un déficit hídrico implicaría un escaso crecimiento de los árboles y una caída temprana de las hojas en respuesta a la sequía (Gallardo et al, 2000). De esta forma se evidencia que en los ecosistemas mediterráneos semiáridos resulta, probablemente, más apremiante dar respuesta a los factores derivados del estrés hídrico que a los derivados del estrés nutricional (Martin et al, 1996).

Esta manifestación se corresponde a las variaciones en la precipitación y en la temperatura (que a su vez incide en el resto de los factores como la humedad y la evapotranspiración) cuya tendencia positiva (aumento) implica una anomalía climática cuyas consecuencias, por ejemplo, se evidencian en la alteración de procesos naturales que tienen lugar en estos ecosistemas. Esto implica que de seguir una tendencia negativa (disminución) en las precipitaciones, la pluviometría sería cada vez más baja o insuficiente para mojar totalmente un suelo profundo configurando un subsistema edáfico denominado “cerrado” ó “exudativo” (Gallardo et al., 2000) sometiendo a esta especie a un estrés hídrico permanente.

Conclusiones

Teniendo en cuenta la definición de estrés hídrico (water stress en inglés) definida por el PNUMA, para la zona D-11 Bajo Duero se ha observado con una alta probabilidad (90%) un deterioro de los recursos de agua dulce en términos de cantidad. Esto se manifiesta por un descenso de 2,7 Hm3 anuales en las aportaciones del río Duero y posiblemente influenciado (con un 80% de probabilidad) por un aumento de la temperatura media de 1,3˚C y una disminución aparente de las precipitaciones (en el periodo 1945-2010).

Asumiendo la existencia de estrés hídrico a partir de los resultados obtenidos de este estudio, se aprecia que de persistir estas condiciones anómalas la riqueza forestal característica de la zona de estudio representada por las especies Quercus pyrenaica y Quercus rotundifolia cuya dinámica depende de la precipitación, la humedad y la

temperatura, se verían amenazadas por alteración de sus procesos naturales al llevar forzadamente el subsistema edáfico de un régimen "percolativo" a uno "exudativo" crítico, que se manifestaría por un escaso crecimiento de los árboles y una caída temprana de las hojas.

Asimismo el estrés hídrico se intensificaría por la demanda de los usos consuntivos en Zamora donde se manifiesta un aumento de la población en los próximos años (mientras que en el resto de poblaciones de la zona de estudio se evidencia una disminución). Esto perjudicaría, entre muchas cosas, la economía y el bienestar de la región al ser una zona dependiente del sector primario (teniendo en cuenta que la principal vocación de la demarcación es para uso agrícola) y este a su vez, dependiente de la disponibilidad del recurso hídrico.

Por otro lado realizar una estimación del deterioro de los recursos de agua dulce en términos de cantidad relacionada con el cambio climático implica un ejercicio parcial a una apreciación absoluta, ya que sería necesario relacionar otros factores como los antrópicos para determinar si la disminución de las aportaciones se relaciona a su vez con la demanda y el consumo de la población; o bien por las eventuales perdidas que experimente el río Duero por la heterogeneidad litológica de la zona de estudio. Asimismo el estrés hídrico hasta ahora evidenciado debe comprobarse con datos de campo que certifiquen fielmente la existencia de este fenómeno en la zona de estudio. Aun así, el presente trabajo significa un punto de partida para un estudio más exhaustivo y detallado del estrés hídrico en la zona D-11 Bajo Duero, cuyo éxito se refleja en los resultados obtenidos y coincidentes con los modelos oficialmente elaborados y aceptados.

Referencias

Aguilera, H., Murillo, J.M. 2006. "Estimación de la recarga natural en cuatro acuíferos kársticos del alto Vinalopó (Alicante) y relación con el cambio climático". Boletín Geológico y Minero, Madrid, 117 (Núm. Monográfico especial) ISBN: 0366-0176

ASPAN (Associação Pernambucana de Defesa da Natureza) 1992. Tratado Sobre as zonas áridas e semi-áridas. Aprovado no Fórum Internacional de Organizações Não Governamentais e Movimentos Sociais, no âmbito do Fórum Global ECO 92, Rio de Janeiro.

Carvalho, J. 2005, O Carvalhonegral. Universidade de Tras-os-montes e Alto Douro. Bragança, ed. I, p. 20-41

Feinstein International Center 2008.The Humanitarian Costs of Climate Change.Medford, USA: Tufts University, ed.I.

Gallardo, J.F, Vicente, M.A., Moreno, G. (2000). "Lluvia y bosque mediterráneo". En: Investigación y Ciencia" Nº 286, Prensa científica S.A, P. 70-76.

Gallardo, J.F. 2005. "Ciclo biogeoquímico". En: O Carvalho negral. Edita: J. Carvalho)-Universidade de Tras-os-montes e Alto Douro. Bragança, ed. I, p. 46-52

Gallart, F. 2009. Cambios temporales observados en las series de caudales. Agua y cambio climático, diagnosis de los impactos previstos en Cataluña, Agència Catalana de l'Agua, Generalitat de Catalunya, 1ª edición,

IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza, ISBN 92-9169-322-7

Martín, A., Santa Regina, I., Gallardo, J.F. 1996. "Eficiencia, retraslocación y balance de nutrientes en bosques de QuercusPyrenaicabajo diferente pluviometría en la Sierra de Gata (Centro-Oeste Español). En: Revista Ecología, Nº.10, p. 79-93

Martínez Gil, F.J. "Las sequias en España, un fenómeno recurrente". En: Memorias del Congreso homenaje al Douro/Duero y sus ríos: Memoria, cultura y provenir- Fundación Nueva cultura del agua(Zamora 27 – 29 de abril de 2006), p. 1-14.

Sahuquillo, A., Custodio, E., Escaler, I. 2008. *Efectos hidrológicos del Cambio climático y adaptación a los cambios con medidas de gestión*. En: Memorias del Simposio sobre la Evaluación crítica de las previsiones sobre el cambio climático: una perspectiva científica. (Madrid, 2-3 de abril de 2008), p. 33.

Vera J.A. 2004. Geología de España. Edita: Sociedad Geológica de España, Instituto Geológico y Minero de España. ISBN: 84-7840-546-1. Madrid, p. 550-554.

World Meteorological Organization 2010. Guide to Climatological Practice. WMO-No. 100, Third Edition, Chapter 2 – 5, 182 pp.

Problemática del agua en el noroeste bonaerense. Experiencia de gestión comunitaria en una población pequeña

Eleonora Moschione[1], Emilia Bocanegra[1,2], Guillermo Casanova[3], Santiago Leiva[4], Patricio Picco[4]

[1]U. A. Mar del Plata, UTN, Buque Pesquero Dorrego Nº 281 Puerto Mar del Plata, Argentina.
[2]Universidad Nacional de Mar del Plata, CIC. Funes 3350. Mar del Plata.
[3]Instituto Agrotécnico Padre Castellaro. Rivadavia 665, 6424 Berutti, Trenque Lauquen.
[4]Fac. Regional Trenque Lauquen, UTN, Racedo Nº 298. Trenque Lauquen, Argentina.

Mail de contacto: emoschione@yahoo.com.ar

RESUMEN

El recurso hídrico subterráneo en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, muestra una problemática variada en cuanto a disponibilidad y calidad del agua para sus distintos usos. Berutti, pueblo agrícolo-ganadero del Partido de Trenque Lauquen, presenta escasez de agua apta para bebida humana, especialmente debido a su elevada salinidad. El objetivo del trabajo es presentar un análisis de la situación del suministro de agua en el pueblo de Berutti, desde la perspectiva de la gestión comunitaria. Se realizó un muestreo de agua, diagramas hidroquímicos y valoración de la experiencia de gestión realizada por un Instituto Agrotécnico local. La incorporación de un equipo de ósmosis inversa desde 2007 permite una desalinización del agua, haciendo disponible una cuota de 20 litros/familia/semana. El proceso de adquisición del equipo, uso y aprovechamiento del mismo es un interesante ejemplo de acción ante la problemática de disponibilidad de agua apta para consumo en comunidades pequeñas.
Palabras clave: hidroquímica, gestión comunitaria, agua potable

ABSTRACT

The ground water resource in Northwest area of Buenos Aires Province, shows a wide variety of problems about quality and quantity of water for different uses. Berutti, is a livestock and farming village in Trenque Lauquen County (Buenos Aires Province) with shortage of drinking water availability due its high salinity. The objective of this paper is to present an analysis of the water supply situation in the village of Berutti, from the perspective of the community management. Water sampling, hydro chemical plots and assessment of the management experience of a local agro technical school was made. The use of reverse osmosis technology since 2007 allows desalination, providing a quote of water of 20 liters/family/week. The process to get the equipment, its use and profit by the community is an interesting example for action related to the lack of drinking water availability in small towns.
Key words: hydrochemistry, communitarian management, drinking water

Introducción

El acceso al agua para consumo humano es un factor clave para el desarrollo económico y social en todas las comunidades. La región noroeste de la Provincia de Buenos Aires presenta situaciones muy diversas en referencia a deficiencias de cantidad y calidad de agua, generando problemáticas de difícil solución, especialmente para las poblaciones pequeñas.

Un estudio sobre los efectos de la explotación en la calidad del agua que abastece a la ciudad de Trenque Lauquen (Bocanegra et al, 2012) indica que el agua del acuífero incrementa su salinidad con la profundidad, y evoluciona hacia un mayor contenido de cloruro, disolución de yeso y precipitación de calcita. Las medidas de gestión en los últimos años, que condujeron a realizar perforaciones más someras y con menor caudal de extracción, han permitido que la tendencia creciente a la salinización haya disminuido su tasa de evolución, mejorando la calidad del agua subterránea.

El pueblo de Berutti, perteneciente al Partido de Trenque Lauquen, presenta condiciones de infraestructura adecuadas para garantizar el abastecimiento de agua a la comunidad, sin embargo, la calidad del recurso

hídrico disponible en la zona hace que no sea posible contar con agua apta para consumo humano en los hogares. El principal instituto educativo del lugar ha logrado aportar una mejora a la situación mediante el tratamiento de agua por ósmosis inversa y entrega de bidones a las familias.

El objetivo es presentar un análisis de la situación del suministro de agua en el pueblo de Berutti, desde la perspectiva de la gestión comunitaria.

El presente trabajo forma parte del Proyecto PID "Calidad del agua subterránea y gestión del recurso hídrico en el noroeste de la Provincia de Buenos Aires", que desarrollan en forma conjunta profesionales de la UTN - Mar del Plata y la UTN - Trenque Lauquen.

La gestión participativa

Concepto de gestión participativa

El proceso de planificación y gestión implica una acción transformadora de la realidad, una intervención en un sistema que debería estar siempre legitimada socialmente y guiada por la premisa de equidad (Massone et al, 1999).

Para Robirosa (1994) la legitimación social de un proceso de planificación se sustenta en tres componentes:

- objetivos de la transformación,
- el máximo de racionalidad posible en la toma de decisiones
- acción interventora de la realidad guiada por las dos anteriores.

No quedarían satisfechas las expectativas sociales si falta alguno de los tres componentes. Si hay objetivos de transformación y racionalidad pero falta la acción interventora, sólo se producen documentos. Si hay racionalidad y acción interventora pero falta el objetivo de transformación social, la actividad resulta en la continuidad de un esquema inequitativo. Si hay objetivos de transformación y acción interventora, pero falta la racionalidad en la toma de decisiones, se ejecutarán acciones improvisadas, ineficientes y muy probablemente con despilfarro de recursos y esfuerzos.

La estrategia participativa en la gestión presenta dificultades y beneficios. Algunas de las dificultades más significativas que encara la propuesta participativa en la gestión social planificada son: una cultura social que espera todo del Estado, la falta de experiencias efectivas de gestión participativa, las diferencias de poder existentes entre los actores sociales participantes y la escasez de metodologías probadas para procesos participativos en escenarios convocados por el Estado.

Sin embargo, a partir de las distintas percepciones, experiencias y puntos de vista de los distintos actores puede llegarse a un mejor diagnóstico, una mejor interpretación de la realidad. Seguramente el resultado no será una reconstrucción objetiva de la realidad, pero al menos será intersubjetiva tendiendo a disminuir las subjetividades a partir de la interacción grupal. Además, este tipo de gestión provee el ámbito adecuado para confrontar y negociar los distintos intereses y objetivos de los participantes, permitiendo la elaboración del consenso necesario para llevar adelante el proyecto; a medida que la interacción va avanzando, las partes van adquiriendo un creciente compromiso con lo que se va avanzando en el procesamiento del proyecto (Robirosa, 2004).

Gestión participativa de los recursos hídricos

En los documentos elaborados durante la Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente (Dublin, 1992) se define el rol del agua desde la perspectiva social, económica y medio ambiental y se destaca la participación de los usuarios en la gestión.

La Asamblea General de la Red Internacional de Organismos de Cuenca (RIOC, 1998), manifestó que la experiencia adquirida en materia de gestión del agua, puso en evidencia la necesidad de asociar de manera institucional "la sociedad civil", en mecanismos de gestión descentralizada de los recursos hídricos, con el fin de buscar una satisfacción óptima y adaptada a necesidades diversificadas y en constante crecimiento.

El Consejo Hídrico Federal (2002), en sus Principios Rectores de Política Hídrica en Argentina, propicia la participación de los usuarios del agua en determinados aspectos de la gestión hídrica, fomentando la creación y fortalecimiento de "organizaciones de usuarios" del agua en los cuales delegar responsabilidades de operación, mantenimiento y administración de la infraestructura hídrica.

Los usuarios forman parte de la población con características comunes en sus actividades económicas, sociales, o institucionales, y tienen intereses en los recursos hídricos. Son usuarios los prestadores del servicio de suministro, los destinatarios del agua, los ambientalistas que representen a la Naturaleza, la población potencialmente afectada por la explotación de los recursos hídricos y usuarios de otros recursos que pueden ser afectados.

La participación de los usuarios en la gestión de los recursos hídricos encuentra limitaciones y desincentivos de orden político, legal, institucional y económico financiero. También son limitados e incipientes los mecanismos formales de participación recogidos en la normativa nacional y de las provincias, la voluntad política de instituir procesos informados de decisión en temas de interés general, el acceso a la información por parte del público, las capacidades técnicas de las organizaciones no gubernamentales y la concientización de la comunidad en materia de uso racional y sustentable de los recursos hídricos.

El hecho de que la participación pública en la gestión del agua en muchos casos esté limitada a ciertos grupos de interés o a determinadas etapas del proceso gestor, hace que la participación no sea verdaderamente efectiva.

En general es posible distinguir tres fases en la evolución de programas de participación pública (Llamas y Custodio, 2002):

- Se entiende la participación en un sentido muy limitado, como una necesidad de educar e informar al público de las decisiones de gestión. Ello no es una participación verdadera, sino más bien una comunicación unilateral. Por consiguiente, el público no tiene la posibilidad de influir en el proceso de toma de decisiones.
- La comunicación entre las agencias gestoras y el público es bidireccional. La opinión pública puede, en cierto grado, influir en las decisiones de gestión. Aunque el proceso es más participativo, es todavía el sector público el que controla el proceso de toma de decisiones.
- Tiene lugar la participación auténtica: las agencias gestoras pasan, de informar al público y recibir sus opiniones, a decidir realmente con el público. El esfuerzo requerido por parte de las agencias gestoras es importante, como también lo son los posibles riesgos que ello conlleva. Es en esta etapa cuando se vuelve necesario diseñar mecanismos de resolución de conflictos con el objetivo de alcanzar soluciones que sean aceptables para todos. Este proceso requiere más esfuerzo y tiempo, pero la puesta en práctica de planes establecidos de mutuo acuerdo será sensiblemente más fácil.

Según la Asociación Mundial para el Agua, (2000), el concepto de gobernabilidad se refiere a la capacidad social de movilizar energías en forma coherente para el desarrollo sustentable de los recursos hídricos e incluye la capacidad de diseño de políticas públicas que sean socialmente aceptadas, orientadas al desarrollo sustentable del recurso hídrico, y la capacidad de hacer efectiva su implementación por los diferentes actores involucrados.

Para alcanzar la plena gobernabilidad del sector hídrico se requiere del compromiso y el accionar conjunto de los organismos de gobierno y de los usuarios del agua para democratizar todas las instancias de la gestión hídrica, hacer uso de los respectivos conocimientos y experiencia para aportar eficacia y eficiencia a dicha gestión y asegurar el control social que evite la corrupción. Se debe fomentar la participación efectiva de toda la sociedad tanto en la definición de objetivos comunes para la planificación hídrica – que pueden derivar o no de responsabilidades legales y estar o no establecidos formalmente – como en el proceso de toma de decisiones y en el control de la gestión, en un ejercicio de verdadera responsabilidad compartida. La descentralización de funciones debe alcanzar el nivel local más próximo al usuario del agua que resulte apropiado, promoviendo la participación de organizaciones comunitarias en la gestión del agua.

Caracterización socio-económica del área de estudio

Berutti es un pueblo de la Provincia de Buenos Aires, ubicado sobre la ruta provincial Nº 5, a 24 km de la ciudad de Trenque Lauquen (Fig. 1).

Fue fundado en el año 1890, siendo la actividad agropecuaria protagonista en el desarrollo económico y social del lugar desde sus inicios (Municipalidad de Trenque Lauquen, 2013). Asimismo y con la llegada del tren, el comercio se desarrolló rápidamente para responder a las demandas de las colonias agrícolas y también hubo un desarrollo industrial importante con la instalación de una grasería, una fábrica aceitera, un molino harinero, y una fábrica textil.

La población fue creciendo en un principio junto con el desarrollo económico de la localidad, llegando a superar los 2000 pobladores.

Sin embargo, las inundaciones en 1974 y en la década de 1980 en la región, y el cierre de las principales industrias locales provocó un descenso demográfico del 7.7% entre el período 1991-2001, pasando de 947 a 874 habitantes, aunque la situación ha logrado revertirse, llegando a 1150 habitantes (INDEC, 2010).

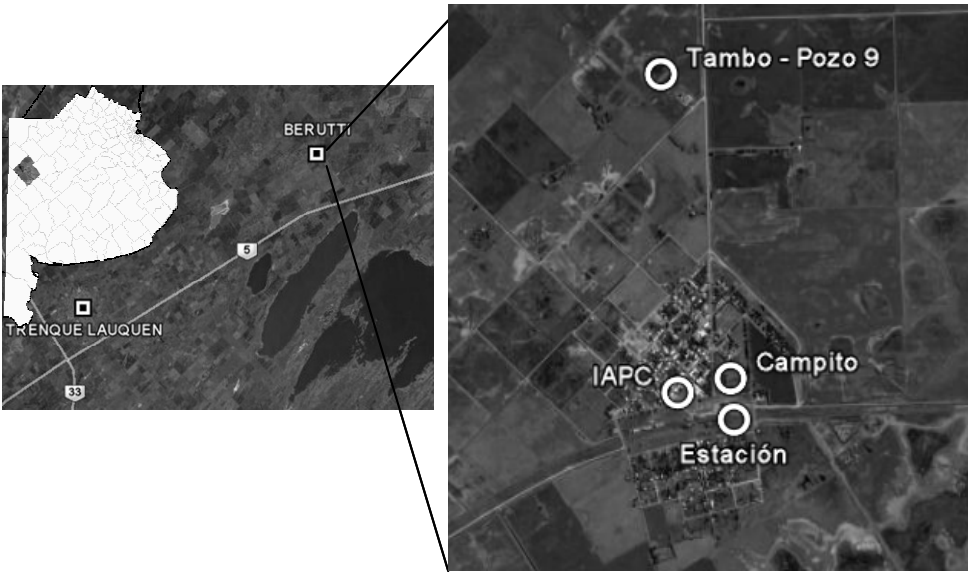


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

.

Berutti es una localidad que cuenta con los principales servicios urbanos, sin embargo, el servicio de agua corriente presenta deficiencias originadas en las condiciones de calidad del recurso hídrico disponible en la región como fuente única de agua, por lo cual la red de agua corriente se usa únicamente para uso doméstico y no para consumo humano.

El Instituto Agrotécnico Padre Castellaro (IAPC), que desarrolla una amplia labor educativa, se ha convertido en el mayor empleador de Berutti, con 50 personas, seguido por la municipalidad y la escuela municipal, que sólo posee educación primaria.

El IAPC ha instalado con el apoyo de la comunidad un sistema de tratamiento por ósmosis inversa, que permite un acceso, limitado pero efectivo, a agua de mejor calidad para la población.

Tecnología de tratamiento del agua

El proceso de ósmosis inversa (OI) es un tratamiento que reduce drásticamente la concentración de todas las especies químicas presentes en un agua natural y/o residual. Consiste en un proceso en el cual se fuerza el paso del agua a tratar a través de una membrana semi-permeable (poliamidas, polieterureas, polisulfonas), desde una solución más concentrada a otra más diluida, mediante la aplicación de presión.

De este modo, el producto final resulta ser un agua de muy baja salinidad (permeado), generando como contraparte una solución rica en sales (concentrado o rechazo) que debe ser descartada adecuadamente.

La tecnología es de amplia aplicación en el tratamiento de aguas en la industria farmacéutica, química y alimenticia. También es de uso masivo en la obtención de agua potable por desalinización del agua de mar en muchos sitios en los que ésta resulta la única fuente posible (Moschione, 2010).

Metodología

Se realizó un relevamiento de datos de campo en la zona de estudio, que fueron recopilados durante un monitoreo realizado en la zona en el mes de noviembre de 2012, incluyendo muestreo de agua para obtención de parámetros fisicoquímicos.

Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis Industriales de la Universidad Tecnológica Nacional, Unidad Académica Mar del Plata, aplicando metodologías de análisis estandarizadas (APHA, 1998).

Se realizó un análisis estadístico básico de los datos y construcción de diagramas hidroquímicos mediante el programa Aquachem 4.0 (Calmbach, 1998).

Resultados

Calidad fisicoquímica del agua de la zona

En el área de Berutti se colectaron 4 muestras de agua subterránea provenientes de pozos del IAPC destinados a consumo humano (Estación), bebida animal (Tambo), limpieza de maquinarias del Tambo Modelo (Pozo 9), y limpieza de corrales y riego de la Huerta educativa (Campito). Se colectó además una muestra del ramal que viene directo del pozo que constituye la fuente de agua para consumo de la población (agua cruda) y una muestra de agua tratada luego de su proceso por ósmosis inversa, ambas obtenidas en las instalaciones del IAPC.

En la tabla 1 pueden observarse los resultados de laboratorio obtenidos para las muestras evaluadas.

La composición química del agua varía entre bicarbonatada sódica a clorurada sulfatada sódica. Esta evolución puede apreciarse en los diagramas de Schoeller y de Piper con la distribución de componentes iónicos mayoritarios de las aguas de la zona (Fig. 2).

El valor de conductividad del agua cruda es de 3710 µS/cm, con valores mayores en otras perforaciones, y alcanzando un máximo registrado de 25450 µS/cm.

El catión sodio mostró una oscilación ente 555 y 5950 mg/l, mientras que en diferentes pozos se registraron valores máximos de cloruros, sulfato y bicarbonato de 7736, 2477 y 1170 mg/l respectivamente.

Muestra	Agua cruda	Estación	Campito	Tambo	Pozo 9	Agua tratada
Color (Pt.Co)	<5	15	50	50	<5	<5
Turb. (NTU)	<1	3	<1	10	1	<1
Cond. (uS/cm)	3710	3890	5730	6890	25450	150
pH	8.01	8.39	8.36	8.03	7.72	
ST(mg/l)	2297	2424	1857	2176	8574	137
Na(mg/l)	555	908	1245	1437	5950	27
K (mg/l)	17	22	55	44	110	< 1
Ca (mg/l)	102	8	30	81	145	3
Mg (mg/l)	79	20	59	83	528	< 1
Alc. total (mg/l)	158	1041	926	692	659	3
Dureza (mg/l)	583	103	322	550	2562	5
Cl (mg/l)	891	462	1035	1528	7736	36
SO_4(mg/l)	256	185	434	582	2477	3
NO_3(mg/l)	51	109	135	7	32	7
NO_2(mg/l)	<0.1	0.2	0.6	0.7	<0.1	<0.1
NH_4(mg/l)	0.08	0.11	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

Tabla 1. Datos fisicoquímicos de calidad de agua. Muestreo noviembre 2012

Calidad del agua tratada

El agua que se obtiene como producto luego del tratamiento por ósmosis inversa presenta una muy baja salinidad, con una conductividad de 150 uS/cm y residuo seco de 137 mg/l (tabla 1).

El agua tratada es de tipo clorurada sódica y con muy bajas concentraciones de calcio, sulfato, nitrato y bicarbonato.

Los parámetros de calidad se encuentran dentro del rango de referencia indicado por el Código Alimentario Argentino (CAA, 2012) para agua potable.

El agua se distribuye según se obtiene del equipo de ósmosis inversa. Sería conveniente aplicar una dosis de cloro que garantice el efecto residual de este desinfectante según establece la normativa vigente.

El concentrado de sales producto de la osmosis inversa, se envía a la red de saneamiento.

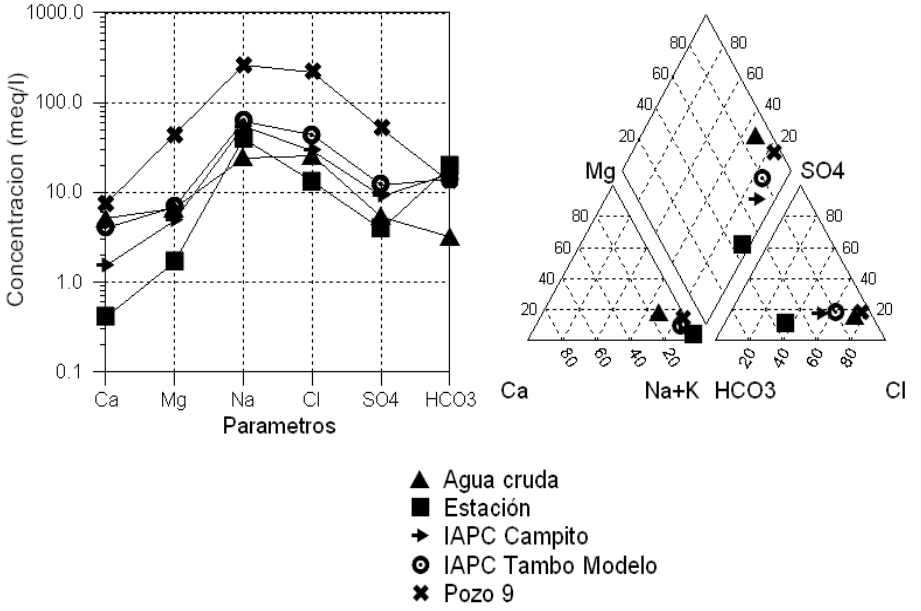


Figura 2. Diagramas de Schoeller y de Piper del agua subterránea en Berutti.

Experiencia de Gestión Comunitaria

El Instituto Agrotécnico Padre Castellaro fue creado en 1963 con el objeto de ofrecer una salida laboral y evitar el éxodo de los jóvenes, permitiendo completar sus estudios en el pueblo de Berutti y acceder a conocimientos relacionados con su ámbito, el rural.

En los últimos años el Instituto se ha ido transformando en un espacio de encuentro para la población de Berutti y punto de partida de diferentes actividades comunitarias que promueven el trabajo conjunto de alumnos, docentes y pobladores en proyectos de impacto en el bienestar de la sociedad local.

La institución promueve alianzas con productores rurales, empresas vinculadas al agro y fundaciones orientadas al desarrollo local, mediante las cuales pusieron en marcha capacitaciones, pasantías y una serie de emprendimientos productivos.

En total, allí se educa a 150 jóvenes, de los cuales 57 viven en la residencia de la escuela. Los jóvenes aprenden las tareas de la huerta, realizan actividades agrícolas y ganaderas, producen miel, colaboran con el trabajo del tambo y producen quesos.

Atendiendo al problema de la falta de agua apta para consumo humano, la escuela elaboró un proyecto, que fue presentado con el padrinazgo del grupo CREA, en el concurso "Semillero del Futuro". La propuesta ganó el concurso y, con el premio se compró un equipo de ósmosis inversa, inaugurando el sistema en el año 2007 (Repetto, 2011).

La Asociación de Fomento local se ocupó de desviar el agua cruda del ramal madre de distribución hacia el Colegio, y la municipalidad de Trenque Lauquen acondicionó el lugar para hacer posible la puesta en marcha del equipo y el fraccionamiento del agua tratada. (Fig. 3).

Mediante el trabajo coordinado de docentes y alumnos, se entregan bidones de 20 litros de agua por semana a todas las familias del pueblo. En algunos casos son retirados en la escuela y, en otros, los mismos alumnos realizan entrega a domicilio para aquellos que no pueden acercarse a la institución. El servicio es gratuito, aunque los vecinos colaboran según sus posibilidades para garantizar la continuidad del sistema que ha funcionado ininterrumpidamente desde sus inicios hasta la actualidad.

La UTN Facultad Regional de Trenque Lauquen es la responsable de la recuperación y mantenimiento de la membrana del sistema de tratamiento.

Figura 3. Equipo de ósmosis inversa, tanque de acopio de agua tratada y tarea de distribución

Conclusiones

Para lograr una gestión que sea social y ambientalmente eficaz es necesaria la participación organizada de los usuarios.

Ante la necesidad de la comunidad derivada de la limitante al desarrollo humano que representa contar con agua de mala calidad, el principal instituto educativo de Berutti ha logrado aportar una mejora a la situación mediante el tratamiento de agua por ósmosis inversa y la entrega de bidones a las familias.

Dado que las dimensiones del equipo no resultan suficientes para cubrir por completo las necesidades de agua de la población, sería conveniente plantear a futuro aumentar el suministro mediante otro dispositivo como el actual.

Si bien en la Provincia de Buenos Aires existen cooperativas de provisión de agua que realizan el tratamiento en plantas pequeñas de ósmosis inversa para reducir la concentración de arsénico, distribuyendo una cuota familiar en bidones para alimentación, y dejando el agua de la red para los otros usos, no se conocen en la provincia experiencias de gestión participativa que involucren instituciones educativas, el sector económico productivo y el municipal.

En Berutti, la participación y el compromiso de los diferentes sectores de la sociedad local

han hecho posible que el proyecto de la planta desalinizadora resulte exitoso y sostenible en el tiempo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades, docentes y alumnos del IAPC, por su disponibilidad para el desarrollo del presente trabajo, facilitando la visita a las diversas instalaciones educativas, así como la medición de niveles de agua y muestreo hidroquímico en pozos de la institución.

Referencias

APHA. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC, 1100 pp.

Asociación Mundial para el Agua. (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos,* GWP TAC Background Papers Nº 4. www.gwpforum.org/gwp/library/TAC4sp.pdf

Bocanegra, E., Moschione, E., Picco, P., Leiva, S. (2012). Herramientas hidrogeoquímicas aplicadas a la evaluación de la explotación del acuífero de Trenque Lauquen, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Actas XI Congreso Latinoamericano de Hidrogeología*. Cartagena de Indias. Colombia. 5 pág.

Calmbach, L. (1998). *AQUACHEM Aqueous Geochemical Anlisis, Plotting and Modeling*. Waterloo Hydrogeologic INC. Waterloo, Ontario, Canadá.

Código Alimentario Argentino. Cap. XII. Art. 982 www.anmat.gov.ar/alimentos/codigoa

Consejo Hídrico Federal (2002). http://www.cohife.org.ar/cohife-principios3.html#26

INDEC. (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. www.censo2010.indec.gov.ar

Llamas, R., Custodio, E. 2002. Acuíferos explotados intensivamente. *IHP-VI. UNESCO. Series on Groundwater*. Nº 4.

Massone, H., Cionchi, J.L., Bocanegra, E.M. y Lizardo C. (1999). Gestión de acuíferos y participación comunitaria. El Comité de Usuarios como herramienta de gestión. En: *Hidrología Subterránea. Serie de Correlación Geológica* N°13:539-546. Tucumán.

Moschione, E. (2010). "*Evaluación integral de la problemática de nitratos en aguas subterráneas en el sudeste de la provincia de buenos aires. Alternativas de tratamiento y solución con tecnologías disponibles*". Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, UTN-FRBA. 166 págs.

Municipalidad de Trenque Lauquen. (2013). http://www.trenquelauquen.gov.ar/nuestros-pueblos/Berutti/

Repetto, J.L. (2011). Haciendo Escuela. *Revista CREA. Ideales Reales* Nº 3. http://www.aacrea.org.ar/lideres/images/ideales-reales/RevistaIdealesReales3Partel.pdf

R.I.O.C. (1998). La participación de los usuarios en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Asamblea General de la Red Internacional de Organismos de Cuenca. San Salvador de Bahía, Brasil. 1-4 Diciembre 1998. 9 pág.

Robirosa, M. (1994). Organización y Gestión Comunitaria. Publicaciones del curso de posgrado GADU (CIAM, FAU, UNMdP).

Robirosa, M. (2004). La participación en la gestión: justificación, malos entendidos, dificultades y estrategias. *Revista Mundo Urbano*. Nº 18. Universidad Nacional de Quilmes.

Agua subterránea y sociedad en regiones áridas.

Caso de estudio Algarrobo del Águila, La Pampa, Argentina

Eleonore Ploil [(1)]***, Carlos J. Schulz*** [(2)] ***y Matalón Patricia*** [(3)]

[(1)]HochschuleRheinMain, Facultad de CienciasSociales,Kurt-Schumacher-Ring 1865197 Wiesbaden
[(2)]Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Avenida Uruguay N° 151 Santa Rosa, La Pampa, Argentina. Teléfono 54 2954 425166.
[(3)] Senado de la Nación, Senado de la Nación Argentina Hipólito Yrigoyen 1849 (1089) Capital Federal Tel. +54-11-4010-3000
Mail de contacto: cjschulz@exactas.unlpam.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo forjar un análisis del rol que cumplen las aguas subterráneas en un sector con extrema aridez como es el Oeste de La Pampa. Para el mismo se toma, como caso de estudio la región periférica a la localidad de Algarrobo del Águila.Como resultado se llega a la conclusión de que, ante la falta de un recurso de agua superficial permanente (el único en la zona es el rio Atuel, cuyo escurrimiento fue interrumpido por la Provincia de Mendoza) las aguas subterráneas, aunque con pozos de muy bajo rendimiento y elevada concentración de sales, es la única alternativa para el desarrollo económico de la región a partir de una correcta distribución de las perforaciones basado en el conocimiento profundo de la Hidrogeologia y dentro de un marco legal que sirva de instrumento de gestión para el más eficiente aprovechamiento de los campos naturales, con una externalidad positiva para la provincia y el ambiente en general.
Palabras clave: Aguas Subterráneas, La Pampa, Sociedad.

ABSTRACT

This work aims to build an analysis of the role that groundwater in an area with extreme aridity as is West of La Pampa. For it is taken as a case study to the peripheral region of the Eagle Algarrobo. As a result, concludes that, in the absence of a permanent surface water resource (the only one in the area is the river Atuel, whose runoff was interrupted by the Province of Mendoza) groundwater wells although very low yield and high salt concentration, is the only alternative to the economic development of the region from the correct distribution of the holes based on the knowledge of the hydrogeology and within a legal framework to serve as a management tool for the more efficient utilization of natural areas, with a positive externality for the province and the environment in general.
Key words: Groundwater, La Pampa, Society.

Introducción

En este trabajo se presentan los primeros resultados de un proyecto de investigación que se lleva adelante sobre una problemática social vinculada a las aguas subterráneas en el extremo árido Noroeste de La Pampa. Las mismas cumplen un rol fundamental en el desarrollo productivo y la vida de las personas ya que son el único sustento que se tienen para su uso ganadero, llámese ganadería vacuna y chivas de corral.

Es por eso que, cuando se hace referencia a las zonas áridas y semiáridas del planeta, se está denominando, indudablemente, áreas que carecen del agua en cantidades suficientes como para satisfacer sus variadas necesidades. Sin embargo, estas áreas poseen características ecosistémicas que las diferencian nítidamente de otras. Así, por ejemplo, es posible destacar en ellas el tipo de vegetación que sustentan, la fragilidad manifiesta de los ecosistemas inmersos, la presencia de poblaciones humanas que viven al límite de sus posibilidades y la escasa importancia económica que se les asigna, salvo que dichas áreas contengan recursos naturales valiosos no renovables (oro, cobre, plata, petróleo, etc.), o sean zonas destinadas al turismo o a actividades de otra índole, como las militares o la experimentación científica. De igual forma, estas áreas se caracterizan por la presencia importante de procesos de desertización, todo lo cual hace más drásticas las condiciones de vida de las poblaciones que las habitan. En el marco descrito, el elemento diferenciador de estas zonas, lo constituye la

carencia de recursos hídricos, los cuales son aportados por las aguas subterráneas, aunque sea en cantidades bajas o muy bajas, con lo que se configura un cuadro difícil de predecir. Asimismo, las poblaciones ligadas a estos territorios y los consiguientes usos que hacen del agua, provocan una demanda social de regulación de este recurso, lo que hace que en innumerables ocasiones se den fuertes conflictos entre personas y/o comunidades, dada la importancia estratégica del agua para el crecimiento económico de estas regiones.

Lo anterior configura un contexto en donde se aprecia, por una parte, una alta demanda de recursos hídricos, y por la otra, una escasa oferta natural. Las situaciones descritas generan irremediablemente, más temprano o más tarde, conflictos de todo tipo, a los que se debe responder con esquemas de solución. Para ello, se requiere una cultura que supere tales enfrentamientos, definida por la reflexión y la acción, generadoras ambas de una adecuada tecnología social.

Así, parece evidente que debiese existir un objetivo global que tienda, por medio de estrategias adecuadas, a la preservación de los recursos hídricos en cantidad y calidad, en términos temporales y espaciales. Luego, ¿por qué esta situación no se tiene en cuenta?

La respuesta pasa por variadas causas, como que la población local no percibe claramente los problemas ambientales ligados a la gestión del agua y sus implicaciones. Ello es así porque los fenómenos de degradación del agua en muchas ocasiones son de lenta manifestación física. Asimismo, no existe una difusión importante y continua que se traduzca en una educación ambiental efectiva y eficiente. Además, los recursos hídricos, a no ser que el mercado les asigne una importancia determinante por la existencia de posibilidades de negocios de alta rentabilidad, no presentan una relevancia que los haga merecedores de la atención de las autoridades.

Por último, no existen suficientes investigaciones y actuaciones técnicas para detener los procesos de degradación del recurso o incrementar su preservación, en tanto que el único aspecto que tiende a crecer exponencialmente es el de los aprovechamientos.

Por lo tanto, es casi imposible hablar de integralidad, cuando cada sector productivo o social hace con el agua lo que mejor le parece o, por lo menos, tiende manifiestamente a defender sus propios intereses. Esta estrategia, lleva implícita la degradación de los recursos hídricos, una menor eficiencia de aprovechamiento y un impacto ambiental muy importante.

De este modo, por ejemplo, mientras a nivel mundial la hidrología de las zonas húmedo-templadas es más prolífica en investigaciones y experiencias, la hidrología de las zonas áridas y semiáridas presenta un menor número de estudios, alta variabilidad de los datos, y carencia de relaciones lineales en el proceso precipitación-escorrentía. La carencia de investigaciones se demuestra a partir de un estudio de Bosch y Hewlett (1982), quienes revisaron de forma exhaustiva la bibliografía mundial referida a datos de balances hídricos en las cuencas, y al efecto de la cobertura vegetal sobre la concentración de las aguas. A partir de este análisis se determinó que sólo un 10% de los estudios correspondían a áreas de precipitación media anual inferior a 600 l/m^2.

Aguas subterránea en el Oeste de la Provincia de La Pampa

La misma se puede situar en una área comprendida por debajo de la isohieta de los 300 mm y comprende a los departamentos Chical Co, Chalileo, oeste de Loventué, Puelén, Limay Mahuida, Curaco, LihuelCalel, oeste de Utracán y sur de CaleuCaleu; localizados en el oeste y sur de la provincia de La Pampa, con un área aproximada de 70.000 km^2 (Roberto, Z, et al, 2008).

La región se caracteriza por una escasa y mal distribuida precipitación pluvial, así como una fuerte oscilación de la temperatura, lo cual produce un clima descomedido.

En lo que respecta al uso del agua potable se ha reemplazado al agua subterránea por acueductos de aguas superficiales, fundamentalmente de manantiales ubicados a más de 80 km, inclusive desde la la provincia de Mendoza.

El agua para el uso ganadero es casi en su totalidad aportada por las aguas subterráneas de la región y complementada por la poca y esporádica escorrentía de los ríos Atuel y Salado - Chadileuvu – Curacó.

A partir de estos conceptos es muy importante destacar el uso teniendo en cuenta la calidad y cantidad del agua, dado los exiguos caudales y la alta salinidad (fundamentalmente en Sulfatos) de la misma. Esto se traduce en el recurso más importante para la producción de carne. El suministro de cantidades adecuadas de agua es importante para los animales en pastoreo, tanto ganado doméstico como fauna silvestre. El consumo de agua a libre acceso nunca se debe de limitar, ya que el agua es tanto un nutriente como un medio para

funciones metabólicas en el cuerpo, es un importante constituyente de la leche y los tejidos, y proporciona un medio para la eliminación de sustancias de desecho del organismo. Las ganancias diarias de peso están directamente relacionadas a la cantidad y calidad de alimento consumido cada día, pero el consumo de alimento puede ser severamente reducido por el consumo inadecuado de agua. La restricción del consumo de agua reduce la producción de leche en hembras lactantes, reduce la ganancia en animales tanto mamones como destetados, y puede contribuir o causar a perdidas por muerte en casos severos. En lo que respecta al consumo para la población solo se limita a pequeñas áreas medanosas de recarga sonde los volúmenes están estrechamente ligados a las precipitaciones. (Shanton et al, 2009).

En esta zona es común que los productores se preocupen por mejorar la eficiencia reproductiva y la calidad del ganado, o por las fuentes de alimentación para el mismo, ya sea el forraje natural o el suplemento, sin embargo, pocas veces se fijan en una correcta distribución del agua y en volúmenes suficientes.

Es por esto que la variabilidad climática se asocia con fenómenos con importantes impactos socioeconómicos y ambientales. Dicha variabilidad climática, se relaciona con la ocurrencia de sequías severas o con precipitaciones por encima de la media. Si los efectos de este extremo climático se incrementan, la zona se verá expuesta a eventos extremos de origen hidrometeorológico, a menos que se corrijan prácticas sociales que incrementan la vulnerabilidad. Bajo este panorama, la planificación, la gestión y la acción frente a los riesgos hidrometeorológicos cobran gran relevancia.

La construcción de capacidades de adaptación frente a los potenciales impactos del cambio climático depende de las decisiones que se tomen desde hoy en el campo tecnológico, social, económico y ambiental; en la definición de medidas de adaptación, en el uso de herramientas para planear con incertidumbre, y en el desarrollo de mejores condiciones reactivas y preventivas ante eventos extremos.

Este análisis de la relación agua-clima-sistema productivo-factores sociodemográficos intenta incidir en el espacio de vinculación entre los actores que generan el conocimiento y quienes diseñan y aplican política pública. Se trata de pensar de una manera distinta los temas de vulnerabilidad hídrica, de los riesgos frente a la variabilidad climática y en particular frente a los eventos hidrometeorológicos extremos, para proponer estrategias de acción que sumen las capacidades del gobierno a la acción de la sociedad.

Por otra parte, el análisis de los factores sociodemográficos que pudieran incrementar los riesgos surge de la necesidad de una estructura institucional vinculada con el tema, con objeto de orientar la acción hacia el manejo integral de riesgos hidrometeorológicos en los ámbitos regional y nacional.

También, en este tipo de regiones, es extraordinaria la variabilidad ambiental de los ecosistemas acuáticos. Ello se pone de manifiesto en la heterogeneidad espacial y las variaciones temporales de sus componentes físicos, químicos y bióticos. El balance hídrico negativo, característico de estas regiones, sitúa al área en extremos ambientales que pasan desde períodos de sequía a eventos de inundación de escasa duración. Tres factores clave determinan esta variabilidad: la temporalidad de las aguas, las interacciones del agua superficial, subsuperficial y subterránea y la tipología del sustrato. Todos ellos contribuyen a configurar el cuadro hidroquímico y su variabilidad espacial y temporal, a seleccionar los componentes biológicos y sus relaciones y a marcar las características metabólicas del ecosistema. Todas estas cuestiones deben tenerse en cuenta para la gestión de los sistemas hídricos en esta tipo de ambiente.

Rol de las aguas subterráneas en región periférica a la localidad de Algarrobo del Águila

En zonas semiáridas la implementación de planes hidrológicos es muy compleja y, antes de intentar cualquier posibilidad de aplicación de planes de gestión de recursos hídricos, es necesario establecer previamente un diagnóstico acerca de cuál es la situación a la que actualmente se enfrentan estos planes. De este modo, se considerarán las siguientes definiciones. En primer lugar, se entiende por "evaluación" la comparación que se realiza entre una situación real y una situación hipotética o teórica, que puede mostrar las diferencias entre las dos situaciones analizadas. Por lo tanto, el "diagnóstico" se define como la o las causas de las disparidades que identifican ambas situaciones. (Tapia et al, 1999).

Es por esto que el desafío para las ciencias sociales en este trabajo es encontrar un acceso teórico para un sistema social bajo una situación especial. Es por eso que la relación existente entre la presencia de las aguas subterráneas en la región y el uso de la misma por los habitantes de la región, en la cual las condiciones

climáticas cambiaron rápida y drásticamente, y son persistentes en el tiempo. Por tal motivo se seleccionó a esta localidad como área piloto, con las personas del pueblo y de la región aledaña, con el objetivo deben obtenerse propuestas para otra clase de sistemas sociales, que han sufrido cambios parecidos. Esto ocurre con la mirada fija en áreas, en las cuales el agua es enérgicamente reducida repentinamente, por ejemplo, a través del consumo en otro lugar o el consumo indiscriminado de los recursos existentes o por la contaminación duradera del agua, etc.

En Algarrobo de Águila (Figura 1) y su entorno, a partir del corte del rio Atuel por la provincia de Mendoza en el año 1947, la única fuente de agua disponible para cualquier tipo de uso, fundamentalmente para la producción ganadera lo constituye las aguas subterráneas. En este contexto de las crisis por el cambio medioambiental, hay un fenómeno, en cuál deber ser analizado particularmente, ya que puede presentar grandes efectos, no sólo sobre la región sino también sobre las comunidades en otros lugares del mundo.

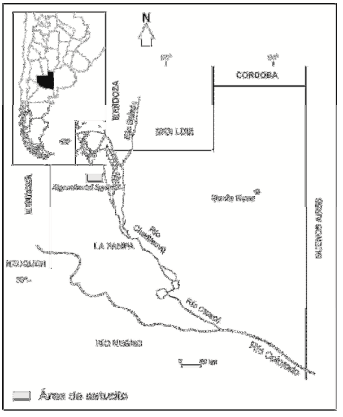


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Dentro de este contexto, las distintas opciones en el manejo de los recursos hídricos subterraneos se plantearon mediante un modelo de gestión que tenga en cuenta las demandas, las disponibilidades de agua y la factibilidad económica, enmarcado siempre dentro del contexto de los objetivos de desarrollo de la región. Para ello se proponen las siguientes etapas: Economía, Legislaciòn, Demanda de agua y Gestión y Planificación hidrica.

La propuesta metodologica propone dos grupos de actividades. Un primer conjunto se concentrará en la identificación de las principales fragilidades, el reajuste de incertidumbres respecto del clima y de la cantidad de agua disponible, y la identificación de tecnologías destinadas a reducir las vulnerabilidades a través de los siguientes aspectos:
(a) un estudio detallado de los aspectos climáticos y de los sistemas hidrogeológicos regionales en diferentes escalas,

(b) desarrollo y evaluación de herramientas para optimizar el abasto de agua para usos que compiten entre sí (uso urbano, agricultura, ganadería industria, etc.),

(c) identificación de problemas con el fin optimizar el uso del agua en la región. Este grupo de actividades se centrrará también en el manejo de los recursos hídricos en la ganadería de secano y se traduce en el establecimiento de un sistema de información y de apoyo a la toma de decisiones,

El segundo grupo de actividades se concentrará en las sociedades afectadas y arreglos institucionales relacionados con el manejo del riesgo en los recursos hídricos. Estará centrado en la resiliencia de las sociedades afectadas y la capacidad institucional de los gobiernos (Provincial y municipal) para abordar la fragilidad a los impactos del cambio climático. También se compararán políticas alternativas de asignación de aguas ante la variabilidad integrada del clima en medio de un ambiente de manejo de aguas para el sector productivo y urbano

Dentro del contexto descrito anteriormente podemos describir un escenario socio-productivo del Oeste de La Pampa que está estrechamente ligado a la posibilidad de contar con agua subterránea de calidad y cantidad óptima para los distintos usos. Este escenario se ve influenciado por los fenómenos hidrometeorológicos extremos que dañan los bienes y la integridad física de las personas, en una cadena compleja de impactos que afectan prácticamente a todas las dimensiones del desarrollo humano. La forma en que se prepara la sociedad frente a condiciones extremas del clima como las ondas de calor, las lluvias intensas, o las sequías prolongadas; es un elemento determinante de la vulnerabilidad de los países en el futuro.

Otro factor importante a tener en cuenta es el impacto del corte del rio Atuel sobre a sociedad de Algarrobo del Águila que se puede definir como migración por razones medioambientales. *“Los refugiados ambientales son aquella gente que ha sido obligada a dejar*

*su hábitat tradicional, temporalmente o permanentemente, debido a una interrupción ambiental marcada (natural y/o provocado por la gente) que puso en peligro su existencia y / o seriamente afectó la calidad de su vida"(*Müller, et al, 2012*).*

En el contexto del cambio medioambiental existen tres clases de emigraciones:

- La migración en el sentido de escape por razones de eventos repentinos, como ser terremotos, erupciones volcánicas e inundaciones.

- Migración, en el sentido de la reducción de la población como resultado a la adaptación cuando cambian las condiciones climáticas y por razones de carencia de lugares de trabajo en la región.

- La Migración por razones de la destrucción de una comunidad. Despoblación de una región.

Una solución exitosa de la crisis por el cambio medioambiental significa lo siguiente en este contexto:

- Las personas pueden volver a su lugar de origen.

- Un equilibrio de la población el regional y las condiciones climáticas. En regiones orientadas al agro, esto significa eventualmente nuevas posibilidades de trabajo.

- Los sistemas sociales pueden ser conservados y no necesariamente desplomarse.

En todo caso es importante mencionar, que existen personas que no pueden emigrar. Ellas son en todo los aspectos, demasiado pobres para poder irse.

La Comunidad como sistema social

Para investigar a la comunidad en el contexto de la resiliencia, se tiene que disponer de entendimientos teóricos y concretos sobre las comunidades.Partiendo del sistema de la teoría social nos referimos en esta investigación especialmente a los modelos de Luhmann (Luhman, 1986) en su trabajo "comunicación ecológica". Puede la sociedad ajustarse a peligros ecológicos?

Inspirados en la teoría del capital social, que clase de redes dentro de las sociedades son examinadas, en cuanto a calidad y cantidad; debería ser analizada también la calidad y cantidad de la comunicación social del sistema observado.

"En contraste con Bourdieu, la definición de Putman del capital social no es un recurso individual, sino un recurso colectivo, el cuál se origina a través del intercambio recíproco dentro de una sociedad y promueve el crecimiento de esta sociedad." Para Putnam, la calidad y la cantidad de la cohesión social en una sociedad tienen un significado central. Por ejemplo él hace una diferencia entre "Vinculación" y "tender un puente."

Se entiende por "Vinculación" el reforzamiento de la solidaridad dentro de la red social- y se describe como "tender un puente" las conexiones entre las diversas redes.

Es entendible que las redes sociales que poseen tanto una vinculación interior fuerte como una buena conexión con otras redes, despierten un interés externo e interno. Si los miembros de una red pueden alcanzar una ventaja por los vínculos hechos dentro de la red, se habla sobre efectos internos. No es siempre importante si el miembro se compromete directamente o solamente es miembro. Putnam (2000, 2ff de s) describe el ejemplo del ciudadano, que saca provecho de la seguridad del vecindario de otros, sin estar personalmente vinculado. Si seguimos observando este ejemplo por medio del compromiso de la seguridad del vecindario se puede reducir la cuota de criminalidad en un distrito. Por la reducción de los costos en el empleo de personal policial en este distrito, se habrá obtenido una reducción de costos para el estado. Éstos son los efectos externos.

Parece ser importante observar especialmente también la calidad de la comunicación y su efecto.

Cuando habla Putnam de la "Vinculación", él describe todas las comunicaciones y sus interacciones, las cuales tienen como objetivo de reforzar la cohesión. Cuanto más múltiples y diversas son estas comunicaciones, más fuertes son los efectos de las relaciones internas, incluso es mayor la posibilidad de que los miembros del sistema social puedan sacar ventajas de este sistema.

Los valores del capital social en Argentina son muy bajos en comparación mundial, en comparación a otros países latinoamericanos su valor es intermedio, (ver World Value Survey: S. 42).

Conclusiones y Recomendaciones

El haber utilizado a la zona periférica de Algarrobo del Águila como área piloto sirvió de como experiencia preliminar, ya que los actores involucrados (personas, instituciones, cooperativas, Organismos Gubernamentales,

etc.) reflexionaron en forma positiva sobre el rol que cumplen las aguas subterráneas en la zona.

Si bien las mismas no satisfacen todos los usos por su elevada salinidad y escaso caudal, son el único recurso con el que cuentan a partir del corte del Río Atuel y han permitido sobrellevar un sistema productivo ganadero que, aunque mínimo, les permitió evitar migrar hacia otras latitudes y conservar la escasa población de la zona.

Las reflexiones aquí plasmadas surgen en respuesta a la necesidad de tratar la gestión integral de riesgos de origen hidrometeorológico, como un tema trascendental para la región. A partir del conocimiento de los peligros climáticos, del análisis de las condiciones de vulnerabilidad hídrica y de diferentes experiencias vinculadas con la adaptación y el manejo de recursos hídricos; se plantean líneas de acción orientadas hacia la construcción de capacidades de adaptación de la región a las adversidades.

En este marco, lo primero que ha de hacerse para realizar el diagnóstico, será plantear algunas situaciones que debiesen existir en un marco ideal, para llevar a cabo planes de gestión de recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas.

a. Presencia de una política de gestión de recursos hídricos en un contexto ambiental y productivo, que oriente planes institucionales, de investigación, técnicos, así como de educación y capacitación. Al existir una política definida de gestión del agua, se pueden obtener resultados que potencien la actuación de las instituciones de ejecución física y social, así como la acción de las instituciones de investigación. Ello es así porque sus objetivos y planes de acción específicos son parte de una planificación que optimiza los escasos recursos disponibles.

b. Cooperación interinstitucional para la solución de problemas técnicos y sociales. Dado que las instituciones cooperen entre ellas permite la sinergia organizacional, tan necesaria como deseada para una actuación eficiente. Si eso no se consigue, no sólo se reducen las posibilidades de éxito a causa de la pobreza que presenta una sola actuación institucional, sino que es muy difícil que se alcancen marcos interdisciplinarios de trabajo.

c. Incorporación de esquemas educativos, de investigación y de capacitación contínua en los profesionales y usuarios, con el fin de instaurar una cultura del agua. Si se incluyen marcos educativos de trabajo, se estará en la línea de conseguir propuestas de mayor duración estructural en el tiempo y en el espacio. Esto responde a que la actuación que se cobija en esquemas educativos, de investigación y de capacitación, tiende a hacer más independientes a las personas que se benefician de estas acciones, y a quienes las proponen desde una perspectiva técnica. De esta forma, ambos se potencian en un plano de mayor equidad y, por ende, de mayor sostenibilidad ambiental.

d. Adopción de esquemas de gestión estratégica. En la actualidad, y en función del cambio de valores de este final de siglo, de los elementos conceptuales que se manejan y del objetivo del desarrollo sostenible, resulta vital trabajar con modelos de gestión estratégica, ya que permiten, desde una visión sistémica, ofrecer respuestas a una problemática compleja y variable. De esta forma, el concepto de estrategia que incorporan estos modelos, no sólo está referido a la solución de problemas técnicos, sino también a solventar dificultades del más amplio espectro, al incorporar a los actores sociales y a su correspondiente dimensión polifacética. Por ello, la estrategia es una herramienta que sirve a objetivos generales y específicos, y precisa por lo tanto de un diseño participativo y consensuado. Sin embargo, la incorporación del espectro social y sus variables aumenta la entropía del sistema, es decir, el desorden en el interior del sistema físico y social, hecho que debe ser considerado en el momento de evaluar las posibilidades reales de estos métodos.

e. Toma de decisiones consensuada entre los diversos actores que representan el cuerpo social, técnico y político. Para la sostenibilidad de las actuaciones técnicas, se plantea un aspecto de alta importancia, como es que el resultado del proceso de participación de los actores involucrados debe generar decisiones mayoritariamente consensuadas, con el fin de conseguir su adhesión continuada y efectiva al proceso.

f. Existencia de una descentralización administrativa regional. Para que las instituciones puedan actuar eficazmente y conforme a directrices regionales o locales, resulta fundamental permitir la capacidad de

respuesta de cada una de ellas. Si sus acciones dependen de estructuras centralizadas en el poder político nacional, su poder de actuación se ve notablemente disminuido por el hecho de tener que acatar directrices que les son ajenas y que, en algunos casos, no se condicen con lo que se ha planteado regionalmente como válido, o con lo que el ecosistema físico demanda.

g. Verificación de una alta motivación institucional para la obtención de recursos financieros. Este aspecto cobra una elevada relevancia, en virtud de que los recursos de los que dispone normalmente una institución están muy limitados y previamente definidos. Por ello, una estrategia recomendable es la obtención de recursos adicionales para implementar y complementar programas con un marcado acento regional. Sin embargo, ello sólo es posible si los integrantes de las diversas instituciones están motivados en ese objetivo (Tapia et al, 1999)

Referencias

Bosch y Hewlett (1982), A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55 (1982) 3—23. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam .Printed in The Netherlands.

Luhmann,Niklas(1986):ÖkologischeKommunikation.KanndiemoderneGesellschaftsichaufökologischeGefährdungeneinstellen?Opladen:WestdeutscherVerlag.

Müller , B; Haase, M; Kreienbrink, S y Smhid, A. 2012. Klimamigration.Bundesamtfür Migration und FlüchtlingeReferat 220 - Forschungs- und Projektmanagement, Strategie, Geschäftsstelle, WissenschaftlicherBeiratFrankenstraße 210.90461 Nürnberg.Gesamtverantwortung: Antje Kiss Dr. Axel Kreienbrink.

Putnam,RobertD(2001)GesellschaftundGemeinsinn.SozialkapitaliminternationalenVergleich,Gütersloh

Tapia Pizarro, Roberto, 1999. Análisis de la gestión del agua en zonas áridas y semiáridas: una propuesta de actuación. AfersInternacionals, núm. 45-46, pp. 11-33. Fundación CIBOD. Chile.

Roberto, Z; Tulio, J. y Malan, M. 2008. Cartografía de agua subterránea para uso ganadero en el Oeste de La Pampa. Sitio Argentino de Producción Animal. INTA.

Shanton, A y Matalòn, P. Importancia de la aguada en el manejo del campo natural en la Provincia de La Pampa.Planificación y Gestión de Aguas Subterráneas del VI Congreso Argentino de Hidrogeología IV Seminario Hispano-Latinoamericano de temas actuales en Hidrología Subterránea. Editores L. Vives, E. Custodio Gimena y Leticia Rodríguez. Pág. 93-102. ISBN 978-987-1082-38-4. Santa Rosa, La Pampa. Argentina. Agosto del 2009.-

WorldValueSurvey: S. 42.2013-. http://www.worldvaluessurvey.org

Evaluación del agua subterránea y transformaciones territoriales en María Ignacia-Vela (Buenos Aires, Argentina)

Corina I. Rodriguez[1], Adriana Díaz[1], Guillermina Jacinto[2], Anahí Tabera[3], Bárbara Pessolano[1], Alejandro Ruiz de Galarreta[1]

[1] Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales (Facultad de Ciencias Humanas, UNCPBA), Campus Universitario, Paraje Arroyo Seco s/n, (7000), Tandil, Buenos Aires, Argentina.
[2] Centro de Estudios Sociales de América Latina (Facultad de Ciencias Humanas, UNCPBA), Campus Universitario, Paraje Arroyo Seco s/n, (7000), Tandil, Buenos Aires, Argentina.
[3] Departamento de Tecnología y Calidad de los Alimentos (Facultad de Ciencias Veterinarias, UNCPBA), Campus Universitario, Paraje Arroyo Seco s/n, (7000), Tandil, Buenos Aires, Argentina.
Mail de contacto: corinairis@yahoo.com

RESUMEN

María Ignacia es un asentamiento de rango menor del partido de Tandil. Cuenta con cobertura parcial de agua de red a partir del acuífero freático. Existen numerosas perforaciones particulares y la disposición de efluentes domiciliarios se realiza en pozos absorbentes. El objetivo es evaluar la calidad y gestión del agua subterránea en la localidad, en el marco de cambios territoriales que la afectan y modifican sus vínculos con la ciudad cabecera. Se realizaron entrevistas y se tomaron muestras de agua en 2011 y 2012. Se determinaron conductividad eléctrica, concentración de nitratos y microorganismos patógenos, encontrándose parámetros que exceden lo recomendado por el Código Alimentario Argentino para agua de consumo humano. La zona no saturada es de escaso espesor generando así una alta vulnerabilidad del recurso hídrico ante las cargas contaminantes. Los cambios territoriales que experimenta la localidad demandan nuevas estrategias de planificación y gestión sustentable del agua a escala del asentamiento.
Palabras clave: diagnóstico, gestión del agua y saneamiento, cambios territoriales

ABSTRACT

María Ignacia is a lower rank settlement of Tandil district. The village has partial water network coverage whose source is the phreatic aquifer. There are numerous private boreholes. Domestic wastewater disposal takes place in cesspits. This work is aimed to assess groundwater quality and management in the village, which are affected by territorial changes that modify their links with the main city. Interviews were done and water samples were taken in 2011 and 2012. Electrical conductivity, concentration of nitrates and pathogens microorganisms were determined. Several parameters exceeded recommended levels by Argentine Food Code for drinking water. Small thickness of unsaturated zone generates a high vulnerability of water resources to contaminant loads. Territorial changes that occur in the village require new strategies for planning and sustainable management of water at settlement scale.
Key words: diagnosis, water and sanitation management, territorial changes

Introducción

María Ignacia (Estación Vela) constituye el asentamiento de rango menor (ARM) de mayor tamaño del Partido de Tandil, con una población de alrededor de 2.000 habitantes. Este núcleo es considerado como un centro de servicio rural de primera categoría que presta servicios básicos y especializados al entorno rural (Municipalidad de Tandil, 2005).

Investigaciones recientes ponen de manifiesto que los actuales vínculos urbano-rurales entre la ciudad cabecera –Tandil- y los ARM del Partido, activan un conjunto de transformaciones territoriales en estos ARM, cuyo origen y dinámica no obedecen únicamente a su rol de prestación de servicios rurales, sino que se entroncan con las demandas de espacios y de actores urbanos (Jacinto, 2011). La expansión residencial y la aparición de nuevos usos como los emprendimientos recreativo-turísticos ponen de manifiesto el incremento de las demandas en disponibilidad, cantidad y calidad de agua.

Las trasformaciones territoriales que alcanzan a María Ignacia generan entonces la necesidad de investigar en torno al manejo de los recursos naturales, los hídricos en particular, necesarios para el desarrollo de la vida y de las actividades productivas. En este trabajo,

interesa especialmente conocer la situación actual de los recursos hídricos subterráneos en la zona, como única fuente de abastecimiento, analizando su calidad para consumo humano, sus modos de uso y gestión y los impactos potenciales que las transformaciones territoriales en curso podrían generar sobre el agua subterránea.

El objetivo de este trabajo es, entonces, evaluar la calidad y la gestión actual del agua subterránea en la localidad de María Ignacia (Estación Vela), en el marco de los cambios territoriales en desarrollo en la zona.

Área de estudio

María Ignacia (Estación Vela) es una localidad rural situada 50 km al oeste de la ciudad de Tandil, en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires (Figura 1). Cuenta con 2002 habitantes (según comunicación de la Delegación Municipal), lo que representa un incremento de población cercano al 10%, respecto al Censo 2001, y un 12% respecto al Censo de 1991 (INDEC, 1991 y 2001).

El asentamiento brinda un conjunto de servicios de proximidad para los habitantes locales (hospital municipal, establecimientos educativos desde nivel inicial hasta secundario, cooperativa de distribución de electricidad, agua potable, telefonía e internet). El ejido cuenta con calles y acceso principal asfaltados, conectados a Tandil por la Ruta Provincial Nº 80 y la Ruta Provincial Nº 74 (Figura 1). El asentamiento nuclea asimismo, actividades de apoyo a la actividad rural como talleres, depósitos y cooperativas de acopio de granos.

La Cooperativa de agua potable ofrece el servicio mediante perforaciones que explotan el acuífero freático, cubriendo aproximadamente el 80% de la población del asentamiento. Los análisis de calidad de agua antecedentes, indican que el agua de abastecimiento público cumple los requerimientos para consumo humano. Sin embargo, tanto en el ejido principal como en los alrededores de la localidad, los pobladores utilizan perforaciones particulares situación que, sumada a la inexistencia de sistema cloacal y a la presencia de otras cargas contaminantes, determina el uso de agua no apta para consumo humano, poniendo en riesgo la salud de los usuarios.

La localidad se emplaza en la Cuenca del Arroyo Chapaleofú Chico (Figura 1), la cual tiene una superficie aproximada de 370 km^2 (Pessolano, 2011). La cabecera de cuenca se ubica en el sistema serrano de Tandilia, más específicamente en el subsistema serrano "Sierra Alta de Vela". Las Sierras de Tandilia o Sierras Septentrionales constituyen una provincia fisiográfica formada por sierras, cerros, cerrilladas y lomas que sobresalen entre 50 y 250 m de la llanura pampeana (Teruggi y Kilmurray, 1975). Dicho sistema se encuentra alineado en sentido NO-SE, abarcando unos 300 km. desde las inmediaciones de Olavarría hasta Mar del Plata.

El sistema serrano de Tandilia se caracteriza por la presencia de dos unidades geológicas (Teruggi y Kilmurray, 1980; Dalla Salda, 1999; Dalla Salda et al., 2005; Poiré y Spalletti, 2005). Por un lado, el basamento cristalino, formado por rocas ígneas plutónicas y, por otro, una cubierta sedimentaria que incluye sedimentos pampeanos de tipo limos loessoides. Hidrogeológicamente, las rocas que componen el basamento son acuífugas, pero presentan fracturas que le dan un carácter de acuífero pobre. Dicho basamento constituye el hidroapoyo del sistema acuífero clástico sobrepuesto, y se profundiza escalonadamente a partir de fracturas tensionales hacia la Cuenca del río Salado (Yrigoyen, 1975). En cambio, los sedimentos constituyen un ambiente poroso clástico dando lugar a un acuífero que brinda la principal fuente de agua para la zona (Ruiz de Galarreta y Banda Noriega, 2005).

El sentido de escurrimiento general del arroyo Chapaleofú Chico es en dirección noreste y tiene una serie de afluentes que en general son cursos de carácter efímero (Figura 1). Pessolano (2011) determinó a través del mapa equipotencial para la cuenca, que el sentido de escurrimiento subterráneo regional es en sentido noreste, de acuerdo a las características morfológicas superficiales.

El arroyo Chapaleofú Chico, en su recorrido permanente, es efluente respecto a la capa acuífera. En la cuenca donde se ubica el sector de estudio, los niveles estáticos presentaron valores entre 317 m y 182 m para el primer semestre de 2009 (Pessolano, 2011), correspondiendo los valores más elevados a la zona serrana coincidente con la divisoria de cuencas, mientras que los valores más bajos se dan en cercanías del curso del arroyo y hacia su desembocadura.

Con respecto a la hidroquímica, Pessolano et al. (2012) determinaron que en la cuenca del Arroyo Chapaleofú, y durante el primer semestre de 2009, la conductividad eléctrica del agua subterránea osciló entre 425 y 849 µS/cm y que las concentraciones de nitratos variaron entre 12 y 46 mg/l. Sin embargo, se detectaron valores elevados de ambos parámetros en un establecimiento de cría de ovinos y en un tambo.

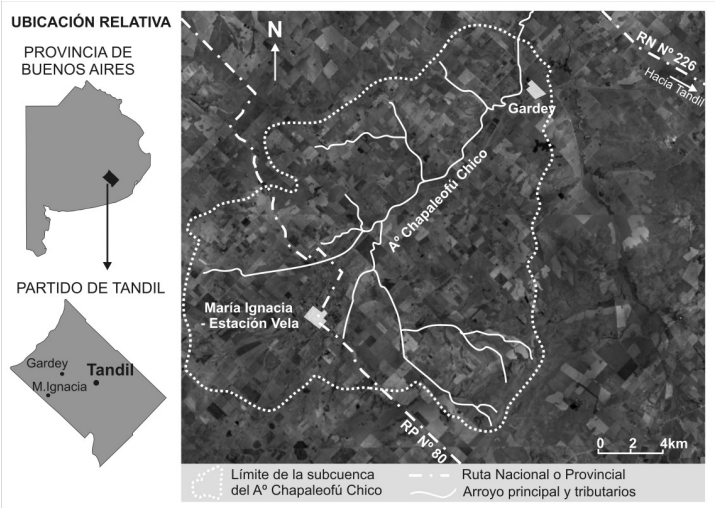


Figura 1. . Ubicación de la localidad de María Ignacia (Estación Vela).

Metodología

En noviembre de 2011 se desarrolló la primera parte del trabajo de campo, relevando 38 perforaciones en la localidad y alrededores. Se realizaron entrevistas a los pobladores locales, indagando sobre los modos de abastecimiento de agua, las características constructivas de las perforaciones, la existencia de focos contaminantes cercanos a las mismas, los sistemas de disposición de efluentes, los antecedentes de contaminación del agua y/o de enfermedades de origen hídrico.

Por otra parte, se realizaron entrevistas a actores clave involucrados en la gestión del agua, entre los que se incluyó al Delegado Municipal de María Ignacia, el Presidente de la Cooperativa de provisión de agua potable, y se interrogó al personal técnico de la Cooperativa sobre las características del sistema de explotación, almacenamiento y distribución de agua potable. Además, se contó con la participación del personal del Hospital Municipal Rodríguez Larreta, quien a través de su Director Médico hizo llegar a los autores de este trabajo su preocupación por la calidad del agua de la localidad y su posible relación con patologías detectadas en dicho Hospital.

Se seleccionaron 16 perforaciones distribuidas homogéneamente en la localidad para conformar una red de medición y muestreo (Figura 2). En noviembre de 2011 y septiembre de 2012 se realizó la toma de muestras para análisis físico-químicos. En septiembre de 2012 también se recolectaron muestras para análisis microbiológicos, simultáneamente con la medición del nivel freático en cada sitio utilizando una sonda hidrométrica.

Se construyó el mapa equipotencial para septiembre 2012, utilizando las cartas topográficas Hojas 3760-22 “Chillar”, 3760-23 “Tandil”, 3760-28 “María Ignacia” y 3760-29 “Sierras de Tandil” (IGM, 1955) para determinar las cotas topográficas de cada perforación. El mapa resultante permitió conocer el sentido de escurrimiento subterráneo local.

En cuanto al relevamiento de la calidad físico-química del agua, se extrajeron muestras utilizando recipientes plásticos de 1 litro limpios. Se midió la conductividad eléctrica (CE) in situ con un Conductivímetro marca Hanna modelo HI 9812. Las muestras fueron transportadas y conservadas en frío. En el Laboratorio de Análisis Bioquímicos y de Minerales (FCV-UNCPBA) se determinaron las concentraciones del ión nitrato, a través del método espectrométrico ultravioleta selectivo (APHA, 2005).

La CE expresa el contenido salino existente en las aguas subterráneas, mientras que el ión nitrato se relaciona con la contaminación de origen orgánico. Ambos parámetros son indicadores relevantes en sectores con disposición de excretas in situ y especialmente el nitrato tiene implicancias sobre la salud de la población que consume el agua subterránea.

Para la interpretación de los resultados y su relación con la hidrodinámica subterránea, se construyó un mapa de isoconductividad y concentraciones de nitratos.

Las muestras para análisis microbiológicos fueron colectadas en recipientes estériles de 250 ml y con envoltura externa. Se seleccionaron las canillas conectadas directamente a las perforaciones, para conocer la calidad del agua tal como se extrae de la perforación, sin encontrarse afectada por problemas sanitarios de tanques y cañerías. Se limpiaron y esterilizaron las bocas de las canillas, para finalmente llenar el envase estéril.

Las determinaciones fueron realizadas en el Departamento de Tecnología de los Alimentos (FCV-UNCPBA) según APHA (2005) y se basaron en lo estipulado por el Código Alimentario Argentino (CAA, 2010) que, en su artículo 982, determina los niveles permisibles en agua para consumo humano, correspondiente a las bacterias: aeróbicas mesófilas, coliformes totales, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.

Resultados

1. Gestión actual del agua en la localidad

Según las entrevistas realizadas al Presidente y al personal técnico de la Cooperativa de agua potable de María Ignacia, se conoció que la misma funciona desde 1980, momento en que se construyó la primera perforación.

La Cooperativa es coordinada por el Servicio Provincial de Agua Potable y Saneamiento Rural (SPAR). Actualmente, cuenta con dos perforaciones para el abastecimiento de la localidad, cuyo diseño y construcción es adecuado y verificado por el SPAR:

- Pozo 1 (P1): tiene 59 metros de profundidad. Construido en 1980. Se ubica en el predio de la Cooperativa en las calles Roca y San Martín (Figura 2). Posee una bomba sumergible.
- Pozo 2 (P2): tiene 63 metros de profundidad. Fue construido en 2007. Posee una bomba sumergible. Se ubica a 120 metros de P1.

La Cooperativa posee un tanque con un volumen de 75 m^3 para el almacenamiento y posterior abastecimiento, ubicado lindero a P1. Previo a su almacenamiento, el agua recibe un proceso de cloración automática para garantizar la desinfección.

En septiembre de 2012, el agua potable llegaba a 512 bocas de abastecimiento, estimándose un 80 % de cobertura en la zona urbana. El servicio es medido y arancelado según intervalos de consumo. El consumo poblacional medio es de 400 m^3/día.

La Cooperativa remite informes mensuales y semestrales al SPAR, donde se indican las horas de funcionamiento de las bombas y los análisis de calidad, entre otros datos. Los análisis más recientes respecto a la calidad de agua, existentes en la Cooperativa (fechados en abril y agosto de 2012), indican su aptitud para consumo humano, tanto por sus características físico-químicas como microbiológicas.

Por otra parte, el personal de la Cooperativa destacó la problemática de la aplicación de riego complementario en el cultivo de papa en tierras aledañas a la localidad. La preocupación radica en que esta actividad generaría un descenso de los niveles freáticos en épocas de aplicación de riego.

En la entrevista realizada al Delegado Municipal de la localidad, se conoció que la Municipalidad de Tandil no tiene injerencia en el servicio de agua potable brindado por la Cooperativa. Aunque sí recibe informes diarios y semanales del control del servicio. Informó que la mayoría de los vecinos están conectados a la red de agua e indicó que en 2012 se realizó la extensión de dicha red hacia el noroeste de la localidad, en cercanía de las vías férreas. Si bien la obra está finalizada, aún resta que los vecinos se conecten al servicio.

Cabe comentar que, a diferencia de lo indicado por el Delegado Municipal, en los recorridos por la localidad se detectó que en numerosos domicilios han optado por mantener en uso la perforación o pozo domiciliario, y en algunos casos prefieren no conectarse a la red de agua potable, ya sea por razones económicas o porque les resulta más agradable el sabor del agua de pozo.

El Delegado también indicó que no han existido problemas de calidad en el agua potable brindada por la Cooperativa de servicios, como así tampoco se han manifestado quejas o reclamos referidos a las perforaciones particulares.

En casos de viviendas con problemas de calidad en sus pozos propios, no existe una medida preventiva o correctiva. Sino que, según informó, se brinda agua segura sólo en casos de inundaciones, llevando agua envasada a los domicilios que no poseen agua de red. Sin embargo, en las viviendas visitadas se observó preocupación por la calidad del agua de las perforaciones domiciliarias, y particularmente en el sitio Nº 28 indicaron haber realizado reclamos a la Delegación Municipal para el abastecimiento de agua segura y la construcción de una nueva perforación.

El Delegado indicó que existen previsiones sobre el tratamiento de efluentes domiciliarios, contando con un proyecto de sistema cloacal, cuyas primeras gestiones comenzaron a fines de 2008. La obra se encuentra diseñada,

aunque aún no se ha puesto en marcha por dificultades legales con el terreno donde se ubicará la planta de tratamiento cloacal. Comentó que la obra de cloacas fue diseñada a nivel provincial por el SPAR y dimensionada para unos 2300 a 2500 habitantes, aclarando que el Municipio no participó en el proyecto. Como se detalló anteriormente, la localidad ha presentado un incremento del 10% en la última década (2001-2010) por lo cual, si se mantiene esa tendencia creciente se colmaría la capacidad de la planta cloacal en los próximos 15 a 20 años.

En cuanto a la situación actual de los efluentes domiciliarios, la mayoría de las viviendas poseen pozos absorbentes y en menor cantidad de casos se observó la presencia de letrinas. El Delegado indicó que con frecuencia se requieren servicios de camiones atmosféricos para el desagote de dichos pozos absorbentes. Normalmente se solicitaban camiones provenientes de Tandil (48 km) y de Benito Juárez (59 km), con un elevado costo del servicio. Ante esta situación, el Municipio de Tandil adquirió un camión atmosférico propio.

Además, se consultó al Delegado Municipal sobre las tendencias de crecimiento de la localidad, a lo que respondió que no existe tanto un crecimiento sino más bien un cambio en la organización de la localidad. Indicó que: "queremos pasar de ser el patio de atrás de la ciudad a ser el jardín", explicando que se busca generar una buena impresión, al parecer más orientada a los visitantes.

2. Condiciones de extracción y uso del agua

La mayoría de los sistemas de extracción de agua constituyen perforaciones someras, aunque también existen algunos molinos en uso, predominando construcciones antiguas, mientras que sólo 2 perforaciones fueron realizadas recientemente. Para la extracción de agua se utilizan mayormente bombas de mano y bombeadores automáticos ubicados en la superficie. Es muy reciente la colocación de bombas sumergibles y sólo se encontró en una vivienda.

Se observaron importantes deficiencias en el diseño, construcción y protección sanitaria de las perforaciones, encontrándose que son pocas las que poseen cañería de encamisado y sellado de las paredes del pozo. Además, la gran mayoría de ellas no cuentan con cobertura superficial adecuada para impedir la contaminación del pozo, observándose incluso en muchos casos a la ausencia de tapa o cubierta.

Otro punto a tener en cuenta es la presencia de focos contaminantes cercanos. CoFAPyS (1993) recomienda una distancia mínima necesaria entre el sitio de captación de agua y los pozos absorbentes de 25 metros. En el relevamiento se detectó que en la mayoría de los casos esa distancia es inferior a 15 metros.

En el 65% de los sitios visitados el agua extraída de las perforaciones particulares constituye la única fuente de abastecimiento. Dos de ellos además no poseen cañerías de distribución, por lo cual acarrean el agua desde las bombas manuales hasta el interior de los domicilios. En otras dos viviendas se observaron cañerías externas deficientes.

El 35% restante de los domicilios consultados accede a la red de agua potable y en ellos se observa una gran diversidad de situaciones respecto al uso del recurso. Una vivienda utiliza el agua de red para el consumo humano, mientras que el agua de pozo la aprovecha en los sanitarios y para limpieza. En otro caso, la propietaria respondió que si bien accede al agua de red, prefiere beber agua extraída por su bomba de mano debido a que su sabor le resulta más agradable. Otra situación es de un domicilio que accede al agua de red pero prefiere comprar agua de mesa envasada para el consumo familiar debido a dudas relacionadas a la calidad del recurso. Por último, se destaca el caso de un vecino que si bien recientemente se extendió la red pública de agua frente a su vivienda, aún no está conectado al servicio, pero sin embargo obtiene el agua de dicha red para su consumo a través de otro domicilio de la localidad.

3. Hidrodinámica subterránea

El mapa equipotencial (Figura 2) indica que los niveles estáticos oscilaron en septiembre de 2012 entre 218 y 213 msnm. La zona no saturada presentó un escaso espesor, siendo en la mayoría de los sitios de medición inferior a 1 m, y alcanzando un máximo de 2 m al noroeste de la zona de estudio. Esta escasa profundidad de los niveles freáticos da lugar a una elevada vulnerabilidad del acuífero a las cargas contaminantes, hecho especialmente relevante considerando la disposición tanto actual como histórica de los efluentes domiciliarios en pozos absorbentes y letrinas.

Cabe comentar que en 2012 las precipitaciones enero-septiembre alcanzaron 900 mm, valor elevado considerando que la media anual 1900-2003 es de 838 mm (Ruiz de Galarreta y Banda Noriega, 2005). Incluso el mes de agosto de 2012 contabilizó 330 mm de lluvias. Esta situación puede haber afectado la

posición de los niveles freáticos medidos en septiembre de 2012, ocasionando su ascenso.

Teniendo en cuenta el incremento de precipitaciones en 2012 respecto a las lluvias caídas en 2011 (836.4 mm) se observa que no ha habido grandes variaciones en los valores de conductividad eléctrica y de nitratos entre ambas fechas. Sino que se produjo un incremento de ambos parámetros en 2012, pero más que nada relacionado a contaminaciones puntuales como es el caso del sitio Nº 19.

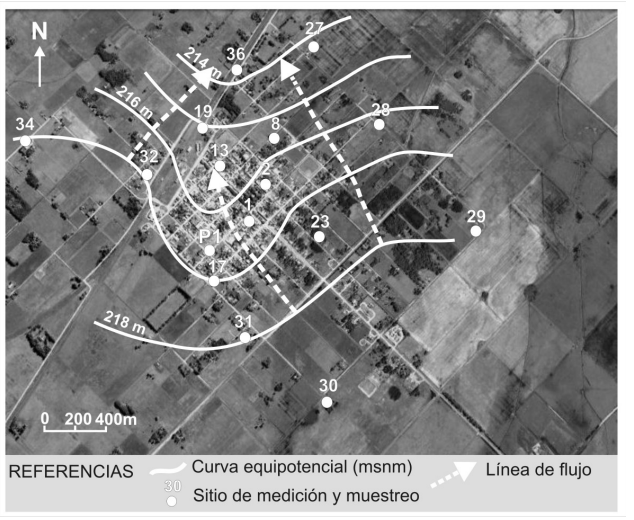


Figura 2. Sitios de medición y muestreo y mapa equipotencial para septiembre de 2012.

4. Calidad del agua subterránea

Los resultados de la conductividad eléctrica presentaron valores entre 770 y 1400 µS/cm en 2011 y 730 y 2120 µS/cm en 2012. Comparando con lo determinado por Pessolano et al. (2012) para la cuenca de estudio, se denotan incrementos en la salinidad del agua que pueden ser indicadores de alguna fuente contaminante que afecta al agua subterránea. En la Figura 3 se presenta el mapa de isoconductividad eléctrica para septiembre de 2012, en el cual se observan valores superiores a 900 µS/cm en la mayor parte de la localidad y con un marcado incremento hacia el norte, justamente de acuerdo al sentido de flujo subterráneo presentado en la Figura 2.

Por su parte, los nitratos mostraron una gran oscilación, para noviembre de 2011 variaron entre 19 y 136 mg/l, mientras que en 2012 oscilaron desde 12 mg/l hasta incluso 3 sitios con valores superiores a 100 mg/l.

En la Figura 4 se presentan las isoconcentraciones de nitratos para la zona de estudio en septiembre de 2012, con un incremento notable de los valores hacia el norte de la zona, coincidiendo dicho aumento con el sentido de flujo subterráneo. Cabe destacar que los valores antecedentes para la cuenca del Arroyo Chapaleofú Chico no superan los 46 mg/l en condiciones naturales

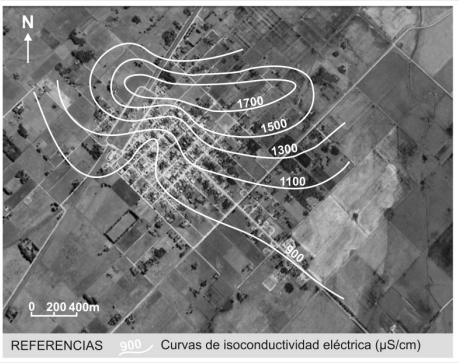


Figura 3. Mapa de conductividad eléctrica. Septiembre 2012.

El Código Alimentario Argentino recomienda valores inferiores a 45 mg/l de nitratos para agua de consumo humano, por lo cual en 2011 el 56,25 % de las muestras y en 2012 el 37,5% resultaron no aptas para tal uso en función de su contenido de nitratos.

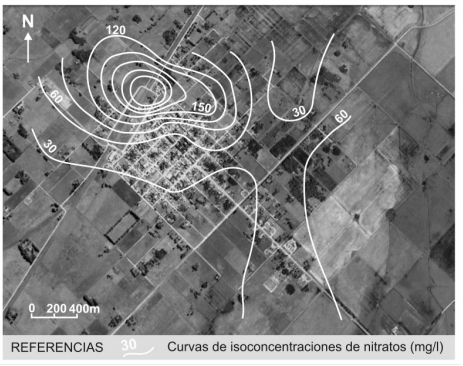


Figura 4. Mapa de concentraciones de nitratos. Septiembre 2012.

En la muestra P1, correspondiente a una de las perforaciones de la Cooperativa de Provisión de Agua Potable, el contenido de nitratos alcanzó 30 mg/l y 35 mg/l en las campañas 2011 y 2012 respectivamente. Sin embargo en pozos particulares ubicados en las cercanías (Figura 2), tales como el sitio Nº 1 distante 200 m de P1, los contenidos de nitratos alcanzaron 66 mg/l y 54 mg/l en cada fecha. Asimismo, en los sitios Nº 31 y 32 situados en un radio de aproximadamente 600 m desde P1, los valores de nitratos en al menos una de las dos campañas superaron lo recomendado por el CAA.

Con respecto a los análisis microbiológicos, sólo 3 (18,75%) de las muestras analizadas resultaron aptas para el consumo humano según indica el Código Alimentario Argentino, correspondiendo una de ellas a la de abastecimiento público (P1).

La mayoría de las muestras excedió los valores de coliformes totales/100 ml y de bacterias aeróbicas mesófilas. Se destaca la determinación de *Escherichia coli* en 3 muestras considerando la peligrosidad que implica la presencia de esta bacteria en aguas de consumo humano. Por su parte, *Pseudomonas aeruginosa* no estuvo presente en las muestras analizadas.

5. Transformaciones territoriales

La problemática vinculada al manejo de los recursos hídricos en la localidad se posiciona como un aspecto sustancial en relación a las transformaciones territoriales que María Ignacia ha experimentado durante la última década.

Uno de los principales cambios territoriales se basa en la visualización de algunos de estos ARM, como espacios de residencia alternativos a la ciudad de Tandil, en donde la presión y la especulación inmobiliarias fueron impulsando el incremento de los precios del suelo. Los terrenos vacantes en María Ignacia han sido alcanzados al mismo tiempo, por un proceso de valorización inmobiliaria y de expansión del uso residencial. Por un lado, estos procesos fueron activados por la demanda de los habitantes locales y por otro lado, favorecidos por la proximidad y conectividad vial entre la localidad y Tandil. El dinamismo residencial ha planteado la necesidad de dotar de infraestructuras de servicios básicos, principalmente agua y red cloacal a la localidad, con la dificultad que significa afrontar los costos de construcción de dichos servicios con respecto al número de usuarios beneficiados.

Un segundo eje de transformación de los ARM de Tandil, se explica por el desarrollo de actividades y emprendimientos turístico-recreativos, que entroncan con el despegue turístico de la ciudad de Tandil en los últimos años. En este contexto, los ARM se constituyen en puntos de interés cuya identidad y singularidad reposa en rasgos naturales, culturales y patrimoniales propios de estos pueblos rurales pampeanos. La expansión de nuevos usos recreativo-turísticos genera un aumento en la demanda de la calidad y cantidad de agua para consumo.

Asimismo, el manejo de los recursos hídricos plantea desafíos en el contexto de las estrategias de desarrollo territorial formuladas desde el Estado local, que explicita la necesidad de asegurar la dotación de infraestructura comunitaria y de servicios básicos, como eje de acción para reducir las disparidades presentes entre Tandil y los núcleos rurales. Asimismo, a través de la articulación de políticas municipales y provinciales se promueven procesos de desarrollo local en los centros del área rural, lo que supone elaborar e implementar programas especiales y normas preventivas mínimas para el desarrollo de este tipo de asentamientos en el corto, mediano y largo plazo (Municipalidad de Tandil, 2005).

Conclusiones

Las transformaciones territoriales que afectan la localidad de María Ignacia ponen de manifiesto la necesidad de investigar el recurso hídrico subterráneo, única fuente de agua para consumo humano, y de planificar su utilización en pos de garantizar su sustentabilidad.

Este trabajo ha permitido conocer los modos de usos y la gestión actual del agua en la localidad. La cobertura de agua potable a través de la Cooperativa de servicios se complementa con numerosos perforaciones particulares

someras con deficiencias en su construcción y protección sanitaria.

Se verificó que el recurso subterráneo se encuentra afectado en su calidad, destacándose como principal carga contaminante el vertido de efluentes domiciliarios en pozos ciegos, agravado por el escaso espesor de la zona no saturada. Los incrementos en la conductividad eléctrica y el contenido de nitratos con respecto a valores regionales, así como los microorganismos patógenos detectados, ponen de manifiesto la degradación del recurso subterráneo en el ámbito local y, además, han resultado los indicadores más sencillos para conocer la calidad del agua.

Si bien el agua provista por la Cooperativa es apta para consumo humano, se vuelve relevante proteger el recurso subterráneo a través de medidas que garanticen la provisión de agua potable para todos los pobladores.

Se destaca la importancia de un diagnóstico como el aquí presentado que, con información cuali-cuantitativa e indicadores sencillos, da cuenta de la problemática hídrica local y los riesgos potenciales asociados.

Es necesaria una planificación territorial integral que contemple las transformaciones acaecidas en la última década, considerando las tendencias del mercado inmobiliario, el desarrollo turístico, las necesidades locales y, en particular, la creación de infraestructura de servicios sanitarios apropiada.

Referencias

APHA. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*. 21st Edition. Eaton, A.; Clesceri, L.; Rice, E.; Greenberg, A.; Franson, M. (Editors).

CAA - Código Alimentario Argentino. 1969 y actualizado en 2010. Capítulo XII: Bebidas hídricas, agua y agua gasificada. Ley 18.284. Argentina.

CoFAPyS - Consejo Federal de agua potable y saneamiento. 1993. *Normas de estudio, criterios de diseño y presentación de proyectos de desagües cloacales para localidades de hasta 30.000 habitantes.* Fundamentación de normas, Vol. II: 7.

Dalla Salda, L. 1999. Cratón del Río de la Plata. 1. Basamento granítico - metamórfico de Tandilia y Martín García. *Geología Argentina.* Anales 29 (4): 97-106. Buenos Aires.

Dalla Salda, L., de Barrio, R. E., Echeveste, H. J., Fernández, R. 2005. El basamento de las sierras de Tandilia. Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires. *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino.* Cap. III: 31-50. La Plata.

IGM – Instituto Geográfico Militar. 1955. Cartas topográficas Hojas 3760-22 “Chillar”, 3760-23 “Tandil”, 3760-28 “María Ignacia” y 3760-29 “Sierras de Tandil”. Argentina.

INDEC – Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. 1991 y 2001. *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas*.

Jacinto, G. 2011. Asentamientos de rango menor (ARM) en Tandil: transformaciones territoriales a partir de la renovación de los vínculos urbano-rurales. *Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía.* Nº 10: 103-124.

Municipalidad de Tandil. 2005. *Plan de Desarrollo Territorial.* Tandil.

Pessolano, B. 2011. *Análisis geohidrológico de la cuenca del arroyo Chapaleofú Chico, Tandil, y su relación con las prácticas agropecuarias*. Tesis de Licenciatura. FCH, UNCPBA. Tandil.

Pessolano, B.; Ruiz de Galarreta, A.; Varni, M.; Barranquero, R. S.; Larsen, A. 2012. Diagnóstico preliminar del recurso hídrico subterráneo y su relación con las actividades agropecuarias en la cuenca del arroyo Chapaleofú Chico, Tandil, Buenos Aires, Argentina. En: *1er Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*. Ezeiza.

Poiré, D. G. y Spalletti, L. A. 2005. La cubierta sedimentaria precámbrica-paleozoica inferior del sistema de Tandilia. Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires. *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*. Cap. IV: 51-68. La Plata.

Ruiz de Galarreta, A. y Banda Noriega, R. 2005. Geohidrología y evaluación de nitratos del Partido de Tandil, Buenos Aires, Argentina. *Actas del IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea*. Blarasin, Cabrera y Matteoda (eds). p. 99-108.Río Cuarto.

Teruggi, M. y Kilmurray, J. 1975. Tandilia. Relatorio Geología Provincia de Buenos Aires. *Relatorio del VI Congreso Geológico Argentino*. p. 55-77. Bahía Blanca.

Teruggi, M. y Kilmurray, J. 1980. Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires. En J. Turner (Ed). *Geología Regional Argentina.* Academia Nacional de Ciencias. Volumen II: 919-965. Córdoba.

Yrigoyen, M. R. 1975. Geología del subsuelo y plataforma continental. Geología Provincia de Buenos Aires. *Relatorio del VI Congreso Geológico Argentino*. p. 139-168. Bahía Blanca.

Planificación de perforaciones y estudios hidrogeológicos en la provincia del Chubut

Érico H. Bianchi

Instituto Provincial del Agua, Chubut. Centenario 974, Playa Unión, (9103) Rawson, Chubut.
E-mail de contacto: ebianchi.ipa@chubut.gov.ar

RESUMEN

La profunda disminución de precipitaciones que ha afectado a la provincia del Chubut desde 2003 a 2010, generó una situación crítica en cuanto al abastecimiento de agua, lo cual derivó en la necesidad de buscar una solución a los problemas mediante distintos esfuerzos gubernamentales. El Instituto Provincial del Agua y la Corporación de Fomento del Chubut, generaron un plan de acción denominado ”Plan Agua Chubut”. El desarrollo del trabajo incluyó la construcción de una base de datos (GIS), donde se volcó información multivariada, con datos hidrogeológicos, geológicos, socio-ambientales y la formulación de un modelo conceptual de comportamiento de los recursos de agua. Se ponderaron las variables, en función de los criterios de “probabilidad de éxito en la búsqueda de agua”, cruzando esta información, con los "aspectos socio-ambientales" en cada localización. Como resultado del trabajo final, se obtuvieron: 48 perforaciones, 8 sectores de estudios, 30 pozos de gran diámetro, 27 equipamientos para uso de agua, mejorando la situación socio productiva de 146 destinatarios.

Palabras clave: recurso subterráneo, pozos, abastecimiento de agua.

ABSTRACT

The significant rainfall decrease that affected Chubut province from 2003 to 2010, derived into governmental efforts, which were conducted inter- institutionally and stated a work basis to follow. The Provincial Water Institute (IPA, Instituto Provincial del Agua) and the Corporation of Development of Chubut (CORFO, Corporación de Fomento del Chubut) promoted a plan called “Chubut Water Plan”. The plan was divided into two stages; A) GIS development, multivariate information such as hydrogeological and geological data as well as socio- environmental data among others was included. B) Model construction, based on the intercross of layers. Variables were measured according to the criteria “probability of success of water availability”, crossing this information with socio- environmental aspects in each location. The final results of this process were: 48 wells, 8 hydrological research areas, 30 wide diameter wells, 27 water equipment (pumps and reservoirs), improving the socio- economic situation of 146 beneficiaries.

Keywords: groundwater resources, wells, water supply.

Introducción

La provincia del Chubut, acarrea un déficit hídrico de considerables características, abarcando un lapso temporal de siete años consecutivos. Las isohietas que limitan las áreas desérticas se encuentran actualmente en expansión, ocupando una superficie cada vez mayor a la representada en periodos otrora.

El último evento geológico registrado en la cordillera de los Andes, (erupción del Volcán Puyehue), provocó una notable acumulación de ceniza volcánica en la porción centro-norte de la provincia del Chubut. El suceso descripto, dejó inutilizado de forma inmediata las aguadas, vertientes, pozos manuales de pequeño diámetro, depósitos de almacenamiento (tanques australianos), desencadenando pérdidas del recurso ácueo. Este hecho, sumado a la falta de precipitación, derivó en la mortandad considerable de ganado ovino, uno de los principales sustentos económicos provincial.

A raíz de los acontecimientos, el gobierno provincial declaró la emergencia en los departamentos del centro-norte de la provincia y definió la intervención a través del programa que se denominó “Plan Agua Chubut” (PACH).

La superficie que abarca este plan se encuentra representada en la Figura 1.

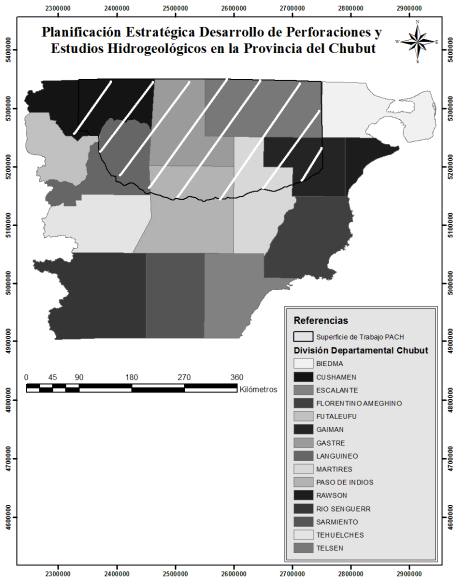


Figura 1. Superficie Plan Agua Chubut (PACH.) Provincia del Chubut.

Como consecuencia del escenario planteado, el actual gobierno anuncia un plan de acción, el cual contempla la ejecución de perforaciones dentro del ámbito mencionado. La medida propuesta pretendió reactivar la actividad ganadera y solventar la escasez de agua para consumo doméstico, en los departamentos afectados.

El plan sumó los esfuerzos mancomunados, entre el Instituto Provincial del Agua (IPA) y la Corporación de Fomento del Chubut (CORFO). Los Organismos dividieron las tareas en: aspectos técnicos, IPA y administrativos-comunicacionales, CORFO.

El objetivo de este trabajo es describir las tareas desarrolladas en el Plan Agua Chubut y los resultados obtenidos en un plazo de 7 meses que tendieron a superar la grave crisis de la región derivada de la escasez del recurso hídrico.

Características generales del área de trabajo

La Provincia del Chubut se encuentra emplazada en el centro de la Región Patagónica. Limitada por los paralelos 42º - 46º de latitud Sur, y meridanos 63º35' – 72º 08' de longitud Oeste. La superficie que abarca la Provincia es de 224.776 km². El área de trabajo se localiza en la porción centro norte de la provincia, ocupando una superficie de 74.803 km², el 33.28% del territorio provincial.

Los accesos a la zona de trabajo comprenden, rutas nacionales y provinciales pavimentadas, rutas de tierra consolidadas, caminos consolidados de tierra y sin consolidar y huellas internas de campo que muchas veces resultan difícil transitar.

De acuerdo a los datos extraídos de diversas estaciones meteorológicas pertenecientes al IPA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA Chubut), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), las precipitaciones medias anuales en la región, actualmente no superan los 120 mm. Ello muestra la existencia de un déficit hídrico destacable. La dirección prevaleciente del viento es del Oeste, mostrando una componente Sudoeste en la época invernal. Las temperaturas extremas oscilan entre máximos de 40ºC en verano y 30ºC bajo cero en invierno. El promedio de la humedad relativa se encuentra cercano al 40%.

Según Coronato y Del Valle (1998), la geografía exhibe áreas de cordones montañosos y serranías de mediana altura, en la fracción occidental principalmente, con promedios de 1.400 msnm (metros sobre el nivel del mar). Se reconocen zonas mesetiformes que abarcan una extensa superficie en la fracción Oriental, con cotas de 400 msnm en las cercanías al Valle del Río Chubut, las cuales se incrementan hasta 1.020 msnm en la Pampa de Gastre.

El ámbito geológico (Ardolino et al, 2004; Proserpio, 1978; Silva Nieto, 2005), presenta rocas de variadas edades, desde el Precámbrico (basamento ígneo-metamórfico. Fm. Cushamen,) que aflora en el noroeste, hasta el Cuaternario (depósitos aluviales modernos que recubren las pampas y depresiones). A su vez se pueden reconocer representantes rocosos del Paleozoico como ser; granitos de la Fm. Mamil Choique, Vulcanitas jurásicas, Fm. Lonco Trapial, Grupo Chubut del cretácico, entre otros. El Cenozoico en general se caracteriza por eventos volcánicos representados por basaltos terciarios, ignimbritas, tobas. Además se localizan en los sectores más orientales depósitos sedimentarios marinos de la Fm. Salamanca, entre otros.

Descripción del Plan

A partir de un relevamiento primario se logró identificar a 80 productores en situación de emergencia, que se calificaron como casos "Prioritarios". Estos, demandaban de forma

urgente, la necesidad de efectuar una perforación, la cual cubriera las necesidades de agua. En la Figura 2, se observa la distribución de los productores identificados como "Prioritarios".

Figura 2. Localización de productores prioritarios y principales poblaciones de la Meseta Central. Provincia del Chubut.

El proyecto se dividió en dos etapas, contando a su vez, con la ejecución de distintas fases. En forma sintética se describen los procedimientos aplicados en cada una de las etapas.

Etapa 1

La primera actividad de la etapa 1 consistió en recopilar antecedentes e información de utilidad. Se incluyeron datos ganaderos, estado de pasturas, núcleos familiares estables en el campo, solicitudes de ayudas por parte de los productores, e información técnica específica: imágenes satelitales, mapas topográficos, geológicos, precipitaciones.

El segundo paso en esta etapa fue visualizar la distribución de la demanda de agua. Para ello se partió de un listado de casos "Prioritarios", conformándose un GIS, para cuya georreferenciación se empleó el Sistema de Coordenadas Cartográficas WGS 84 – Posgar 98 – Faja 2. La amplia superficie que abarcaba el estudio, los accesos a determinadas zonas, la ausencia en gran parte de los propietarios de campos y el corto plazo de ejecución de las tareas, condujo a planificar una rápida estrategia de acción. Esta, consistió en dividir la zona de trabajo en franjas meridionales, en base a la distribución de los campos (aspectos catastrales) y las vías de acceso (rutas nacionales, provinciales, caminos vecinales y huellas internas de campo). El conocimiento que poseía el Coordinador del proyecto, acerca de la distribución de las áreas permitió elaborar los primeros criterios que se aplicarían para avanzar rápidamente en el plan. A su vez, la información adquirida, sustentó la discriminación de los sectores que serían destinados a perforar, aquellos donde se realizarían estudios hidrogeológicos y las zonas en los cuales habría que mejorar el sistema de captación existente.

Para el caso de la planificación de perforaciones a los productores se tuvo como parámetro base la cantidad de animales, el uso del recurso (principalmente ganadero), estado de los accesos para permitir el desplazamiento de un equipo de perforación, situación socio-económica, condiciones ambientales, presencia de posibles acuíferos, estado forrajero de los campos y el tiempo requerido para la ejecución de tareas.

Los estudios hidrogeológicos: se proyectaron en sectores donde no se cumplimentaban los requisitos para efectuar una perforación. Comprendían áreas geológicamente complejas, productores asilados y alejados de los presentes en el listado "Prioritarios".

El plan para el mejoramiento de los Sistemas de Captación abarcó a productores que poseían menos de 80 animales, con una utilización del recurso principalmente doméstico, en ambientes donde el nivel freático había descendido y poseía capacidad de captación mediante profundización y abarcaban, áreas inaccesibles al equipo de perforación.

El siguiente paso fue el desarrollo de tareas de gabinete, que abarcó la ubicación en la cartografía de perforaciones y sistemas de captaciones vigentes, planificación de salidas al campo (desplazamientos, logística, tiempos de intervención), la elaboración de los TDR aplicados a la contratación de empresas y los contenidos mínimos de los pliegos de licitación.

Se continuó con la ejecución de salidas al campo, incluyendo relevamientos y georeferenciación de manifestaciones de aguas superficiales y subterráneas, medición de parámetros físico-químicos in situ, medición de niveles freáticos y/o piezométricos, reconocimiento de la geología, edafología, flora, redes hidrográficas, y demás tareas a fines direccionadas a obtener información.

Luego se procedió al procesamiento de la información adquirida. Cada uno de los relevamientos evidenció la carencia de agua para uso doméstico y ganadero en un número

abultado de pobladores. Ello obligó a replantear la sistemática propuesta que implicó una modificación de los criterios.

En relación a las perforaciones se priorizó a los productores más afectados por la acumulación de ceniza volcánica, situación socio-económica desfavorable, situados en valles amplios inter-montanos e intra-montanos siempre y cuando el ámbito lo permitiera, en los sectores en los cuales se disponía de abundante información, áreas que accedieran a distribuir agua a dos o más productores.

Los estudios hidrogeológicos se plantearon para aquellos puntos más distantes, en zonas que presentaban incertidumbre, áreas mesetiformes, las regiones de complejidad geológica y aquellas en las cuales no se dispusiera de tiempo para su recorrida

Para el mejoramiento de los sistemas de captación (construcción de pozos de gran diámetro) se planificó en aquellos casos de uso doméstico del agua, con una cantidad mínima de animales, en zonas de montañas y sierras, mallines que demostraban condiciones estacionales de saturación de agua.

Luego se elaboraron informes y se presentaron los resultados ante las autoridades competentes (IPA Y CORFO).

Finalmente se planteó efectuar cinco (5) perforaciones de pequeño diámetro, asociadas a las perforaciones proyectadas. El objetivo, contar con pozos de observación, los cuales permitieran a futuro realizar ensayos de bombeo y así, obtener información acerca de los parámetros hidráulicos de los acuíferos. Los pozos propuestos, se encontraban ligados a valles amplios (pampas de Gastre, Aldea Epulef, Lagunita Salada) rellenos de material moderno, asociados con áreas de recarga destacables.

Etapa 2

En esta etapa, una vez definidos los trabajos que se realizarían en cada uno de los ámbitos estipulados, se confeccionaron modelos de planillas aplicados a los controles de perforación (Tabla 1), para la verificación de las tareas efectuadas en los estudios hidrogeológicos, construcción de pozos de gran diámetro e instalación de equipamientos.

Tabla 1. Extracto de las planillas de control de las perforaciones.

Punto Pliego	Paraje	Propietario	Latitud Sur	Longitud Oeste	Fecha Ejecución	Nivel del Agua (mbbp)	Profundidad Pozo (mbns)	Filtro (m)
1	Dos Lagunas	Ramirez	43 6 27.73	69 39 4.42	20/04/2012	21.42	38	6
2	Aldea Epulef	Fuentes	43 13 31.8	69 40 37.4	24/04/2012	44.49	65	8
3	Colan Conuhe	Cayulef Nora	43 7 45.7	70 05 04.0	28/04/2012	4.2	54	6
4	Aldea Epulef	Torres Domingo	43 18 36.1	69 48 31.3	27/04/2012	52.65	65	8
5	Cº Campanario	Ayilef Francisco	43 13 20.0	69 48 20.1	03/05/2012	15.21	23	6
6	Sierra Negra	Raposeira Jaime	42 46 04.1	69 47 31.7	15/05/2012	9.36	60	8
7	Sierra Negra	Perdo	42 50 52.5	69 50 41.7	18/04/2012	31.65	66	8
8	Taquetren	Varela Chico	42 31 36.74	69 38 27.51	20/03/2012	16.69	54	6

Luego se elaboró un formato estándar de informe, a presentar por cada una de las empresas intervinientes en los trabajos. De esa forma se unificó el criterio de evaluación en los informes presentados.

Posteriormente se planificaron las tareas de control y verificación en campo. Las salidas abarcaban áreas de trabajo y en ellas, se realizaban de forma simultánea tareas diversas; supervisión de una perforación, mediciones de profundidad de la perforación, niveles estáticos, parámetros físico-químicos y la verificación cumplimiento de los detalles plasmados en los pliegos de licitación (cañería de encamisado: caño geo-tigre corrugado de pared gruesa, filtro y punta de lápiz de idéntico material, pre-filtro de granza, base sanitaria de hormigón, tapa metálica con candado, identificación metálica del pozo, etc.).

Una situación similar, se aplicaba a la construcción de un pozo de gran diámetro, controlando la profundidad, cantidad de anillos instalados, niveles estáticos. En general se verificaban los trabajos, situación que permitía controlar el posicionamiento correcto de los anillos perforados, utilizados como filtros. En el caso de los equipamientos (bombas solares, molinos de viento y depósitos de almacenamiento), se confirmaba que las bombas estuvieran a la profundidad indicada, las placas solares orientadas hacia el Norte y anguladas según corrección por paralelo en época invernal, el tipo de equipamiento requerido en los pliegos de licitación. En los molinos de viento se comprobaba la construcción de las bases, armado y puesta a punto, posición de cilindros y los depósitos.

Las verificaciones de los estudios hidrogeológicos consistieron en la inspección de los relevamientos geoeléctricos del relevamiento de campo, mapeo y comprobación en los medios de comunicación que se habían

realizado las emisiones radiales dando conocimiento a los pobladores de los trabajos que serían ejecutados en sus campos.

El siguiente paso fue el procesamiento de la información adquirida en campo, elaboración de informes, certificados de obra. En el caso de las perforaciones, se confeccionaron fichas de cada pozo. Estas, contenían: perfil litológico descripción metro a metro (generado a partir de los detritos de perforación), fecha de ejecución, nombre del propietario, localidad y/o paraje, numero de pozo, coordenadas, profundidad de perforación, nivel estático, metros de filtro, cantidad y tipo de granza utilizada, tiempo de bombeo de limpieza, caudal de aforo.

Finalmente se desarrollaron los Términos de Referencia (TDR) y Alcances de Proyecto programados en las etapas sucesivas de trabajo ("Plan Agua Chubut II, III), las cuales cubrirían el resto del ámbito de la meseta central, incluyendo la planificación y distribución de las futuras perforaciones.

Resultados

En la etapa 1, se identificaron 38 localizaciones para efectuar perforaciones. Una porción de estas, diez (10), tendrían uso compartido entre dos o más productores. Las profundidades a las cuales se alcanzaría el nivel de agua, oscilarían entre 6 – 90 metros. La profundidad máxima determinada, se situó en 120 metros. Las perforaciones se programaron para ser entubadas con cañería geo-tigre corrugado de pared gruesa de 4", filtro de similares características, punta de lápiz, pre-filtro de granza (6-8mm), sello arcilloso de 30 cm situado por encima del pre-filtro, base sanitaria de hormigón de 40 x 40 x 25 cm, identificación metálica, tapa metálica con candado.

Los mejoramientos en las captaciones existentes proyectaron la construcción de 48 pozos de gran diámetro (jagüeles). Las profundidades máximas no superarían los 6 metros, el promedio del nivel freático rondaría los 2,5 metros. La obra se planifico utilizando una maquina retro-excavadora, camión hidro-grúa, anillos de hormigón de 1,5 metros diámetro sin perforar y perforados de forma helicoidal, con orificios de 1 ½", tapas de hormigón con orificio central.

Se establecieron ocho sectores de trabajo destinados a realizar estudios hidrogeológicos. Serían beneficiados 48 productores de forma directa y 56 de forma indirecta, a través de la ejecución de una perforación conjunta en el caso que el resultado de los estudios fuera favorable. Se estableció realizar relevamientos de campo, (geológico, geomorfológico, parámetros físico-químicos in situ, datos de interés), tareas de gabinete, desarrollo de sondeos eléctricos verticales (SEV), identificados en el campo mediante estacas de madera pintadas con color fluorescente.

En la etapa 2, se ejecutaron la totalidad de las perforaciones propuestas. El porcentaje de aciertos arrojó un 92%, solamente en dos situaciones, no se localizó agua. A su vez una de las perforaciones que si detectó agua, se desestimó, a raíz de no contar con los caudales mínimos de extracción (el límite establecido en pliego de licitación no debería ser inferior a 1.500 L/día).

La cantidad de metros perforados, alcanzó los 1.392. Únicamente dos perforaciones superan los 70 mbbp (metros bajo boca de pozo) y una de ellas culminó en 102 mbbp. Los niveles de agua alcanzados demuestran valores muy dispares, desde 2 hasta 53 mbbp. A través del control geológico de pozo, la descripción de muestras y posteriores mediciones de niveles estáticos, se comprueba la presencia de acuíferos, libres y acuíferos con cierto grado de confinamiento.

Respecto a las características físico-químicas medidas in situ, mediante sonda multiparamétrica, en general las aguas poseen bajas conductividades, valores menores a 800 µs/cm, en tres ocasiones se superaron los 3.000 µs/cm. El pH abarca un rango destacable, valores mínimos de 6.2 y máximos de 10.8.

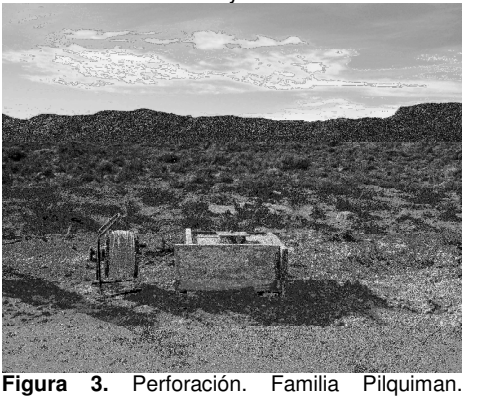


Figura 3. Perforación. Familia Pilquiman. Lagunita Salada. Dpto. de Gastre.

Al momento de finalizar el estudio, aún no se habían completado la construcción de los pozos de gran diámetro. Las condiciones climáticas condicionaron dichas tareas, determinadas zonas se tornaron inaccesibles.

No obstante, actualmente, se tiene conocimiento de la finalización de obra. De los

48 pozos de gran diámetro proyectados, se construyeron 30. Las profundidades promedian los 5 mbns (metros bajo nivel de suelo), mínimas de 2 mbns y máximas de 7,50 mbns. El nivel freático en general se estabiliza en los 2,5 mbns. Los valores de pH se comportaron de forma similar a los datos recabados en las perforaciones. Las conductividades medidas registraron valores muy disímiles, desde 120 µs/cm hasta 6.800 µs/cm.

Figura 4. Construcción de un Pozo de Gran Diámetro. Colonia Aborigen Pichiñan. Dpto. Paso de Indios.

El equipamiento de perforaciones agrupó dos conjuntos: las perforaciones existentes, un total de 17, y 10, correspondientes a las perforaciones efectuadas en la Etapa 2. Se instalaron 10 bombas solares de bajo caudal, 500 L/h, 17 molinos de viento de 8 pies, capacidad 1.450 L/h – 20 mbns – 20 Km/h. Se construyeron 27 depósitos de almacenamiento (tanques australianos) de 12.000 litros.

Figura 5. Equipamiento de una perforación, molino de viento y depósito de almacenamiento. Dpto. Cushamen. Provincia del Chubut.

Las áreas destinadas a realizar estudios hidrogeológicos no fueron completadas en su totalidad. De las ocho planificadas se cubrieron seis. Solamente treinta y dos (32) productores se vieron beneficiados de forma directa y nueve (9) vinculados a los anteriores. Los trabajos planeados y propuestos fueron completados con éxito dentro del ámbito mencionado.

Justificación de los Resultados

La localización, profundidad de las perforaciones y la estimación del nivel de agua subterránea, obtuvo sustento en la observación, análisis e interpretación de los atributos superficiales (redes de drenaje, afloramientos de rocas y sedimentos con características acuíferas, geoformas, rasgos distintivos en la vegetación), y datos relativos de subsuelo (pozos manuales, perforaciones, vertientes, agudas). No se efectuaron métodos indirectos durante el estudio (geoeléctrica, entre otros).

En relación a los pozos de gran diámetro se observó durante las salidas al campo, que un gran número de pobladores, lograrían cubrir sus necesidades mejorando los sistemas de captación existentes. La merma en la recarga, presentaba una disminución del nivel freático en los acuíferos libres. Determinadas zonas presentaban la condición de profundizar los pozos manuales, situación que condujera a localizar el nivel freático descendido. La limpieza de las aguadas y vertientes demostraban similares circunstancias.

Los pozos manuales, vertientes y aguadas, presentaban contextos acordes a un mal aprovechamiento del recurso, encontrándose desprovistos de protección a las inclemencias del tiempo, acción de los animales y eventos naturales. Determinadas zonas, manifestaban gran dificultad para trasladar un equipo de perforación (áreas sin accesos, escarpadas, con presencia de valles profundos, etc.). Estos pobladores estaban localizados en áreas de recarga, presencia de vertientes y aguadas, muchas de ellas perdidas por efecto de medios fracturados en rocas ígneas y/o deficientemente mantenimiento.

Con respecto a los estudios hidrogeológicos, uno de los condicionantes principales ha sido el corto plazo, en el cual se debía presentar los resultados. Una perforación conlleva un gasto económico significativo, el que es absorbido satisfactoriamente, cuando el resultado es positivo. Si a este hecho sumamos la ilusión de los beneficiarios, genera una gran complacencia. Con el objetivo de cumplir los actos mencionados, en aquellas áreas de complejidad geológica, donde se constataba

carencia de información y no se poseía una certeza en base al conocimiento de campo, se decidió realizar estudios hidrogeológicos.

Conclusiones y Recomendaciones

El trabajo planteado al inicio de la propuesta, efectuar 80 perforaciones dentro del ámbito de la Meseta Central (Plan Agua Chubut), superó con creces las expectativas. Un total de 146 productores se vieron beneficiados, reflejo de las tareas efectuadas.

El proyecto quedó enmarcado en los plazos estipulados para tal fin, a pesar de que hubo un incremento del 82,5% de productores.

Se logró generar un GIS con información de base, en el cual se volcaron los datos obtenidos en los relevamientos de campo e información substancial como ser: estado económico de las familias, cantidad de ganado, situación social, entre otros. Actualmente las capas generadas en el GIS (perforaciones, estado ganadero, situación socio-económica, química de aguas, monitoreo estacional) son empleadas por el IPA y CORFO.

Las tareas fueron distribuidas en los departamentos incluidos dentro de la Meseta Central (Telsen, Mártires; Paso de Indios, Gastre, Languineo y Cushamen). Asimismo las perforaciones, los pozos de gran diámetro y los equipamientos, se concentraron en los departamentos de Cushamen, Gastre y Languineo.

La cantidad de metros perforados alcanzó los 1.392 m, hallándose una profundidad promedio de metros perforados por pozo, en 42 mbns. Todas las perforaciones cumplieron con los requisitos plasmados en los pliegos de contratación. Las profundidades de las perforaciones programadas y la altura proyectada del nivel de agua, quedaron contenidas en los rangos estipulados.

Se concretaron las cinco perforaciones destinadas como pozos de observación.

Fueron solucionados los problemas de los pozos manuales, vertientes, aguadas, aljibes, que en la mayoría de los casos, no poseían sistemas de captación adecuados ni almacenamientos acordes a los usos.

Los pozos de gran diámetro construidos, permitieron dar una rápida respuesta a las falencias que presentaban los sistemas de captación. Mejorando de forma substancial la calidad y cantidad de agua, ya que estos, funcionan como un depósito en sub-suelo.

Como resultado de los estudios hidrogeológicos, se ejecutaron 10 perforaciones, localizándose agua en todos los casos.

Transcurrido un año, de haber instalado los sistemas de extracción de agua (bombas solares y molinos de viento), y almacenamiento, actualmente los productores se encuentran en proceso de incremento de la hacienda y en determinados casos de riego en pequeñas parcelas destinados a pastura y/o cultivo.

La mayoría de las aguas muestreadas en las diversas etapas del estudio, mostraron poseer condiciones aceptables para el consumo humano y ganadero. Análisis posteriores (físico.-químico, iones mayoritarios y minoritarios), efectuados durante otros estudios, corroboran la situación mencionada.

En general los valles inter-montanos y las áreas serranas poseen un acuífero freático de escasa potencia, poco productivo y actualmente deficitario.

Los mallines localizados en cotas inferiores a los 1.300 msnm (metros sobre el nivel del mar), en general se encuentran en estado de degradación, demostrando un avance erosivo destacable sobre los mismos.

Se posee conocimiento, a través de información proporcionada por CORFO, que se equiparan durante el resto del año 2013 y parte del 2014, las perforaciones que aún se encuentran cerradas.

A partir de la presente experiencia, se realizaran las siguientes sugerencias para mejorar las posibilidades de éxito en este tipo de proyectos:

- Gestionar la contratación de un profesional especialista en el área hidrogeológica, elaboración y evaluación de proyectos, el cual asuma la responsabilidad de coordinador
- Requerir la presencia de un Geólogo en boca de pozo en cada perforación que se realice y elaboración de informes.
- Realizar aforos en perforaciones y pozos de gran diámetro.
- Efectuar análisis físico-químicos, iones mayoritarios y minoritarios, metales pesados y bacteriológicos en los casos que se requieran.
- Generar una red de monitoreo estacional.
- Realizar capacitaciones a los técnicos de CORFO en temáticas: mantenimiento de molinos de viento, bombas solares, muestreos de agua, medición de niveles y otras actividades inherentes a los trabajos que desarrollan con los productores y las comunidades.

Agradecimientos

Se agradece al Administrador General del IPA, Ing. Nelson Williams, a la Sra. Ana Amato Presidenta de CORFO, la posibilidad de presentar el presente trabajo. Asimismo se

expresa el agradecimiento por la colaboración brindada a los técnicos de IPA, CORFO y choferes del IPA por su cordial predisposición.

Referencias

Ardolino, A, Lizuain, A. y Salani, F. 2004. Mapa Geológico de la Hoja 4369 II Gan Gan 1:250.000. Provincia del Chubut. Segemar. Buenos Aires

Coronato, F. y Del Valle H. 1998. Caracterización Hídrica de las Cuencas Hidrográficas de la Provincia del Chubut. Centro Nacional Patagónico. CENPAT-CONICET.

Proserpio, C.A. 1978. Mapa Geológico de la Hoja 42 d Gastre 1:200.000. Provincia del Chubut. Segemar. Buenos Aires

Silva Nieto, D.G. 2005. Mapa Geológico de la Hoja 4369 III Paso de Indios 1:250.000. Provincia del Chubut. Segemar. Buenos Aires

Indicadores de sustentabilidad de los recursos hídricos subterráneos en el área central de la provincia de Santa Fe, Argentina

Ofelia Tujchneider[1,2], Marcela Perez[1], Marta Paris[1], Mónica D'Elía[1], Silvina Gualini[1] y Verónica Musacchio[1]

[1] Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL). Ciudad Universitaria. Ruta Nac. N° 168, Km 472,4 (3000) Santa Fe, Argentina.
[2] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
Mail de contacto: maperez@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

El desarrollo de los indicadores de sustentabilidad de los recursos hídricos subterráneos es un proceso de aproximación científica, que presenta las distintas características de los sistemas de agua subterránea de manera simplificada y comprensible. Si bien su empleo es relativamente reciente, su apropiada selección proporciona un fundamento válido sobre el cual basar las acciones coordinadas en el proceso de explotación, planificación y gestión del recurso. En este trabajo se presenta la utilización de indicadores de sustentabilidad en un área de la provincia de Santa Fe, Argentina donde el recurso hídrico subterráneo es la única fuente de abastecimiento para satisfacer la demanda en los distintos usos. De los indicadores utilizados, los de explotación resultaron los más destacados, señalando que la recarga local no es suficiente para satisfacer la demanda actual en el área. La identificación de estos indicadores incorpora el alto valor agregado que ofrecen los mismos como medidas sintéticas de sustentabilidad de la explotación de las aguas subterráneas para la planificación del uso de las mismas.
Palabras clave: agua subterránea, indicadores, sustentabilidad, Santa Fe, Argentina.

ABSTRACT

The development of groundwater resources sustainability indicators is a process of scientific approach that presents the different characteristics of the groundwater systems in a simplified and understandable way. Although its use in such a system is relatively recent, their proper selection provides a valid basis to support coordinated actions in the process of operation, planning and resource management. This paper focuses on the use of sustainability indicators in an area of the Santa Fe province, Argentina, where groundwaters are the only source of supply to satisfy the demand for the various purposes. From the indicators used, the indicators of groundwater abstraction demonstrated that local recharge rate is not sufficient to meet the current demand in the area. Therefore, the identification of these indicators incorporates the high added value that they offer as a synthetic measures for the sustainability of groundwater exploitation.
Keywords: groundwater, indicators, sustainability, Santa Fe, Argentina.

Introducción

El área central de la provincia de Santa Fe constituye una de las principales regiones productivas de la provincia y el país, destacándose por su dinamismo tanto en el ámbito económico como socio-cultural.

En particular, el área de los departamentos Las Colonias y Castellanos (Figura 1) se caracteriza por una fuerte actividad agrícola-ganadera e industrial. La producción de cereales y oleaginosas presenta gran preponderancia en esta área; la que es complementada por industrias lácteas, cárnicas y de curtidos fortalecidas por la presencia del sector ganadero. Se destacan, asimismo, los emprendimientos madereros, mueblerías finas, provisión de sistemas industriales y alimentarios.

La cabecera del Departamento Las Colonias, la ciudad de Esperanza, tiene una población de casi 42.000 habitantes (Censo 2010). En su distrito se asientan más de 300 establecimientos comerciales de diversos rubros. La buena calidad natural que presentan las aguas del sistema acuífero que subyace al área y la escasez de recursos hídricos superficiales aprovechables hacen que el agua

subterránea allí alojada sea explotada con exclusividad como fuente de abastecimiento.

A su vez, el agua proveniente de este sistema se exporta a la tercera localidad de la provincia y cabecera del Departamento Castellanos, la ciudad de Rafaela (92.245 habitantes).

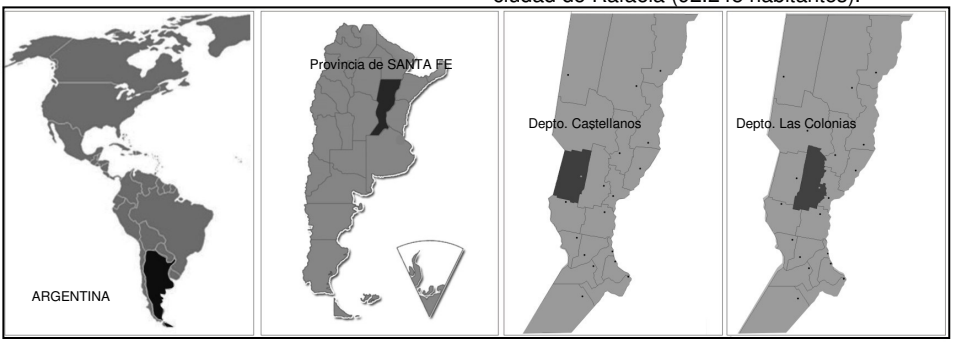


Figura 1 Ubicación de los Departamentos Castellanos y Las Colonias (Santa Fe, Argentina)

Dada la importancia del agua subterránea en la región, se propone en este trabajo aplicar una serie de indicadores de sustentabilidad con el fin de informar, de una manera clara y sencilla, la situación de las mismas en una zona donde se explota el recurso, fundamentalmente, para abastecimiento público. Se espera que los indicadores seleccionados contribuyan a la evaluación del manejo de estos recursos hídricos, al desarrollo de nuevas acciones y/o al establecimiento de planes y proyectos para su apropiada gestión.

Antecedentes

Investigaciones previas han permitido caracterizar al sistema acuífero que abastece a las ciudades de Esperanza y Rafaela y sus áreas circundantes (Figura 1), y constituyen la base del conocimiento para la aplicación de algunos de los indicadores de sustentabilidad propuestos por Vrba y Lipponen (2007).

Características generales del sistema acuífero

Las características geológicas e hidrogeológicas del área de estudio se conocen a través de los trabajos de Fili y Tujchneider (1977), Fili *et al.* (1999) y Tujchneider *et al.* (1998, 2000 y 2005b). Una esquematización con mayor detalle del funcionamiento de este sistema, en el área aledaña a la ciudad de Esperanza, corresponde a Paris et al. (2011).

De estos antecedentes se desprende que la columna hidrogeológica local (Figura 2) está conformada por: un manto acuícludo de origen marino, cuya porción cuspidal está compuesta por arenas grises, arcillas arenosas y arcillas verdes (Fm. Paraná – Mioceno) cuyo techo se encuentra a aproximadamente cota -6; un acuífero semiconfinado, compuesto por arenas finas, medianas y gruesas de origen fluvial, de aproximadamente 24 m de espesor medio (Fm. Ituzaingó – Plioceno); un manto acuitardo discontinuo (Grupo Pampa – Pleistoceno) que presenta -en promedio- un espesor de 3 m y un acuífero freático compuesto por sedimentos finos de origen eólico, palustre y lacustre de aproximadamente 17 m de potencia (Grupo Pampa – Pleistoceno).

El conjunto presenta un comportamiento hidráulico de tipo multicapa. No obstante, el acuífero semiconfinado alojado en las arenas de origen fluvial constituye la principal unidad acuífera de la región. Se lo denomina informalmente “acuífero Puelche”. El acuífero libre, dados su rendimiento y calidad, se explota fundamentalmente para actividades agrícolas menores.

La ocurrencia de flujos verticales bidireccionales entre el acuífero libre y el semiconfinado es función de las relaciones de carga hidráulica imperantes (Tujchneider *et al.*, 2005a). La extracción de agua del acuífero semiconfinado no solo se da por la afluencia lateral del agua del propio acuífero en las proximidades de la perforación, sino que también se puede inducir el flujo desde el acuífero libre suprayacente y el ascenso de agua salada proveniente de los estratos de origen marino infrayacentes (arenas grises).

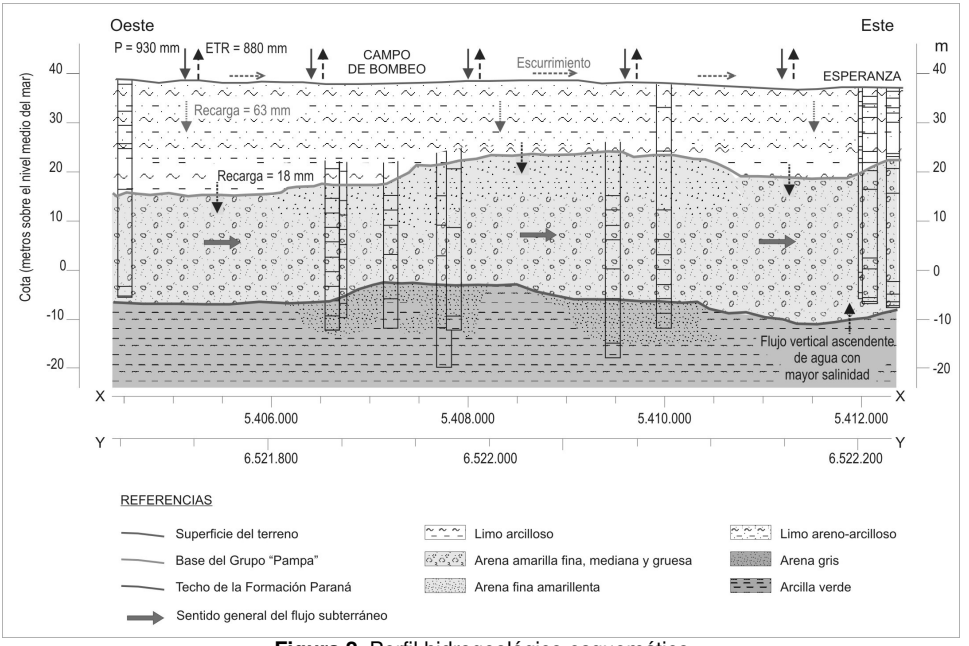


Figura 2 Perfil hidrogeológico esquemático

Recarga y potencialidades del acuífero

Investigaciones realizadas en el área de estudio tendientes a corroborar la procedencia del agua subterránea y estimar volúmenes de recarga, indican que la misma es de origen meteórico. En particular, el acuífero freático tiene posibilidad de ser recargado a partir de precipitaciones locales, ocurridas en los meses de verano y otoño. Por su parte, el acuífero semiconfinado aloja aguas "submodernas"; es decir, recargadas antes de la década del '50 (D'Elía *et al*., 2007 y 2008).

Estimaciones de la recarga a ambas capas acuíferas, para el período 2002-2006, arrojan valores de 63 mm/año para la capa acuífera libre y de 18 mm/año para la capa semiconfinada subyacente (D´Elía *et al*., 2007).

Para la estimación de la reserva se ha considerado un área rectangular que abarca la totalidad del campo de bombeo actual. Dada la singularidad constitutiva del sistema hidrogeológico bajo análisis (Tujchneider et al., 2005b) y el carácter regional de la capa acuífera en explotación, sus extremos se dispusieron en función del radio de influencia de las perforaciones que integran el mismo. El área resultante fue de 20 Km^2.

La variación de cargas hidráulicas se evaluó para el período comprendido entre agosto de 2002 y abril del 2011. Se dispuso para ello de mediciones continuas de nivel de agua en dos pozos de monitoreo, PM5 y PM6, que registraban las oscilaciones en la capa acuífera libre y en la semiconfinada, respectivamente. Las variaciones oscilaron entre 3,82 y 9,72 m, para el acuífero libre, y entre 4 y 9,71 m para el semiconfinado (Figura 3).

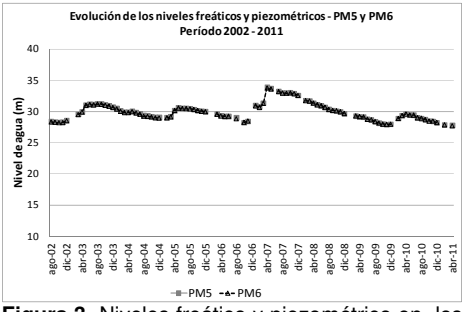


Figura 3 Niveles freático y piezométrico en los pozos de monitoreo

La evolución de los niveles que se observa en la Figura 3 indica una similitud para ambos puntos de control, lo que pone de manifiesto el comportamiento multicapa definido para este sistema.

De la conceptualización realizada, y las mediciones efectuadas en campo, el valor de reserva total estimada para el área es de 43,4 Mm^3.

Demanda

De acuerdo al Censo 2010, la población de la ciudad de Esperanza es de 42082 habitantes. El 97 % de estos habitantes cuenta con servicio de agua potable (ASSA, Aguas Santafesinas S.A. –empresa prestataria del servicio- en su sitio institucional).

La explotación del agua subterránea en el distrito Esperanza se realiza a través de un campo de bombeo cuyas perforaciones se encuentran mayormente ubicadas en una zona rural, al oeste de la ciudad. (Figura 4).

Este campo de bombeo está compuesto por 28 perforaciones que extraen, en promedio, entre 38 y 78 m^3/h (período 2008-2011).

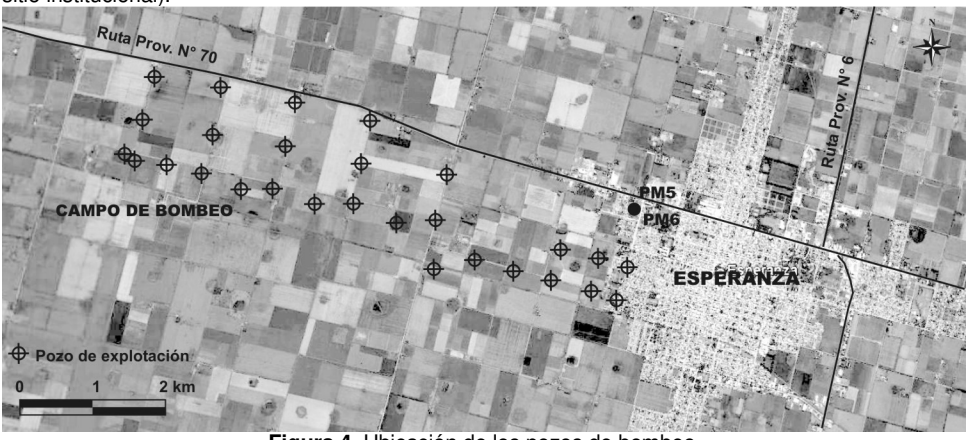


Figura 4 Ubicación de los pozos de bombeo

De acuerdo a lo informado por ASSA el volumen extraído del acuífero, en el año 2012, para abastecimiento fue de 13,86 Mm^3.

Del total de perforaciones, 20 alimentan un acueducto con una capacidad máxima de conducción de 1080 m^3/h, y que transporta el agua a la vecina localidad de Rafaela, situada a 50 km al oeste de Esperanza.

En particular, la ciudad de Esperanza es una ciudad que presenta un sostenido desarrollo social y económico. Muchas de sus industrias trascienden ampliamente el mercado local. De acuerdo a la información proporcionada por el CICAE (Centro de Industria, Comercio y Afincados de Esperanza), a mayo de 2013, la ciudad de Esperanza cuenta con un número estimado de: 71 establecimientos industriales, 129 de servicio y 134 comercios.

En función del trazado de la red de agua potable, y la ubicación de los establecimientos industriales, la totalidad de estas empresas está ubicada dentro del radio del servicio de red de agua potable de ASSA (Figura 5).

No obstante ello, se tiene conocimiento que las industrias más importantes –de mayor volumen de producción- poseen sus propias perforaciones. Sin embargo, se desconoce el volumen de agua subterránea empleado por las mismas en sus procesos productivos. Lo mismo ocurre con otras actividades económicas que se realizan en el área (por ejemplo: riego suplementario, bebida para ganado, otros).

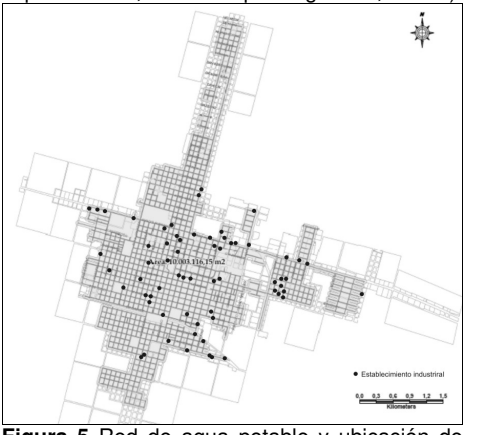


Figura 5 Red de agua potable y ubicación de las industrias según CICAE

Calidad natural del agua subterránea

En líneas generales, el agua alojada en el acuífero libre es utilizada para riego, abrevadero de ganado y consumo humano en el área rural. Su calidad es variable, y en algunas áreas se han evidenciado altos contenidos de nitratos (superiores a los 100 mg/l, D'Elía et al., 2012).

El agua alojada en el acuífero semiconfinado es bicarbonatada sódica, con contenidos salinos por debajo de los estándares establecidos en la normativa vigente (Ley 11.220). No obstante ello, en determinados períodos, esta capa acuífera ha evidenciado variaciones en su composición química debido, fundamentalmente, al régimen de explotación al que fue sometido y también al manejo de efluentes provenientes de la actividad industrial. Estas evidencias han sido estudiadas por Tujchneider *et al*., 1998, 2005a, 2005b; Fili *et al*., 1999; Paris *et al*., 1998, 2011.

Cabe tener presente que la capa semiconfinada se encuentra, inferiormente, en contacto directo con el acuífero alojado en sedimentos de origen marino. Por lo tanto, si en la zona de explotación, la extracción es superior a la afluencia horizontal y a la recarga vertical, el caudal se verá compensado por la afluencia de agua de los niveles inferiores de mayor salinidad.

Indicadores de sustentabilidad de agua subterránea

El desarrollo de los *indicadores de sustentabilidad* de aguas subterráneas es un proceso de aproximación científica que presenta distintas características de los sistemas geohidrológicos de manera simplificada y comprensible. Estos indicadores, que se basan en datos medibles u observables, son científicamente robustos y políticamente relevantes, ya que suministran información acerca del estado actual, las tendencias y los impactos probables sobre estos sistemas (Vrba y Lipponen, 2007). Desde el punto de vista de su funcionalidad, un indicador es un instrumento útil para medir variaciones y posibilitar comparaciones (Pernía et al., 2005).

La selección de los indicadores de sustentabilidad de aguas subterráneas para el área objeto de estudio, proporciona un fundamento válido sobre el cual basar las acciones coordinadas en el proceso de toma de decisiones, y evaluar sus efectos sobre este sistema. Se basan en los Indicadores de Sustentabilidad del Recurso Hídrico Subterráneo propuestos en Vrba y Lipponen, (2007). En particular los considerados por Hirata et al. (2007) quienes, de acuerdo al rango de cada indicador definido, asignaron tres categorías (baja, intermedia y alta) relacionadas a la situación que cada uno de ellos refleja. La categoría baja está asociada a una situación de cierta comodidad, mientras que la alta con una situación problemática o de alerta.

Cabe destacar que los criterios más utilizados para la selección de un indicador son: que tenga validez científica (buen conocimiento del sistema que se estudia), representatividad, fiabilidad y relevancia, que sea sensible a los cambios que se produzcan (tanto del medio como de las actividades humanas relacionadas con él), predictivo (de modo de alertar situaciones no deseadas), comparable y comprensible, que tenga cobertura geográfica y buena relación costo-eficiencia y por último, que proponga metas a alcanzar comparables con la situación actual (MIMAN, 2000).

Indicadores de la importancia del agua subterránea

Son aquellos que hacen referencia a la importancia del suministro público de las aguas subterráneas y al grado de participación del agua subterránea en los distintos usos. Hirata et al. (en Vrba y Lipponen, 2007) plantean dos indicadores de importancia que definen de la siguiente manera:

Indicador 1 (I1), expresado en %

$$I1 = \frac{\text{Población servida con agua subterránea}}{\text{Población total}} * 100$$

Para el área de estudio este indicador es igual a 97,5 %. Lo que implica una alta dependencia respecto a la oferta pública de las aguas subterráneas.

Indicador 2 (I2), expresado en %

$$I2 = \frac{\text{Extracción total del agua subterránea } [\text{m}^3/\text{año}]}{\text{Total del recurso } [\text{m}^3/\text{año}]} * 100$$

Para el área de estudio se ha considerado como extracción total a la informada por la empresa prestataria del servicio para abastecimiento humano: 13,86 Mm^3/año.

Como total del recurso, y dado la falta de recursos hídricos superficiales aprovechables en el área, se ha considerado, a la reserva reguladora interanual (27,35 Mm^3/año).

Este indicador presenta un valor de 50,7 %, demostrando la alta demanda del agua subterránea en la región.

Indicadores de explotación del agua subterránea

Son aquellos que relacionan el recurso de aguas subterráneas al total de la población, la extracción al recurso disponible y a la recarga, y los niveles piezométricos medidos en un período de tiempo.

Indicador 3 (I3),

$$I3 = \frac{\text{Recurso de agua subterránea } (\frac{\text{litros}}{\text{día}})}{\text{Población total}}$$

La cantidad de agua subterránea disponible en relación a la cantidad de habitantes del área que la utilizan se torna un factor importante para caracterizar el desarrollo económico y social de una región.

Si bien no existe en la actualidad un valor umbral para este indicador, en términos relativos, cuanto mayor sea I3, mejores posibilidades existen de utilizar el recurso para distintos propósitos.

Este indicador resulta significativo para tomadores de decisión ya que marca una situación de stress del recurso, y por lo tanto, posibles amenazas para el desarrollo económico a largo plazo.

Para el área de estudio, este indicador toma un valor de 555 L/día/hab. De acuerdo a la clasificación propuesta por Hirata et al. (2007), el I3 estaría mostrando una situación de stress moderada (500 < I3 < 1500 L/hab/día).

Indicador 4 (I4), expresado en %

$$I4 = \frac{\text{Extracción total del agua subterránea } [\text{m}^3/\text{año}]}{\text{Total del recurso hídrico subterráneo } [\text{m}^3/\text{año}]}$$

Este indicador estaría demostrando el grado de dependencia relativa del agua subterránea. Para el área considerada su valor es igual al I2.

Indicador 5 (I5), expresado en %

$$I5 = \frac{\text{Extracción total del agua subterránea } [\text{m}^3/\text{año}]}{\text{Recarga al sistema subterráneo } [\text{m}^3/\text{año}]}$$

Este indicador se refiere a la sustentabilidad del recurso de agua subterránea en función de las posibilidades de recarga local que se presentan en el área.

Los cálculos realizados para este indicador arrojan un valor de 4,85.

Al ser este indicador mayor que 1, se evidencia que las posibilidades de recarga local no son suficientes para mantener el equilibrio en este sistema.

Indicador 6 (I6)

Este indicador, que fue definido por Pernía et al. (2005) como un "índice de llenado", fue adaptado a la información local disponible. Para este caso, se lo considerara como un valor que mide las oscilaciones del nivel de agua respecto a los valores extremos medidos durante un período de registro determinado. El período de registro, en lo posible, debe ser lo suficientemente amplio como para abarcar distintos tipos de eventos (periodo de lluvias, sequías, bombeos prolongados, etc.). Para el área de análisis, este indicador presenta una tendencia decreciente (Figura 6), coherente con el resultando obtenido para I5.

$$(I6_h)_i = \frac{\text{NP}_{\text{i}} - (\text{NP}_{\text{min}})_{\text{i}}}{(\text{NP}_{\text{max}})_{\text{i}} - (\text{NP}_{\text{min}})_{\text{i}}}$$

NP, es el nivel piezométrico medido en el mes i

NP_{max}, es el nivel piezométrico máximo del periodo histórico considerado en el mes i

NP_{min}, es el nivel piezométrico mínimo del periodo histórico considerado en el mes i.

h, es el periodo histórico (años)

i, es la fecha (mes) en que se efectúa la medición

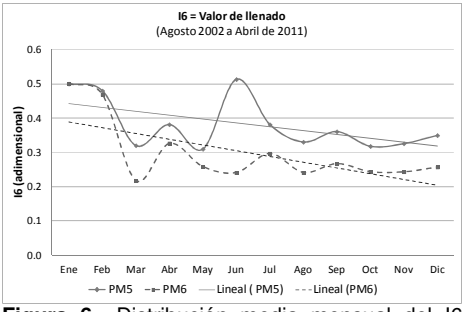


Figura 6 Distribución media mensual del I6 para el período agosto 2002 a abril de 2011

Indicadores de calidad del agua subterránea

Son aquellos que informan el estado actual y las tendencias espaciales y temporales de la calidad del agua, tanto con respecto a la existencia de áreas con problemas naturales de calidad como a la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero o sistema acuífero.

Respecto a la calidad natural del agua alojada en el acuífero en explotación, no se han evidenciado problemas naturales de calidad del

agua (conforme a estándares para agua potable). Sólo en determinados períodos, en los que se reflejó el modo de explotación, existió la afluencia de agua de mayor salinidad de los niveles inferiores y aportes del nivel superior.

Para evidenciar en forma temprana el deterioro de los recursos hídricos por estos procesos, Paris et al. (2011) han propuesto el uso del seguimiento de cloruros, sulfatos, nitratos, calcio y conductividad eléctrica, definiendo niveles umbrales y de alerta para cada uno de ellos.

En relación a la vulnerabilidad, París et al. (2010) presentaron el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los recursos hídricos subterráneos en explotación en un sector de la cuenca inferior del río Salado (provincia de Santa Fe, Argentina), correspondiente a un área aledaña a la localidad de Esperanza y al área objeto de estudio. En función de ese trabajo se pudo determinar que, para profundidades medias a bajas del nivel de agua, la totalidad del área de estudio presenta un índice de vulnerabilidad medio. Mientras que para profundidades mínimas, el 50 % del área presenta un índice de vulnerabilidad alto.

Indicador 7 (I7), expresado en %

Hirata et al. (en Vrba y Lipponen, 2007), definen al indicador de vulnerabilidad por la relación:

$$I7 = \frac{\text{Área total con alta vulnerabilidad } [\text{km}^2]}{\text{Área total considerada } [\text{km}^2]} * 100$$

De acuerdo a la expresión de I7, para el caso considerado, éste toma valores altos en el caso de profundidades mínimas del nivel de agua (I7 > 10 %), lo que estaría evidenciando una situación de alerta.

Conclusiones

La función principal de un indicador de sustentabilidad de los recursos hídricos subterráneos es la de condensar información referida a los mismos, simplificar la descripción del estado y las tendencias de su funcionamiento y servir como un instrumento útil para la comunicación.

Uno de los mayores retos al definir estos indicadores es, en primera instancia, el de disponer de un modelo conceptual hidrogeológico del área bajo análisis. La escala también es un atributo importante para el desarrollo e implementación de un indicador, ya que condiciona no solo la disponibilidad de información sino también la representatividad de los mismos. Por lo que la información que se disponga y procese para definir estos indicadores debe ser la adecuada y debe ser cuidadosamente considerada.

Los indicadores seleccionados para el área analizada han permitido sintetizar la situación actual de los recursos hídricos subterráneos bajo diferentes aspectos: la importancia del agua subterránea en la región; la extracción que se está realizando de este recurso y la calidad natural del agua subterránea.

Con respecto a la importancia del recurso hídrico subterráneo en la región, los indicadores I1 e I2 corroboraron la alta dependencia y la alta demanda de este recurso.

No obstante, el escenario descripto para el I2 sugiere que el agua subterránea puede seguir utilizándose atendiendo a las restricciones económicas (caudal para otros usos) y condiciones ambientales (ecosistemas dependientes, conservación del flujo base).

Con respecto a los indicadores de explotación de las aguas subterráneas, los más destacados son I5 e I6. El primero de ellos (I5) señala que la recarga local no es suficiente para satisfacer la demanda actual en el área considerada. El I6, que fue calculado sobre datos medidos del sistema acuífero, manifiesta una tendencia decreciente para el período considerado. Ambos indicadores presentan resultados coherentes.

Los indicadores de calidad del agua subterránea advierten a los planificadores, políticos y tomadores de decisión, acerca de la sensibilidad de este sistema a sus condiciones naturales y régimen de explotación al que es sometido.

Los indicadores presentados en este trabajo son una primera aproximación sobre la cual seguir avanzando. Se debió afrontar el hecho de estimar con datos insuficientes. En futuras etapas se focalizará en las estimaciones que deberían realizarse para considerar las descargas del sistema (tanto naturales como antrópicas no registradas) y las entradas al mismo (flujos de retorno, afluencia lateral y vertical) más acotadas.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional del Litoral por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación. A la empresa Aguas Santafesinas S.A. (ASSA), al Ente Regulador del Servicio Sanitario de la provincia de Santa Fe (ENRESS), y al Centro de Industria, Comercio y Afincados de Esperanza (CICAE) por la información proporcionada.

Referencias

D´Elía M., Tujchneider O, Paris M. y Pérez M. 2007. Evaluación de la recarga a los acuíferos en un sector del centro de la Provincia de Santa Fe. *V Congreso Argentino de Hidrogeología*. 479-488. Paraná, Entre Ríos, Argentina.

D'Elía M., Tujchneider O., Paris M., Perez M. y Gervasio S. 2008. Groundwater recharge assessment using environmental tracing methods". *5th International Conference on Tracers and Tracing Methods - TRACER 5*. Tiradentes, Mina Gerais, Brasil.

D´Elia M., Tujchneider O., Paris M., Perez M. & Pusineri G. 2012. Caso de Estudio: Acuífero de La Cuenca Baja del Río Salado, Argentina. *Acuíferos rurales en Latinoamérica. Metodologías de Análisis y Aplicación de Tecnologías para el Manejo Sostenible de Acuíferos en Zonas Rurales* L.Ribeiro, T. Betancur, M. D´Elia (editores).

Fili M. y Tujchneider O. 1977. Características geohidrológicas del subsuelo de la Provincia de Santa Fe (Argentina). *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral* (8), 105-113.

Filí M., Tujchneider O., Paris M., Pérez M., D´Elía M. 1999. Estudio del sistema de aguas subterráneas en el área de Esperanza-Humboltd y zona de influencia. *Servicio Especializado de Asistencia Técnica*. Informe Final.

Hirata R., Vieira Suhogusof A., Fernandes A. 2007. Groundwater resources in the State of São Paulo, Brazil. En: *Groundwater resources sustainability indicators*. Series on Groundwater N° 14. 73-84.

INDEC, 2010. Censo Nacional de Población y Vivienda

MIMAM, 2000. Indicadores Ambientales. Una propuesta para España. Serie monografías. Ministerio de Medio Ambiente de España. I.S.B.N.:84-8320-098-8.

Paris M., Tujchneider O., D'Elía M., Perez M. y Fili, M. 1998. Estudio de la interacción entre el sistema hídrico subterráneo y las actividades industriales en la Ciudad de Esperanza (Provincia de Santa Fe - República Argentina).Primera fase. *XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. 80-89.

Paris M., D'Elía, M., Pagliano M., Pusineri G., Gualini S., Tujchneider O. y Perez M. 2010. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en Esperanza (Santa Fe, Argentina). Consideración de su dinámica temporal. *X Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. Ref. 10 Comisión T1. Caracas, Venezuela.

Paris M., Tujchneider O., Pérez M. y D´Elia M. 2011. Identificación de indicadores de calidad del agua subterránea con métodos estadísticos multivariados. *VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea*. 268-275. Salta, Argentina,

Pernía, J. M.; Lambán, L. J.; Molinero, A. 2005. Indicadores e índices sobre el estado cuantitativo de las aguas subterráneas en función del nivel piezométrico. Aplicación al acuífero de la Sierra de Estepa. *VI Simposio del Agua en Andalucía*. IGME. 843-853.

Tujchneider O., Paris M., Fili M., D'Elía M., Perez M. 1998. Protección de aguas subterráneas. Caso de estudio: ciudad de Esperanza (República Argentina). Primera fase: Diagnóstico del sistema. *IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. Vol. 2, 805-821. Montevideo, Uruguay.

Tujchneider O., Paris M., D'Elía M., Perez M., Fili M. 2000. Modelo de gestión de los recursos hídricos subterráneos en el centro-oeste de la provincia de Santa Fe, Argentina. *1ST Joint World Congress on Groundwater. XI Congreso de ABAS y V Congreso de ALHSUD.* Trabajo completo en CD Rom. Fortaleza, Brasil.

Tujchneider O., Perez M., Paris M., D'Elía M. 2005a. Deterioro de fuentes de agua subterránea por ascenso de agua salada. *IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano – Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea*. Tomo II. 217-226. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Tujchneider O., Paris M., Perez M., D'Elía M. 2005b. Singularidad constitutiva de sistemas geohidrológicos de llanura y gestión de los recursos hídricos subterráneos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*. (5): 117-121.

Vrba J., Lipponen A. 2007. *Groundwater resources sustainability indicators*. UNESCO, IAEA, IAH. IHP-VI, Series on Groundwater N° 14.

Caracterización de la sostenibilidad socio-productiva y ambiental en áreas representativas de la cuenca del río Carcarañá, en el sur de la provincia de Santa Fe

Julio Castellarín[2], Julio Sánchez[1], Luis Herrera[1], Francisco Casiello[1], María del Valle Venencio[3] y Juan Carlos Papa[2]

[1] Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Química e Ingeniería "Fray Roger Bacon", Avenida Pellegrini 3314, Ciudad de Rosario (2000), Santa Fe, Argentina.
[2] INTA Oliveros, (Ruta 11 Km 353), Oliveros (2206), Santa Fe, Argentina.
[3] Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Paraje El Pozo, Ciudad de Santa Fe (3000), Santa Fe, Argentina
Mail de contacto: francisco_casiello@uca.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo aborda la caracterización socio-ambiental de un tramo de la cuenca del Río Carcarañá que atraviesa el sur de la Provincia de Santa Fe, en Argentina. El sector de interés ha sido especialmente afectado por el desarrollo de la agricultura extensiva que, si bien ha sido un elemento determinante del crecimiento económico y de la expansión tanto de las áreas de uso agropecuario, como del medio urbano y recreacional hacia el rural, ha sido sometido a un uso extensivo que requiere analizar la vulnerabilidad ambiental de la cuenca por pérdida de bienes y servicios ecosistémicos, evaluar el soporte ambiental, el uso de los recursos y la sostenibilidad ambiental. Para lograr este objetivo se propone el empleo de un marco de evaluaciones tanto sociales como biofísicas y energéticas para bosquejar modelos empíricos y/o teóricos que permitan interpretar la dinámica de los diferentes contaminantes en la cuenca, así como las preocupaciones de la población con relación a estos temas. En este informe nos centramos en los aspectos metodológicos que se emplearán para abordar esta problemática compleja
Palabras clave: Sostenibilidad, Cuenca Río Carcarañá, Metodología Multimodal.

ABSTRACT

This paper addresses the socio-environmental characterization of a stretch Carcarañá River basin which crosses the southern Santa Fe Province, Argentina. The sector of interest has been particularly affected by the development of extensive agriculture that, while it has been a key determinant of economic growth and the expansion of both agricultural use areas and of urban and rural recreational towards rural areas, has been subjected to such an extensive use that requires analyzing the environmental vulnerability of the basin for loss of goods and ecosystem services, assessing the environmental support and the usage of resources and the analysis of environmental sustainability. To achieve this goal, we propose a social and biophysical assessment framework to outline empirical and theoretical models that would allow to interpret the dynamics of the different pollutants in the watershed, as well as the concerns of the population with respect to these issues. In this report we focus on the methodological aspects that will be used to address this complex problem.
Keywords: Sustainability, River Basin Carcarañá, Multimodal Methodology.

Introducción

El desarrollo de la agricultura extensiva en el sur de la provincia de Santa Fe ha sido un elemento determinante del crecimiento económico y de la expansión tanto de las áreas de uso agropecuario, como del medio urbano y recreacional hacia el rural.

El área de interés en este estudio pertenece al tramo inferior de la denominada "Cuenca del río Carcarañá" (Figura 1), que atraviesa de oeste a este la provincia de Santa Fe con una superficie aproximada de 4700 km^2.

Esta porción de la cuenca se emplaza entre los 32° 26' y 33° 20' de Latitud Sur y los 62° 04' y 60° 36' de Longitud Oeste formando parte los departamentos Belgrano e Iriondo al norte del río Carcarañá y Caseros y San Lorenzo al sur del mismo, con una longitud de 140 km, con márgenes que oscilan entre 3 y 4 metros de altura y un ancho medio de 65 m, presentando un derrame medio anual de 2626 hm^3 entre

1981 y 2003 y un valor máximo de 5100 hm^3 en el año hidrológico 2001/2002 (Venencio, 2007).

El proceso de crecimiento indicado anteriormente en esta cuenca, fue acompañado por algunos problemas que fueron subestimados como: mayor producción de desechos urbanos resultantes de un consumo creciente; acumulación de materiales no degradables; residuos industriales, como fuentes probables de contaminación del aire, del agua superficial y subterránea y de los suelos. Algunos autores (Viglizzo, et al 2010) señalan esto como "frentes estructurantes de avance" lo cual significa que toda expansión de la agricultura tiende a transformar la dinámica económica, social y ambiental de las regiones intervenidas.

Figura 1. Cuenca del Río Carcarañá, Santa Fe.

La región objeto del estudio es una de las más afectadas en este sentido, con áreas de vulnerabilidad para el ordenamiento territorial sostenible (Monti et al 2010). El modelo productivo agrícola extensivo se caracteriza por el predominio de los cultivos sin labranza, con una superficie en siembra directa de 19 millones de hectáreas, por las escasas rotaciones con una marcada tendencia al monocultivo de soja con 16,6 millones de hectáreas de soja tolerante a glifosato y una relación soja de primera - maíz de alrededor de 8/1 en 2007/2008 y por la elevada dependencia de unos pocos herbicidas, prácticamente como opción exclusiva para manejar malezas, con un indiscutible predominio del glifosato. En nuestro país durante la campaña 2009/2010 se utilizaron aproximadamente 257 millones de litros de glifosato (Papa, 2009) de los cuales aproximadamente el 52% se aplicó durante el período de barbecho y un 42% en el cultivo de soja. Es el más utilizado dentro del área que se estudiará en el presente proyecto, alcanzando valores mayores a 5 litros por hectárea y por año. Si bien el glifosato como tal no es volátil y tiene escasa movilidad, sus metabolitos probablemente más tóxicos y móviles podrían contaminar el suelo, las aguas subterráneas y superficiales y el riesgo se incrementa por la utilización intensiva que de él se realiza (Cerdeira, et al 2006). A este habría que agregarle otros principios activos, algunos de gran persistencia. Sin embargo la presión de selección ejercida sobre la flora de malezas del agroecosistema no está determinada sólo por la cantidad de glifosato utilizado sino también por la modalidad con que se lo emplea y por la escasa o nula rotación con otros principios activos como resultado de lo cual se están verificando casos de tolerancia y de resistencia.

La tolerancia a un herbicida se la puede definir como la capacidad natural y heredable de la totalidad de los individuos de una especie para sobrevivir y reproducirse luego de la aplicación del herbicida debido a características morfológicas y fisiológicas propias de la especie, por lo tanto las especies que son tolerantes nunca antes fueron susceptibles; mientras que la resistencia a un herbicida se la define como la capacidad heredable de una población o biotipo para sobrevivir y reproducirse después de la aplicación de una dosis de herbicida que era letal para la población original.

El modelo AgroEcoIndex, por ejemplo, mostró un coeficiente de correlación (lineal y positivo) de 0,65 y 0,85 entre el porcentaje de área cultivada y el riesgo relativo de contaminación por plaguicidas para los periodos 1956 – 60 y 2001 – 05 respectivamente. Si bien en este último periodo analizado se utilizaron fitosanitarios menos agresivos con el ambiente, el incremento observado en el riesgo de contaminación se explica a través de un aumento significativo del área cultivada con soja (Viglizzo, et al 2010). A los problemas urbanos se sumaron otros como la erosión y degradación de los suelos, la sedimentación de ríos y cuerpos de agua (Menéndez et al 2002), la destrucción del hábitat natural y la pérdida de vida silvestre (Salvador et al 2010).

Este estudio emplea el término "sostenibilidad" para remarcar el hecho de que, para lograr y asegurar la continuidad de un bienestar, son importantes no sólo establecimiento de las condiciones físicas, químicas y biológicas que permitan operar a los ecosistemas regionales dentro de su zona de resiliencia, sino también el esfuerzo comunitario y el compromiso de las instituciones que tienen injerencia en la región de interés. Al escenario indicado anteriormente se agrega una falta de

trabajos de investigación que caractericen la situación socio-productiva-ambiental de una manera integrada en la zona mencionada, vacío que este trabajo pretende comenzar a llenar. Para ello se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo General

Analizar la vulnerabilidad ambiental de la cuenca por pérdida de bienes y servicios ecosistémicos, empleando un marco de evaluaciones biofísicas y energéticas.

Objetivos Específicos

Identificar las áreas de mayor vulnerabilidad para el ordenamiento sostenible del territorio.

Estimar la vulnerabilidad intrínseca dada por los factores del medio y por la carga de contaminantes como nitrógeno y fósforo (nutrientes) y fitosanitarios, provenientes de cargas difusas y puntuales.

Evaluar la variabilidad temporal de las cargas de nutrientes y de fitosanitarios.

Analizar nutrientes, en general, nitrógeno, fósforo en estaciones de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas, así como en el suelo.

Cotejar los valores en aguas con la legislación vigente a nivel nacional e internacional.

Evaluar los límites de eutrofización.

Analizar la presencia de fitosanitarios y sus metabolitos en aguas superficiales y subterráneas, comenzando por los más empleados en los sistemas de producción.

Recoger las experiencias, las inquietudes, las prácticas de uso y la percepción que tienen los actores (productores, familia rural, jóvenes, asociaciones de mujeres de productores, etc.), así como instituciones tales como cooperativas agropecuarias y otras, sobre el impacto del uso de agroquímicos a corto, mediano y largo plazo.

Métodos

A los efectos de identificar las áreas de mayor vulnerabilidad para el ordenamiento sostenible del territorio, se subdividirá la región de interés en áreas homogéneas (AH) y unidades de paisaje (UP) y se evaluará la vulnerabilidad mediante el uso de indicadores como el AgroEcoIndex (Monti et al 2010).

A los efectos de analizar la sostenibilidad socio-ambiental se realizarán entrevistas a los actores involucrados en las áreas identificadas como de mayor vulnerabilidad y se empleará la metodología multimodal (Casiello et al., 2011) para realizar un análisis hermenéutico de los relatos obtenidos, identificando las relaciones entre los aspectos éticos, estéticos, jurídico-políticos, económicos, sociales y psicológicos -a las que se le agregarán las determinaciones de aspectos biológicos y físico-químicos conseguidos por métodos tradicionales- de modo de obtener un panorama de las relaciones entre los aspectos que atentan a la sostenibilidad de la región.

Para analizar nutrientes, fitosanitarios y sus metabolitos y eutrofización, se tomarán muestras en estaciones de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas, así como en el suelo.

Se modelará, mediante el paquete de software WASP6 (USEPA) o similar, el flujo de nutrientes y contaminantes en el Río Carcarañá y sus tributarios principales. Dentro de ellos se determinarán cuáles son los de mayor contribución de contaminación. De la misma manera se modelará el comportamiento del flujo subterráneo a través del Software Visual Modflow y MT3D o similar, para visualizar los efectos posibles de los contaminantes en el medio subterráneo

Visual Modflow (V.M.) es una de las más completas herramientas de modelación de flujo subterráneo en dos y tres dimensiones. Es esencialmente un modelo numérico de flujo y transporte que calcula las áreas de contribución a las captaciones mediante modelos computacionales que utilizan una combinación de ecuaciones complejas de la hidráulica subterránea. El modelo V.M. representa el medio físico mediante series de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que se obtienen de los procesos reales de hidráulica subterránea a través de (p.ej. Ecuación de Continuidad, Ley de Darcy, etc.). Si por otro lado agregamos las condiciones iniciales de nuestro Sistema (estado al t=0), la geometría del medio, es decir la topografía del área considerada y las propiedades físicas del mismo como ser: permeabilidad, transmisividad, almacenamiento y finalmente fijamos las condiciones de contorno, o sea, hasta donde consideramos que se extiende nuestro Sistema y donde dejan de tener influencia los procesos en el considerados, y le introducimos las variables de entrada al Sistema como ser la infiltración o recarga, obtenemos un complejo de ecuaciones diferenciales a resolver.

Lo más interesante es que una vez calibrado el modelo, es decir, asegurada su confiabilidad, mediante la contrastación de los datos obtenidos en el terreno, permite simular procesos y obtener información a tiempo futuro de lo que ocurrirá en el medio, prediciendo los hechos. Con el programa MODPATH (accesorio

del Visual Modflow) se pueden observar las trayectorias de los filetes acuíferos que inciden sobre un determinado punto, delimitando así áreas de captura del flujo subterráneo, lo que es una aproximación a los Perímetros de Protección de las captaciones de agua subterránea. En los E.E.U.U. es aplicado y actualizado por el Geological Survey (GS) además por la Enviromental Protection Agency (EPA), la principal agencia medioambiental a nivel mundial

Se realizará una búsqueda bibliográfica de la legislación vigente a nivel nacional e internacional para cotejar los valores que se emplean en cada caso. Se empleará la metodología multimodal (Casiello et al 2011), para sistematizar y analizar los relatos de experiencias, inquietudes, prácticas de uso y la percepción que tienen los actores (productores, familia rural, jóvenes, asociaciones de mujeres de productores, etc.), así como instituciones tales como cooperativas agropecuarias y otras, sobre el impacto del uso de agroquímicos a corto, mediano y largo plazo.

Se utilizará un Sistema de Información Geográfica (SIG) y el análisis de imágenes satelitales para la georeferenciación de los atributos naturales y no naturales. También a la aplicación de técnicas de análisis de datos georeferenciados (Navone et al 2003), que permitirán una caracterización más precisa de la Sostenibilidad – Productivo – Ambiental de la Cuenca del Río Carcarañá. Específicamente, en Santa Fe, para el uso de la tecnología SIG, se cuenta con la asistencia y asesoramiento de la Infraestructura de Datos Espaciales de Santa Fe (IDESF).

IDESF, cuenta con un servidor de datos geográficos con: límite provincial, de departamentos, de distritos y de localidades, rutas, ferrocarriles, manzanas y ejes de la planta urbana de ciudades, comúnmente conocidos como software SIG. Cada capa se acompaña con datos descriptivos que refieren al origen, tipo, formato y otras características técnicas.

Conclusiones

Si bien este trabajo está todavía en su etapa inicial, a través de la metodología multimodal hemos podido nuclear a un equipo interdisciplinario en torno a la caracterización socio-ambiental de un tramo de la cuenca del Río Carcarañá y hemos podido abordar esta problemática compleja.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA) y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), por establecer un convenio marco para poder desarrollar este proyecto de fuerte carácter interdisciplinario.

Referencias

Casiello, F, Villarruel, J. M. (2011). The Acceptance and Progress in Argentina of Multi-Modal Systems Thinking for Community Development, *Systemic Practice and Action Research*. Springer Verlag, Volume 24, Number 6. pp. 523-531.

Cerdeira, A.L. & Duke, S.O (2006) The current status and environmental impact of glyphosate-resistant crops: a review. *Journal of Environmental Quality*. Vol 35. pp. 1633 – 1658.

Menéndez, A. N., Jaime, P., Natale, O. (2002), Balance de nutrientes del Río de la Plata usando modelización matemática. *Actas del XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, La Habana.

Monti, M., Montico, S. (2010) Identificación de vulnerabilidad para el ordenamiento sustentable del uso del paisaje en la cuenca La Salada, Santa Fe, Argentina. *Actas del I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*, Azul, Buenos Aires. pp, 53-61.

Navone, S. M., Movia, C. P., Marienko, N., Maggi, A. E., Raed, M. A., López, M. V. (2003). Sensores Remotos aplicados al estudio de los Recursos Naturales, *Ed. Facultad de Agronomía*, UBA.

Papa, J. C. (2009) Problemas actuales de malezas en la región sojera núcleo. *Revista Agromercado.* Cuadernillo Temático Nº 29. pp, 2-8.

Salvador, V. (2010) Impacto sobre el Hábitat. *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambienta*" Viglizzo, E., Jobbágy (Editores) Ed. INTA, Buenos Aires. pp. 43-46.

Venencio, Ma. Del Valle (2007) La Recarga Natural al Acuífero Libre y su Vinculación con la Variabilidad Climática Regional. *Tesis Doctoral*, Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. pp, 28.

Viglizzo, P., Carreño, E-, Frank, F. (2010) La relación soja-ecología- ambiente. Entre el mito y la realidad. *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambienta*" Viglizzo, E., Jobbágy (Editores) Ed. INTA, Buenos Aires. pp. 53-61.

Perímetros de protección de pozos: marco legal para su implementación en Argentina

Viviana Rodriguez[1], Carlos G. Paoli [1,2] y Marta Paris[1]

[1] Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Ciudad Universitaria. 3000, Santa Fe, Argentina
[2] Ministerio Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Provincia de Santa Fe, Av. Alte. Brown 4751, Santa Fe, Argentina.
Mail de contacto: vivianarodriguez05@yahoo.com.ar

RESUMEN

Con el propósito de proteger las fuentes de suministro de agua, se pueden establecer una serie de zonas, generalmente concéntricas, en torno al/los pozo/s (perímetros de protección), sobre la base del conocimiento hidrogeológico. En estas zonas será necesario establecer niveles de control diferenciales para el uso del territorio en función de las condiciones y necesidades locales. En este trabajo se analizan los instrumentos jurídicos, en el marco del plexo normativo argentino, necesarios para llevar adelante una efectiva protección, en especial, la potestad de los gobiernos locales para establecer las estrategias útiles.
Palabras clave: perímetros de protección de pozos, legislación, Argentina.

ABSTRACT

In order to protect water sources, different areas, generally concentric around well could be define on the basis of hydrogeological knowledge. In these areas will be necessary to establish differential control levels for land use based on local needs and conditions. Legal instruments necessary to carry out this effective protection are analyzed here. Particularly, it is considered the local government power to establish useful strategies.
Keywords: well head protection areas, law, Argentina.

Introducción

Con el propósito de proteger las fuentes de suministro de agua, se pueden establecer una serie de zonas, generalmente concéntricas, en torno al/los pozo(s), sobre la base del conocimiento hidrogeológico, de las características de la explotación y la adopción de ciertos criterios (distancia horizontal, tiempo de flujo horizontal, porcentaje de área de recarga, capacidad de dilución y/o atenuación de la zona saturada, etc.).

En estas zonas será necesario establecer niveles de control diferenciales para el uso del territorio en función de las condiciones y necesidades locales.

De esta manera, bajo la consideración de que protección ambiental y desarrollo económico son conceptos mutuamente complementarios, la delimitación de los perímetros de protección de pozos (PPP) constituye una herramienta, que con sustento técnico y científico, colabora en la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

Los Principios Rectores de la Política Hídrica Argentina, aportan la visión para la implementación efectiva de estos PPP: “El logro de los objetivos de la planificación hídrica se alcanza mediante la adecuada combinación de acciones estructurales (construcción de infraestructura) y de medidas de gestión, tecnológicas y disposiciones legales y reglamentarias que complementen o sustituyan las obras físicas - medidas no estructurales.

Entre éstas últimas se propician: las normativas para limitar o controlar el uso del agua y del suelo; la tecnología para disminuir el riesgo hídrico; las medidas para evitar el derroche y mejorar la eficiencia de uso del agua; y los mecanismos de cogestión para aprovechar y mejorar la infraestructura hídrica (PRPH 21)”.

Considerando este contexto, en este trabajo se analizan los instrumentos jurídicos, en el marco del plexo normativo argentino y en particular el santafesino, necesarios para llevar adelante una efectiva protección, en especial, la potestad los gobiernos locales para establecer

las estrategias útiles para llevar adelante una efectiva protección.

Dónde establecer los PPP

Hay que tener en cuenta que los PPP deberían definirse para futuras obras de captación o para obras de captación existentes y que esto puede suceder en áreas urbanas o rurales. Pero el abanico de posibilidades se abre cuando se considera que los pozos pueden estar en predios que pertenecen a la empresa de agua, al municipio, a la provincia, y que algunos están ubicados en la banquina de caminos o en las veredas u otros espacios públicos (plazas, parques, etc.) o privados.

Se recomienda la aplicación de tres niveles de protección: un área cercana a la perforación u *área operacional del pozo,* un *área de protección microbiológica y* un *área de vigilancia.*

La primera, es una zona de protección interior, que fue definida a partir de un radio fijo arbitrario. Se trata de un área de pocas dimensiones (entre 5 y 10 m de radio o lado). Es la zona donde las restricciones y controles deberían ser máximas. Esta zona debería definirse y respetarse en todos los casos.

La extensión de la segunda y tercera zona pueden determinarse utilizando una amplia variedad de métodos, desde los más simples hasta la modelación matemática del acuífero. La decisión de qué método utilizar resultará del balance entre los datos, información y recursos disponibles y el nivel de incertidumbre admisible. Esto último resultará del impacto que resulte de la implementación efectiva de los PPP en el sistema social y por ende de los intereses en juego.

Utilizando uno de los métodos más sencillos, como el del radio fijo calculado, por ejemplo si se toma como centro al pozo, el área a proteger resultará en un círculo cuyo radio puede establecerse en función del llamado "tiempo de tránsito" (Rajkumar y Xu, 2011). Este tiempo de tránsito es el tiempo que necesita viajar un contaminante hipotético en el agua subterránea para llegar al pozo de explotación. Este contaminante hipotético se mueve a la velocidad del agua en la zona saturada del acuífero, no reacciona en el ambiente subterráneo y tiene la misma densidad y viscosidad. Se selecciona para ello el tiempo de 50 días (Foster et al., 2003), para definir una zona de protección microbiológica. Estos 50 días deben interpretarse como: el tiempo necesario para eliminar o disminuir la cantidad de contaminación hasta un nivel admisible, en este caso debido principalmente al decaimiento biológico. Es a la vez un patrón cronológico para ejecutar una tarea preventiva y/o correctiva ante peligro eventual de afectación del sistema de abastecimiento de agua (Paris et al., 1999).

La tercera zona, más exterior, puede ser definida a partir de la isócrona de 100 días de tiempo de tránsito. Se trata de una zona de vigilancia, donde fundamentalmente se realizan controles destinados a prevenir la llegada de eventuales contaminantes a la fuente de suministro (pozo). En este caso, los 100 días también son un patrón cronológico para encarar una tarea preventiva y/o correctiva ante un potencial peligro de afectación, pero a la vez como un tiempo donde puede producirse la atenuación de los contaminantes por dilución, dispersión u otros procesos físicos, químicos y/o biológicos que se desarrollen en el ambiente subterráneo.

Si bien los límites a proteger deben establecerse para cada situación particular, teniendo en cuenta las particularidades hidrogeológicas y las condiciones de explotación, por ejemplo, para el caso de acuíferos libres, en medios porosos de poco espesor y mediano rendimiento, el valor de estos radios de estos perímetros podrían oscilar en los valores que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tamaño de las áreas según diferentes niveles de protección

Área de protección (nivel)	Método	Tiempo (días)	Radio (m)
Área operacional del pozo	Radio fijo arbitrario	--	5-10
Área de protección microbiológica	Radio fijo calculado	50	45
Área de vigilancia	Radio fijo calculado	100	60

En el caso de acuíferos libres, pero más profundos o en caso de acuíferos semi confinados, las áreas de protección microbiológica y de vigilancia pueden ser menores. Aunque debe considerarse que el nivel de protección que ofrecen los estratos geológicos superiores al acuífero en explotación pueden verse afectado por excavaciones, enterramientos, extracción de materiales, inadecuada construcción de la obra de captación, etc.

Además en el caso de acuíferos confinados y en medios fisurados, debe tenerse en cuenta que, mientras el área operacional del pozo se mantiene en los 5 a 10 metros próximos a la obra de captación, el área de vigilancia e incluso el área de protección microbiológica puede estar distante (Foster et al., 2003).

Aspectos legales de la implementación de los PPP

Para considerar el marco legal aplicable a la imposición de un perímetro de protección pozos en jurisdicción de la República Argentina, en primer lugar, se debe señalar que la Constitución Nacional (CN) adopta como forma de Estado un sistema federal, donde las provincias conservan todo el poder no delegado en dicha Carta Magna al Gobierno Federal (Art. 121 CN) y en el cual le "corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio" (Art. 124 CN).

Es decir, la Nación tiene una competencia de excepción y las Provincias una competencia general, conformada por todas las atribuciones que no fueron expresamente reconocidas al Estado Nacional.

Dentro de las competencias provinciales se encuentra la de organizar sus estructuras organizativas internas (art. 5 CN) y, consecuentemente, delegarle a las jurisdicciones menores (Municipios, Comunas, Departamentos u otros, según la Provincia) las facultades necesarias para el cumplimiento de los cometidos estatales.

El Art. 123 de la CN incorporado por la reforma de 1994, viene a refrendar lo dicho en el párrafo antecedente, definiendo expresamente que deberá aplicarse el régimen de autonomía municipal, sin perjuicio de que el mismo estará sujeto a la reglamentación de su alcance y contenido en el orden institucional, político, administrativo, económico y financiero, por los órganos provinciales.

Se puede decir entonces que en el esquema constitucional argentino, las Provincias son el centro del poder, y estas delegan a favor de la Nación o los entes menores que las conforman.

Por otro lado, cabe señalar, que de acuerdo al Código Civil Argentino (CC), que rige para todas la Provincias existentes en el territorio por delegación constitucional de las Provincias al Congreso Nacional (artículo 75 inc. 12 CN), las aguas subterráneas pertenecen al dominio público (Art. 2340 inc. 3 CC).

Entonces, de la interpretación armónica de los artículos 124 de la CN y el 2340 inciso 3 del CC se deduce que las Provincias, y en el caso que éstas deleguen estos poderes en las autoridades locales, están facultadas para establecer la regulación necesaria para garantizar la explotación, extracción y distribución del agua subterránea por sí o por un tercero, con la calidad requerida para su destino, incluyendo obviamente, la implementación de expropiaciones, servidumbres y toda otra restricción al dominio

En este sentido sería posible y aconsejable contar con una ley de rango provincial que contenga un conjunto de reglas para establecer las áreas de protección de pozos con medidas a corto, mediano y largo plazo; con restricciones para la realización de actividades que posiblemente contaminasen el suelo, aire y agua; evaluación de impacto ambiental; monitoreo; auditorias y planes de contingencias.

Para aquellos casos en que no se cuenta con una ley provincial específica que abarque las medidas necesarias para establecer los PPP, será ineludible al momento de definir la ubicación de un pozo y/o de establecer un área de protección, conocer, además de las características hidrogeológicas, tener en cuenta quien detenta el dominio del suelo a utilizar y el uso que de él se hace, tendiente a evaluar los instrumentos legales jurisdiccional y económicamente practicables, para poder hacer efectiva la protección mencionada, y que esta se sostenga en el tiempo.

En este sentido, la situación óptima sería aquella en la cual los estudios hidrogeológicos coinciden en la ubicación del pozo y del PPP en un espacio perteneciente al dominio público o bien al dominio privado de la jurisdicción local. En estos casos bastaría con la simple reglamentación del uso del suelo, de las actividades que se desarrollan, o la relocalización de las mismas.

Ahora bien, ante la necesidad hidrogeológicamente determinada de que la zona de bombeo se situé en fundos de dominio privado, cabría la aplicación de institutos jurídicos a evaluar dentro el plexo normativo aplicable al área concreta.

Podría ser resorte la de administración local (municipal, comunal) si el pozo y su PPP se ubicara en un espacio que podría ser protegido bajo una ordenanza de ordenamiento territorial

que compatibilice el uso del espacio geográfico con actividades congruentes con las condiciones de vulnerabilidad del acuífero, estableciendo áreas con restricciones urbanas, agrícolo-ganaderas o industriales, como lo entiende el Art. 9 de la Ley Nacional 25.675 (Ley General del Ambiente).

"Las competencias administrativas son propias o específicas de la policía municipal en tanto puede imponer restricciones y limitaciones a los derechos individuales en los asuntos de interés local. Tal es el caso de las restricciones administrativas al derecho de propiedad, con sustento en el Art. 2611 del CC y con aplicación en materia de zonificación, fraccionamiento y reparto de carga urbanística" (Dromi, 2007).

De no ser posible la protección del pozo bajo un sistema de restricciones al dominio, cabe evaluar otros instrumentos jurídicos que resulten adecuados para cada caso y determinar el poder estatal que tendrá la facultad para imponerlo de acuerdo a leyes orgánicas de municipalidades con que cuente cada Provincia, las opciones serán la servidumbres administrativas o bien, en última instancia, de expropiación.

En el ámbito de la Provincia de Santa Fe, la constitución de servidumbres o expropiaciones deberán ser refrendadas por la autoridad provincial, sin obstar a que sean los Municipios y Comunas los que promuevan, fundamenten o declaren la utilidad pública de la medida a adoptar.

Se entiende por servidumbre administrativa al derecho constituido por el Estado sobre un bien del dominio privado en virtud del cual se puede usar del mismo, o ejercer ciertos derechos de disposición, o bien impedir que el propietario ejerza algunos de sus derechos de propiedad.

Esta institución, es confundida en diversas oportunidades con las restricciones al dominio, por lo que resulta conveniente observar sus distinciones.

Mientras la restricción importa la condición normal del ejercicio del dominio, las servidumbres implican "un ´sacrificio´ patrimonial, una ´desmembración´ del dominio" (Marienhoff, 1996), del predio sirviente en favor de quien/es resulta/n beneficiario/s de la misma, llevan consigo la obligación de indemnizar a quien las soporta, a diferencias de las restricciones al dominio.

Las servidumbres administrativas, por referirse a cualquier necesidad o utilidad pública, son de número ilimitado y "su existencia válida requiere, por principio, una ley formal que las especifique" (Marienhoff, 1996).

La determinación de la indemnización es una cuestión que debe ser tratada respecto de cada servidumbre administrativa en particular, en función de su naturaleza, y del alcance de las limitaciones que en cada caso generen. La metodología para determinar el monto indemnizatorio debe ser fijado normativamente, no obstando la posibilidad de que sea acordado por las partes mediante la adopción de parámetros debidamente justificados.

A falta de acuerdo, cualquiera de las partes puede promover una acción ante la justicia sólo a los fines de determinar el valor de la indemnización, sin que ello suspenda la aplicación de la medida rigiéndose por principios análogos a los de la expropiación.

Ahora bien, si las limitaciones que debe sufrir el privado a causa del establecimiento de un PPP superan los alcances del instituto de la servidumbre, es decir, que son tan extensas que implicarían un vaciamiento del derecho de dominio del propietario del fundo, no encontramos en las puertas de la expropiación.

Este sería el caso del área de protección inmediata del pozo, por cuanto dicho espacio será necesario para la construcción y para realizar las tareas de control y mantenimiento del pozo, es decir que aquí la actividad, prácticamente será permanente. Entonces, ya como se explicó, la limitación al dominio será de tal magnitud que deberá expropiarse el inmueble, lo que -por otra parte- asegura el pleno dominio y contralor por parte del Estado y, en su caso, del prestador.

La expropiación constituye un procedimiento extraordinario y de excepción. "Por tanto, aparte de que sólo ha de recurrirse a ella para satisfacer fines de "utilidad pública", stricto sensu, no debe empleársela cuando la respectiva necesidad o utilidad pública puede satisfacerse imponiendo una servidumbre, por ejemplo" (Marienhoff, 1996).

Se está haciendo mención a la apropiación de un bien por el Estado, por razones de utilidad pública, mediante el pago de una justa indemnización

Ese monto indemnizatorio debe contemplar no solo lo específicamente expropiado, (tierra y mejoras valuadas al momento actual, según condiciones de estado y vida útil), sino también los perjuicios económicos que sufre el resto de la propiedad por el hecho de quitársele una porción de la misma.

Ley de la Provincia de Santa Fe Nº 11.220

En la Provincia de Santa Fe, en lo pertinente, podrá ser de aplicación la Ley Nº 11.220 que entiende en lo relativo a la prestación, concesión, regulación y control del servicio de agua potable, desagües cloacales y saneamiento.

El citado cuerpo legal en sus artículos 60, 61 y 63 especifican que "estará prohibida la perforación de pozos a cualquier profundidad dentro de una distancia mínima de las fuentes subterráneas de provisión de agua de los prestadores, que el Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ENRESS) determine en cada caso sobre la base de estudios hidrogeológicos realizados al efecto" (art. 60 ley Nº 11.220). Puede decirse que esta previsión es una forma de perímetro de protección de pozo. Continua, "A requerimiento de los prestadores, las empresas de servicios públicos y demás personas que hagan uso u ocupen el suelo o subsuelo, removerán sus instalaciones cuando sea técnicamente imprescindible para la construcción o explotación de las obras para la prestación del servicio. Los gastos que esos trabajos demanden serán abonados por los prestadores…" (art. 61 ley Nº 11.220);

Por su parte el artículo 63 sostiene que "Se declaran de utilidad pública sujetos a expropiación, ocupación temporánea o a la constitución de servidumbres administrativas y restricciones al dominio … los inmuebles necesarios para la explotación del servicio y para la construcción, instalación y adecuación de obras y sistemas requeridos para su prestación."

Por otro lado el art. 70 de la misma norma, que establece los deberes y atribuciones de los prestadores del servicio prevé las facultades para:

c) Celebrar convenios para el cumplimiento de sus fines, con personas y entidades internacionales, nacionales, provinciales, municipales o comunales, públicas o privadas.

d) Actuar como sujetos expropiantes u ocupantes en los términos de los arts. 3 y 15 de la Ley 7534, y constituir restricciones al dominio y servidumbres de acuerdo a lo dispuesto en los arts. 2611, 3082 y concordantes del Código Civil. Para todo ello, deberán requerir al Ente Regulador de Servicios Sanitarios la previa determinación de los bienes respectivos y la correspondiente autorización para actuar, así como también la posterior aprobación de los actos realizados. …

g) Acordar con las empresas prestatarias de servicios públicos, instituciones o particulares, el uso común del suelo o subsuelo, cuando sea necesario para la construcción y explotación de las obras previstas y la ejecución de los planes de mejoras y desarrollo. En caso de que sea necesario remover o adecuar instalaciones existentes y no se logre acuerdo para ello, se requerirá la intervención del Ente Regulador de Servicios Sanitarios a efectos de que determine si la medida es técnicamente imprescindible para la prestación del servicio. Será aplicable lo dispuesto en el Art. 61 de la presente Ley."

Tanto la previsión del art. 63, como la del inciso d) del art. 70, ambos de la Ley Nº 11.220, habilitan –genéricamente- los instrumentos jurídicos necesarios para la implementación de los perímetros de protección de pozos.

Sin embargo, se observa una escasa utilización de dichos instrumentos.

La normativa citada establece un criterio genérico para la aplicación de los institutos regulados, a partir de lo cual se hace necesario adecuar aquella generalidad a las necesidades concretas cada caso, ya sea mediante la simple identificación del inmueble necesario para la ubicación del pozo a la de establecer los niveles de limitación necesarios para asegurar la funcionalidad del pozo.

En el caso de la servidumbre la deficiencia para su implementación es la falta de previsión legal relativa al cuantum indemnizatorio.

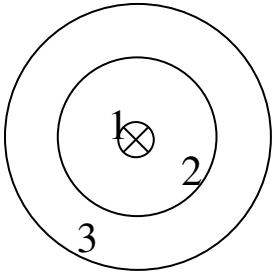
Este aspecto resulta particularmente dificultoso por cuanto deben establecerse reglas generales a los efectos de respetar los principios de igualdad ante la ley, y los criterios para definir aquellas reglas responden a criterios técnicos en relación al grado de afectación del inmueble necesarios para garantizar la seguridad de la fuente.

Por su parte, en materia de restricciones al dominio lo que se encontraría pendiente es la reglamentación de las mismas para el caso concreto. Esta facultad, en la provincia de Santa Fe recaerá sobre el Estado Provincial en caso del área concesionada y en las Comunas y Municipios para todos los demás casos.

La Figura 1 presenta una esquematización de las áreas, concéntricas con el pozo. Se señala que la forma resultante de la evaluación hidrogeológica puede no ser un círculo, como lo esquematiza la figura.

En virtud de los niveles de limitación al dominio necesarios para asegurar la protección del pozo el sector vinculado a al área operacional del pozo (1 de la Figura 1) requeriría de la expropiación, la zona de

protección microbiológica (2 en la Figura 1) podría ser cubierta por una servidumbre o una restricción y finalmente, la faja correspondiente al área de vigilancia (3 en la Figura 1) podrá resguardarse mediante restricciones.



1 - Área operacional del pozo
2 - Área de protección microbiológica
3 - Área de vigilancia

Figura 1. Esquema de implementación de perímetros de protección de pozos.

Conclusiones

Se puede concluir que, primariamente, la competencia para estructurar el plexo normativo para la implementación de perímetros de protección de pozos, le corresponde a los Estados Provinciales.

Dicha competencia a su vez puede, y resulta aconsejable, ser delegada en los entes menores que cada Provincia determine en su organización institucional.

Las medidas a adoptarse deberán establecerse en cada caso particular propiciando adoptar la alternativa que combine con mayor grado de eficacia las condiciones técnicas, jurídicas y económicas para seleccionar el lugar de ubicación de los pozos.

De la combinación de las áreas de protección descriptas en la Tabla 1 (para el caso de acuíferos libres, en medios porosos de poco espesor y mediano rendimiento) y, esquematizadas en Figura 1, con los instrumentos legales habilitados se sugiere establecer tres áreas con distintos niveles de protección y, por lo tanto, grados de afectación.

AREA 1 – Área operacional del pozo, con un tamaño de 5 a 10 metros de diámetro, donde la limitación será total. Por lo tanto, si el pozo se encuentra ubicado en inmueble perteneciente a un particular deberá recurrirse al instituto de la expropiación.

AREA 2 – Área de protección microbiológica, ubicada entre el límite del área 1 y los 45 metros de diámetro, donde la limitación puede ser de tal magnitud que sea necesario establecer una servidumbre administrativa, sin descartar de plano la posibilidad de las restricciones al dominio.

AREA 3 - Área de vigilancia, que irá entre los 46 y 60 metros de diámetro alrededor del pozo seguramente se podrá proteger con simples restricciones al dominio.

La provincia de Santa Fe cuenta con la ley Nº 11.220 que habilita muchos de los instrumentos necesarios para el establecimiento de PPP, sin embargo se observa pocas situaciones en las que se los utilice.

Referencias

Dromi, R. (2007). Ciudad y Municipio. Pag. 353. Ciudad Argentina-Hispania Libros. Buenos Aires-Madrid.

Foster S., R. Hirata, D. Gomes, M. D´Elia y M. Paris (2003). Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. GW-MATE. Banco Mundial. Mundi prensa, España. 117pp.

Marienhoff, M. (1996). Tratado de Derecho Administrativo, Tomo IV, Abeledo Perrot, Buenos Aires.

Paris M.; O. Tujchneider; M. D´Elia y M. Perez (1999). Hidrogeología Urbana: Protección de pozos de abastecimiento en la gestión de los recursos hídricos subterráneos. *Hidrología Subterránea. Serie Correlación Geológica* (13): 153-160.

Rajkumar Y. y Xu Y.(2011). Protection of borehole water quality in Sub-Saharan Africa using mínimum safe distances and zonal protection. *Water resources management* (25) 13: 3415-3425.

La calidad del agua subterránea como parte importante de su gobernanza

Emilio Custodio[1]

[1] Departamento de Ingeniería del Terreno / Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona, España.
Mail de contacto: emilio.custodio@upc.edu

RESUMEN

En las regiones áridas y semiáridas los acuíferos son una parte importante del conjunto de recursos hídricos. Su gestión ha de integrarse dentro del conjunto de los recursos de agua y tener en cuenta el uso del territorio, como elementos de su gobernanza. En esas áreas suele dominar la preocupación por la cantidad del agua, por su relativa escasez, pero los aspectos de calidad son tanto o más importantes y lo serán aún más en el futuro. Entre los aspectos principales de esa gobernanza de la calidad de las aguas subterráneas y los obstáculos y desafíos que se tienen para su implementación, unos son de carácter científico y técnico en relación con el conocimiento y la información, pero otros, en general los más importantes, son de tipo institucional, tanto del gobierno como de los usuarios, como de la sociedad en general. Tales son la dificultad para coordinar responsabilidades y acciones sectoriales y la falta de conciencia de que el agua subterránea es un patrimonio común, limitado y vulnerable, que está asociada a servicios ecológicos y que requiere valoraciones económicas y sociales a largo plazo y que pueden afectar a generaciones futuras.
Palabras clave: calidad del agua, agua subterránea, gobernanza, condicionantes

ABSTRACT

Groundwater quality is an important component of its governance. In arid and semiarid regions, the aquifers are an important part of total water resources. Their management has to be considered as part of the total water resources and take into account land use, as elements for their governance. In these areas, the concern about water quantity often dominates due to be relatively scarce. Among the main aspects of groundwater quality governance and the handicaps and challenges for its implementation, some have a scientific and technical character which refer to knowledge and information, but others, generally the most important, are of institutional nature and refer to government, users and society in general. They include the difficult coordination of sectorial responsibilities and activities, and the lack of conscience of groundwater being a common heritage, which is limited and variable, linked to ecological services and need long–term and inter–generational social and economic evaluation.
Keywords: water quality, groundwater, governance, conditions

Introducción

Con la tecnología de exploración, perforación captación desarrollada durante el siglo XX, el agua subterránea se ha convertido en un recurso hídrico muy significativo y con usos intensivos en muchas áreas, tanto en el ámbito rural como en el urbano (Bocanegra et al., 2005; Custodio, 2010a), y las tecnologías de recarga artificial y uso conjunto o alternativo extienden su utilidad y su importancia para disminuir el riesgo de los efectos de las sequías y como una pieza importante en la adaptación a los cambios climáticos y global. Esto es mucho más acusado en áreas áridas y semiáridas, donde los aspectos de cantidad en general han primado y priman sobre los de calidad y donde preocupa el incierto concepto de sobreexplotación (Custodio, 2002) y sus repercusiones sociales (Burke y Moench, 2000).

Sin embargo, cada vez más tienen más relevancia los aspectos de calidad, tanto en el medio urbano –preocupación por la salud de los ciudadanos y de la durabilidad de los dispositivos domésticos e industriales– como en el rural dada la creciente incorporación del riego tecnificado. Además, la puesta en explotación de recursos de agua subterránea en áreas nuevas o a mayores profundidades en ocasiones va acompañada de incrementos de salinidad o de la presencia de componentes molestos, como alta dureza, o nocivos, como flúor, arsénico o boro. Estos aspectos están en actualmente en la mente de los gestores internacionales, razón por la que la Global Environmental Facility (GEF) de Naciones

Unidas ha dedicado uno de sus capítulos temáticos sobre las aguas subterráneas a la calidad del agua subterránea y sus tendencias, en el que se basa esta comunicación (Custodio, 2013).

Todo esto tiene gran importancia social e influye en cómo usar racionalmente los recursos de agua subterránea, los costes asociados y los conflictos derivados, y condiciona la forma de resolverlos. Todo ello forma parte de la gobernanza de las aguas subterráneas, a la que la revista especializada Hydrogeology Journal ha dedicado un número especial (HJ, 2006). Como un concepto general nacido bajo diferentes influencias, no hay una definición universal de gobernanza ni tiene límites netos. Podría definirse como las reglas de los sistemas políticos (en sentido amplio) para resolver conflictos entre actores en recursos de agua y para adoptar decisiones –punto de vista legal–, para obtener un adecuado funcionamiento de las instituciones y la aceptación del público –punto de vista de la legitimidad– y para lograr consenso a través de modos democráticos y que obliguen a las partes –punto de vista participativo–. Se entiende por reglas los elementos orientados a la administración y a sus procedimientos.

La gobernanza del agua, que en parte coincide en sus aspectos más técnicos con la gestión integrada de los recursos hídricos, está muy relacionada con la gestión (manejo) del agua, que es hacer las diligencias conducentes al logro de un propósito –en este caso el uso de los recursos de agua– y supone llevar a cabo las actuaciones necesarias para cubrir determinados objetivos generales, dentro de cauces definidos, ordenados y reglamentados –planificación–, por organismos o entidades con capacidad y autoridad para hacerlo y para dar servicio a los ciudadanos.

Esa planificación hídrica consiste en crear un marco para ordenar y disponer los recursos de agua a medio plazo (por ejemplo 10 años) y largo plazo (por ejemplo 20 años).

Así gobernanza, gestión y planificación están relacionadas y entre ellas los límites son difusos, de modo que gobernanza puede llegar a considerarse casi sinónima de gestión. Se trata en cualquier caso de una responsabilidad gubernamental, sujeta a planificación y legislación, peo que debe –debería– realizarse contando e implicando a los usuarios directos e indirectos del agua y a la sociedad civil, tener en cuenta las tradiciones y costumbres locales y estar informada por principios éticos y morales (Llamas et al, "009; Custodio, 2010b), en la perspectiva de la generación actual y también de las venideras, e informada por las consideraciones económicos asociada, que permitan comparaciones basadas en valoraciones.

Aspectos técnicos de la gobernanza de la calidad del agua subterránea

Los aspectos técnicos de la gobernanza de la calidad del agua subterránea parten de la realidad de que el agua subterránea en estado natural no siempre tiene buena calidad (Edmunds y Shand, 2008), entendiendo por tal aquella que considera el uso a la que se destina. Por otro lado la explotación del agua subterránea puede afectar a su calidad. También las actividades humanas, incluso las que no tienen relación con la explotación y uso y de las aguas subterráneas, pueden influir notablemente en su calidad.

La calidad natural del agua subterránea ha sido objeto de numerosos estudios y su conocimiento es importante para definir las características cualitativas del recurso y en especial para conocer las alteraciones que puede sufrir. Para ello debe conocerse lo que en la Directiva Marco del Agua europea (OJEU, 2000; 2006) se llama línea de base (baseline) o fondo natural, que no es un valor sino un rango acompañado de sus parámetros estadísticos (Custodio y Manzano, 2007). Este tiene múltiples aspectos a considerar, y entre ellos están la salinidad, la dureza, la presencia de solutos en concentraciones altas respecto a valores de referencia y otras características que en determinados usos pueden tener relevancia en cuanto a corrosiones, incrustaciones y otros efectos que afectan a su correcto uso.

La explotación de los recursos de agua subterránea conlleva modificaciones hidrodinámicas de los sistemas de flujo y por lo tanto cambios en la recarga, en las relaciones con las aguas superficiales continentales y marinas, y desplazamiento de cuerpos de agua subterránea dentro de un mismo acuífero o entre acuíferos, que incluyen efectos tanto de advección como de dispersión, y en los que las heterogeneidades del medio natural pueden tener un efecto muy importante, no bien conocido y difícil de cuantificar. Algunos aspectos importantes que influyen sobre la calidad del agua subterránea son los de intrusión marina en acuíferos costeros, la infiltración de aguas fluviales o lacustres en áreas en los que antes se produciría descargas de aguas subterráneas, la mineralización de depósitos orgánicos en humedales que se han desecado y pasan a ser áreas de recarga, o la mayor recarga en áreas que se han deprimido

por subsidencia causada por la explotación de las aguas subterráneas.

Con frecuencia las actividades antrópicas causan la introducción de contaminantes muy diversos en el medio ambiente, tanto en el terreno, como en las aguas, como en la atmósfera, desde donde se pueden incorporar a las aguas subterráneas. Esto incluye no sólo las substancias directamente introducidas, sino también sus productos de degradación –metabolitos en el caso de que se degraden por vía biológica– unos inertes, otros aún nocivos y otros más insidiosos que los originales.

El incremento de NO_3 en el medio rural - y también en el urbano– es un motivo especial de preocupación (Foster y Candela, 2008), lo que ha dado lugar a disposiciones especiales en la Unión Europea (OJEU, 1991), que se recogen en la Directiva Marco del Agua europea (OJEU, 2000), tales como la obligatoriedad de buenas prácticas agrícolas y la delimitación y reglamentación de áreas vulnerables a la contaminación por nitratos (Custodio et al. 2013). También preocupa el incremento de plaguicidas muy diversos, de disolventes orgánicos y de sustancias asociadas a los hidrocarburos, y más recientemente los llamados contaminantes emergentes, derivados del uso generalizado de fármacos –incluso para el ganado–, de cosméticos y substancias de efecto psicótico.

Estos aspectos son comunes con las aguas superficiales, pero en las aguas subterráneas aparece asociado a la circunstancia muy importante del posible largo o muy largo retraso en la aparición, no sólo por dilución –cuando se aprecia pueden estar afectados enormes volúmenes de agua subterránea– sino por el lento fluir por el medio no saturado –no es observable– y luego desde el lugar de entrada en el acuífero hasta la captación en el medio saturado. Las condiciones en que se produce el transporte por el medio subterráneo y la posible degradabilidad o persistencia –resiliencia- en general se conocen mal y están muy afectadas por heterogeneidades que son muy difíciles de considerar cuantitativamente. No sólo influye la advección y dispersión, sino también la adsorción y la velocidad de las reacciones químicas, algunas de las cuales son biológicas y por lo tanto muy dependientes de condiciones ambientales muy variables.

Un aspecto técnico que con frecuencia se olvida es que un pozo es una obra que rompe la disposición natural de las formaciones del terreno. Por un lado se pueden poner en comunicación diferentes subacuíferos que antes estaban separados y por otro una perforación mal acabada –sin los adecuados sellos–, corroída o mal mantenida, puede proporcionar un paso fácil de aguas contaminadas superficiales hasta el acuífero por el espacio entre la perforación y el tubo. Las aguas subterráneas, salvo en situaciones excepcionales, están libres de contaminantes biológicos patógenos, pero no el agua que se toma de los pozos a causa de contaminación externa bebida a inadecuada construcción, mantenimiento y operación.

Impedimentos y restricciones a la gobernanza de la calidad y del agua subterránea

La gobernanza de la calidad del agua subterránea sufre diferentes impedimentos y restricciones, variables de un país a otro y de unas circunstancias hidrogeológicas a otras, y son de distinta naturaleza (Howe, 2006; Custodio 2013).

Los de carácter técnico hacen referencia al conocimiento general y de detalle de las aguas subterráneas, tanto del personal técnico, como de los responsables de la gobernanza, como del público en general que ha de apoyar y sostener la gobernanza. Su resolución requiere esfuerzos de divulgación y comunicación, además de tiempo para su internalización, lo que a veces puede suponer una notable acción escolar y esperar a la renovación de toda una generación humana. Esto va acompañado del soporte al conocimiento que procede de los datos sobre estado y la evolución, o sea de que además de estudios al nivel adecuado al problema, existan redes suficientes de observación y control (de monitoreo), a veces en tres dimensiones, con puntos de medida realmente representativos Condesso de Melo et al., 2007), y que sus datos sean asequibles y con un formato apropiado y estado de agregación a su comprensión y uso. Esto es especialmente difícil en cuanto a la calidad del agua, ya que depende de muchos parámetros, con variable precisión e importancia, que han de ser traducidos por especialistas a formas más inteligibles a los administradores, usuarios y público en general, pero sin que ello suponga manipulación torticera o sesgo.

Las acciones técnicas referentes a perímetros de protección y la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas pueden ser eficaces, pero aún con poca experiencia, escasa valoración socioeconómica y no exentas de rechazo social o de creación de situaciones ambiguas o desproporcionadas, en un entorno científico–técnico con incertidumbres inherentes (no

eliminables). Este es un aspecto al que se le suele dedicar poca atención pero que es básico para no cometer errores y no realizar actuaciones unas veces insuficientes y otras desmesuradas, Es una situación que la sociedad y la administración no acaban de entender y no saben como internalizar, en especial en contextos socio-políticos en que prima la tendencia a la regulación y a la creación de derechos, que son bastante característicos de las culturas latinas.

Las instituciones públicas en general tienen equipos humanos pequeños, no siempre bien entrenados y en general con obligaciones dispersas y sobrecargados de trabajo, lo que es más acusado para las aguas subterráneas dado su carácter territorial extenso y aún más para los aspectos de calidad por su complejidad intrínseca. Un resultado común es que las instituciones públicas ni llegan, ni pueden llegar, ni deberían llegar a todos los detalles necesarios. Su responsabilidad en cuanto a la gobernanza es el marco general, la normativa y la regulación, dejando el detalle a los propios usuarios, los que deben colaborar, responsabilizarse y equiparse técnicamente, bajo reglas claras, con los apoyos públicos y formando los consorcios apropiados a cada caso. Es una consecuencia del principio de subsidiariedad.

Las dificultades y restricciones de carácter institucional en general son las de mayor calado y más complejas. En parte se refieren a la frecuente falta de instituciones apropiadas, tanto públicas, como de los usuarios, como de la sociedad civil. Su creación requiere voluntad y tiempo, y han de experimentarse para que tengan la forma y medios adecuados a los fines de la gobernanza de la calidad del agua subterránea. Una dificultad añadida importante es el carácter sectorial de las acciones, en las que el enfoque temático hace perder la visión del conjunto y las implicaciones de las decisiones que toman sobre otros campos Esto en ocasiones va acompañado por un falso orgullo profesional y búsqueda de exclusivismo que suele llevar a olvido, menosprecio y desdén por lo que hacen otros. Esto es especialmente relevante para la calidad del agua subterránea ya que en su configuración y evolución coinciden sectores muy distintos, como los recursos de agua, la agricultura, la ganadería, el uso del territorio, la política urbana, la producción para el mercado de productos potencialmente contaminantes, e incluso el transporte. Entre los distintos estamentos existen a veces fuertes barreras, no sólo técnicas o competenciales sino también de exclusividad (corrupción) profesional y de supuestos poderes.

La aplicación de las reglas que permitan la gobernabilidad del agua subterránea comprende desde incentivos hasta sanciones, todo ello en un contexto económico y social adecuado. Eso supone no sólo capacidad y agilidad administrativa sino también del sistema financiero y de la justicia.

No es raro que se trate de resolver problemas asociados a la calidad de las aguas subterráneas, tanto para la corrección como para la prevención mediante subvenciones con cargo a los presupuestos generales. Estas subvenciones pueden ser apropiadas en un momento dado y por un tiempo siempre limitado, pero en general son perversas al acabar produciendo un efecto contrario al deseado y cuya corrección suele ser a veces muy difícil, en especial bajo una óptica social de corta visión.

Las desviaciones de las normas aceptadas, correctamente establecidas y realistas deben poder ser corregidas mediante sanciones. Estas sanciones, además de ser justas, oportunas y proporcionadas, han de ser rápidas y eficaces y transparentes, orientadas a corregir las desviaciones y no a otros objetivos, además de tener en cuenta que los efectos de las desviaciones pueden aparecer muy diferidos. Este último aspecto es novedoso y poco experimentado y quizás lo más difícil ya que la administración y la sociedad están poco preparadas para considerar efectos a largo plazo. Es una gran asignatura pendiente y de difícil abordaje en el contexto político común dadas las cortas duraciones de las legislaturas si no hay una línea directora con más larga perspectiva. Esta más larga perspectiva puede nacer de una sociedad civil bien afianzada y con eficaces instituciones, lo que actualmente es más bien una excepción que la regla, en especial tras una degradación durante el siglo XX en que la sociedad ha sido en parte suplantada por la acción política.

La pérdida de calidad de las aguas subterráneas tiene un costo asociado importante, que tiene diversas facetas, tales como la pérdida de recursos de agua, el coste de mayor tratamiento y el generalmente muy alto coste, si resulta viable, de la remediación, y también lo tiene el ser en exceso restrictivos en cuanto a las normas de calidad (WIR, 2004).

En realidad buena parte de los problemas actuales de las aguas subterráneas y de su calidad son herencia del pasado, con causantes a veces legalmente irresponsables o que ya no existen. Actuar de cara al futuro requiere una

sociedad muy madura, con el riesgo de que sus paradigmas puede que no san coherentes con un entorno que es física, ambiental, económica y socialmente cambiante y en evolución. Su consideración es aún más difícil en momentos de crisis económicas, como la actual a nivel general, lo que obliga a dejar cosas por abordar, que habrá que solucionar y corregir en el futuro. Este es un gran reto para la gobernanza de la calidad del agua subterránea.

Beneficios sociales y ambientales de la gobernanza de la calidad del agua subterránea

La buena gobernanza de la calidad del agua subterránea supone un buen acercamiento a la sustentabilidad del uso de los recursos naturales y del medio ambiente, pero tiene una importante perspectiva temporal, que está en buena parte regulada por actitudes éticas (morales para los creyentes en la trascendencia humana), pero que se pueden tratar de cuantificar en parte –hay una parte intangible que no es medible– mediante evaluaciones económicas que actualizan los valores futuros al momento actual mediante una tasa de descuento social, que no coincide con la tasa de interés bancario del momento. El valor de esa tasa de descuento es muy debatido y depende de la importancia que los gestores y fuerzas sociales quieran dar al futuro y de la capacidad del hombre de progresar científica, técnica y socialmente, pero también de una globalización en un contexto de recursos y reservas finitas y por lo tanto sujetas a leyes económicas.

Además, el conseguir los beneficios es una tarea común gubernamental y social, que implica a todos, con diferentes cometidos y visiones. Esto requiere una notable mejora institucional y que los usuarios del agua subterránea, conscientes de sus aspectos de calidad, se organicen para ser representados y aceptar corresponsabilidades y cooperaciones. Esto último está aún en un plano incipiente, aunque hay pasos adelante en algunos países con especial problemática en lo que respeta a las aguas subterráneas, como México a través de los COTAS (Comités Técnicos de Aguas Subterráneas) (Foster el al., 2004; Wester et al., 2011, Guerrero, 2000) y España a través de la CUAS (Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas) (Codina, 2004; López-Gunn y Rica, 2011; Rica el al., 2010) con tradición de unas pocas décadas, y con más tiempo en California y Arizona, aunque en un contexto administrativo–legal diferente. Hay aproximaciones interesantes en algunos estados de la India (Mukherji y Shah, 2005; Shah, 2009) y en China. A este respecto es de interés lo aportado a la reunión sobre Gobernanza de las Aguas Subterráneas en Latino–América y el Caribe, que tuvo lugar en 2011 en Montevideo, dentro del programa de Gobernanza de las Aguas Subterráneas a nivel mundial, que ha lanzado el GEF con la colaboración de FAO, UNESCO y la IAH.

Estos beneficios hay que enmarcarlos en un análisis prospectivo que compare las tendencias de evolución de la calidad del agua subterránea en diversos escenarios y los compare con la decisión de no actuar más allá de lo actualmente regulado. Este es un ejercicio pendiente para la calidad, aunque hay primeras aproximaciones en cuanto a la cantidad, ya que es más sencillo y está entre las prioridades inmediatas de las áreas semiáridas. El principo de Gisser–Sánchez de que sin regulación se llega al mismo final que con regulación parece ser inadecuado con recursos limitados en cantidad (Esteban y Albiac, 2011), y posiblemente aún más cuando se considera la calidad (Burness y Brill, 2001).

Referencias

Albiac, J., Calvo, E, Tapia, J y Esteban, E. 2010. Water quality and nonpoint pollution: Comparative global analysis. In: L. Martínez-Cortina, A. Garrido y E. López-Gunn, *Re-thinking Water and Food Security.* OA-BF, CRC Press:251-256

Bocanegra, E., Hernández, M. y Usunoff, E. (eds.) 2005. Groundwater and human development. International Association of Hydrogeologists. *Selected Papers on Hydrogeology 6*. Heise, Hannover, Germany: 1–278.

Burke, J.J. y Moench, M. 2000. Groundwater and society, resources, tensions and opportunities. *Themes in Groundwater Management for the 21th Century*. United Nations, New York: 1–170.

Burness, H. y Brill, T. 2001. The role for policy in common pool groundwater use. *Resources Energy Economics*, 23(1): 19–40.

Codina, J. 2004. Las aguas subterráneas: una visión social: el caso de la Comunidad del Delta del Llobregat. *Revista Real Academia Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Spain, 98(2): 323–329.

Condesso de Melo, M.T., Custodio, E., Edmunds, W.M. y Loosli, H. 2007. Monitoring and characterization of natural groundwater quality. In: W.M. Edmunds & P. Shand (eds.), *The Natural Baseline Quality of Groundwater*. Blackwell Publ., Oxford. Chap. 7: 155–177.

Custodio, E. 2002. Aquifer overexploitation, what does it mean ? *Hydrogeology Journal*, 10(2): 254–277.

Custodio, E. 2010a. Intensive groundwater development: A water cycle transformation, a social revolution, a management challenge. In: L. Martínez–Cortina, A. Garrido, E. López–Gunn (eds.), *Rethinking Water and Food Security. CRC Press*: 259–298.

Custodio, E. 2010b. Aspectos éticos de la dominada crisis del agua. In: M.R. Llamas (eds.), Implicaciones Éticas en Algunos Debates Científicos. *Instituto de España*, Madrid: 91–119.

Custodio, E. 2013. Trends in groundwater pollution: loss of groundwater quality and related services. *Groundwater Governance: A global Framework for Country Action*. GEF 10 3726: 1–76.

Custodio, E. y Manzano, M. 2007. Groundwater quality background levels. In: P. Quevauviller (ed.), *Groundwater Science and Policy: An International Overview*. The Royal Society of Chemistry, *RSC Publ.*: 193–216.

Custodio, E., Garrido, A., Coleto, C. y Salmoral, G. 2013. The challenges of agricultural pollution. In: L. de Stefano and M.R. Llamas (eds.), *Water, Agriculture and the Environment in Spain, can we square the circle?* OA-BF, CRC Press: 281-290.

Edmunds, W.M. y Shand, P. (eds.). 2008. *The natural groundwater quality*. Blackwell, Oxford: 1–469.

Esteban, E. y Albiac, J. 2011. Groundwater and ecosystems damages: Questioning the Gisser–Sánchez effect. *Ecological Economics*, 70: 2062–2069.

Foster, S.S.D., Garduño, H. y Kemper, K. 2004. Mexico – The 'COTAS': progress with stakeholder participation in groundwater management in Guanajuato. *Sustainable Groundwater Management: Lessons from Practice*. GW–MATE. *Series Case Profile Collection 10*. The World Bank, Washington D.C., USA. 16 pp.

Foster, S.S.D. y Candela, L. 2008. Diffuse groundwater quality impacts from agricultural land–use: management and policy implications of scientific realities. In: Ph. Quevauviller (ed.): *Groundwater Science and Policy*: RSC. Publ.: 454–470.

Guerrero, V. 2000. Towards a new water management practice: experiences and proposals from Guanajuato state for a participatory and decentralized water management structure in Mexico. *Inst. J. Water Resour. Dev.,* 16 (4): 571-588

HJ 2006. Social and economic aspects of groundwater governance (Llamas, M.R.; Mukherji, A.; Shah, T., eds.). Thematic Issue, *Hydrogeology Journal*, 14: 269–432.

Howe, C. 2002. Policy issues and institutional impediments in the management of groundwater: lessons from case studies. *Enviro. Dev. Econ.*, 7: 625–641.

Llamas, M.R., Martínez–Cortina, L. y Mukherji, A. 2009. *Water ethics*. Francis & Taylor, London: 187–203.

López-Gunn, E. y Rica, M. 2011. La participación activa de los usuarios: la auto-regulación como forma de gobernanza del agua subterránea. En: *Desafíos de la Gestión del Agua Subterránea para el Siglo XXI.* Congreso Ibérico sobre las Aguas Subterráneas, AIH-Grupo Español, Zaragoza.

Mukherji, A. y Shah, T. 2005. Groundwater socio–ecology and governance: a review of institutions and policies in selected countries. *Hydrogeology Journal*, 13(1): 328–345.

OJEU 1991. Directive 91/676/EEC of the Council of the European Communities of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. *Official Journal of the European Union.*

OJEU 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Union.*

OJEU 2006. Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration. *Official Journal of the European Union.*

Rica, M., López-Gunn, E. y Llamas, M.R. 2012. An analytical framework on the emergence and evolution of collective action: an empirical case of Spanish groundwater user collective associations. *ICID Irrigation and Drainage Journal.*

Shah, T. 2009. Taming the anarchy: groundwater governance in South Asia. *Resources of the Future*. Washington DC.

Wester, P., Sandoval, R. y Hoogester, J. 2011. Assessment of the development of aquifer management councils (COTAS) for sustainable groundwater management in Guanajuato, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(4): 889–899.

WIR 2004. The cost of groundwater quality deterioration and tighter standards. *United Kingdom Water Industry Research Ltd. News*, 33(1).