



EL AGUA
EN LA
LLANURA

MATERIAL DE DIVULGACIÓN



AUTORES

Vercelli, Natalia
Cazenave, Georgina
Holzman, Mauro E.
Pelizardi, Flavia
Ares, María Guadalupe
González Catelain, José
Dubny, Sabrina
Dietrich, Sebastián
Zabala, María Emilia



COMPILADORES

Rocha, Adriana Leticia
Falabella, María Irupé
Zabala, María Emilia



DISEÑO EDITORIAL

Bustos, Paula

ILUSTRACIONES

freepik.com




I H L L A




AGRADECIMIENTOS



- Al Consejo Asesor para el Desarrollo de la Educación Superior de Azul (CADES) por financiar el Taller Interdisciplinario “El agua en la llanura”, actividad de difusión orientada a estudiantes de Educación Superior, que inspiró el desarrollo de este material.
- Al CCT CONICET Tandil por su acompañamiento y por el financiamiento otorgado para el diseño gráfico del material.
- A los docentes de distintas instituciones que muy amablemente aceptaron llevar a cabo la revisión y evaluación del manuscrito.
- A los directores del Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff”, Dres. Luis Vives y Fabio Peluso, por su apoyo incondicional y permanente estímulo para la concreción de actividades de comunicación científica.
- A la Facultad de Ingeniería por el apoyo a las tareas de formación docente, investigación, desarrollo y transferencia que se realizan en el Departamento de Formación docente de la Institución y en el marco del Núcleo de Actividades Científico Tecnológicas GIDCE.




Estos materiales de divulgación científico tecnológica se desarrollaron en el marco del proyecto *Evaluación de la implementación de recursos y materiales didácticos para la enseñanza de ciencias y tecnología* (Convocatoria Proyectos de I+D+i de la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA (Res. CAFI N° 053/18) dirigido por la Mg. Ana Fuhr Stoessel.





La producción de estos materiales se vincula fuertemente con varios proyectos en desarrollo y/o recientemente finalizados, desarrollados en el Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff”- (IHLLA), que generaron la información de base que da sustento a la presente obra. Entre ellos: *Procesos de salinización de las aguas subterráneas y su relación espacial con los suelos y la vegetación en un sector de la Pampa Deprimida Bonaerense* (financiado por la ANPCyT, PICT-2016-3688), *Erosión hídrica a escala de microcuenca agrícola. Estudio desde el enfoque de la dinámica de la conectividad hidrológica y sedimentológica* (ANPCyT, PICT-2015-2012), *Procesos de flujo y transporte en suelo y zona no saturada con presencia de niveles petrocálcicos y su relación en la retención y liberación de arsénico al acuífero* (ANPCyT, PICT-2014-1805), *Desarrollo e implementación de sistemas automáticos de alerta de inundaciones y sequías en el área sur de la cuenca del río Salado, provincia de Buenos Aires* (ANPCyT, FONARSEC N° 19) y *Estudio de procesos hidroambientales en una cuenca piloto de la vertiente sur del río Salado, provincia de Buenos Aires* (CICPBA, Convocatoria de Proyectos de Fortalecimiento de Centros CIC).





Por otro lado, también colaboraron en la concreción de este material de divulgación el proyecto del IHLLA titulado *El material didáctico audiovisual como herramienta para el análisis áulico de los paisajes regionales* (financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación y la CICPBA) que contribuyó a la realización de videos de género documental y subgénero educativo, en los cuales se abordan aspectos característicos del paisaje de la cuenca del arroyo del Azul y el Consejo Asesor para el Desarrollo de la Educación Superior en Azul de la Municipalidad de Azul, provincia de Buenos Aires (CADES) que ha financiado salidas a campo con estudiantes, compra de equipamiento y materiales para ser utilizados en las mismas, que también.



El agua en llanura : material de divulgación / Natalia Vercelli [et al.]; compilado por Adriana Rocha; Irupe Falabella; María Emilia Zabala; ilustrado por Paula Bustos.- 1a ed.- Ciudad Autónoma de Buenos Aires: CONICET - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; Tandil: Universidad Nacional del centro de la Provincia de Buenos Aires; La Plata: Comision de Investigaciones Cientificas, 2019. Libro digital, PDF

Archivo Digital: online
ISBN 978-950-692-168-2

1. Ciclo Hidrológico. 2. Hidrología. 3. Agua. I. Vercelli, Natalia. II. Rocha, Adriana, comp. III. Falabella, Irupe, comp. IV. Zabala, María Emilia, comp. V. Bustos, Paula, illus. CDD 551.48



☰ Índice

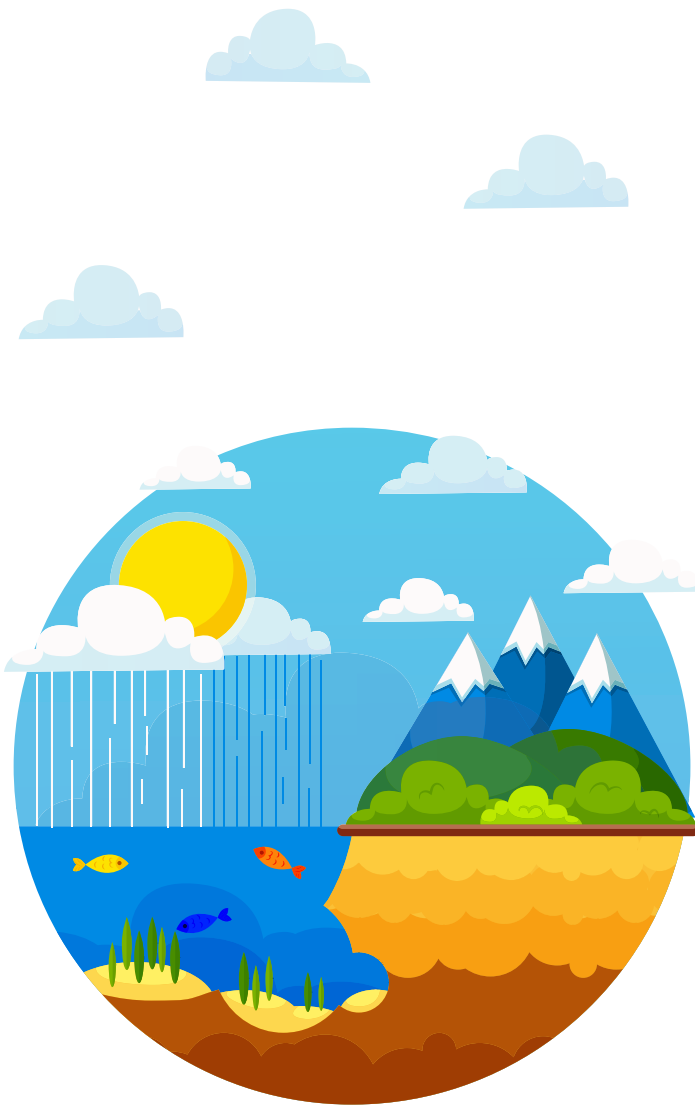
| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 1 | 7 |
| Los paisajes de llanura | |
| CAPÍTULO 2 | 23 |
| Suelos: ¿Qué miran quienes los clasifican? | |
| CAPÍTULO 3 | 35 |
| ¿Qué es la erosión hídrica? | |
| CAPÍTULO 4 | 43 |
| El agua en el subsuelo: zona no saturada y acuíferos | |
| CAPÍTULO 5 | 56 |
| ¿Qué entendemos por calidad de agua? | |
| CAPÍTULO 6 | 75 |
| ¿Para qué y cómo se estudia la composición química del agua subterránea? | |
| CAPÍTULO 7 | 87 |
| Sistema de gestión de información hidrológica y red de alerta de inundaciones, implementación y operación | |
| CAPÍTULO 8 | 99 |
| La teledetección aplicada a estudios hidrológicos y del sistema suelo-agua-planta | |
| BIBLIOGRAFÍA | 108 |

CAPÍTULO
1

Los paisajes de llanura

NATALIA VERCELLI

nvercelli@ihlla.org.ar

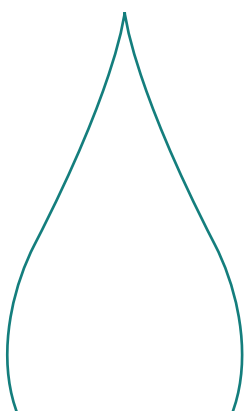


Un **ecosistema** es un área relativamente homogénea de **organismos interactuando entre sí y con su medio ambiente**, siendo la comunidad de seres vivos el componente principal. El concepto puede ser aplicado a **diversas escalas espaciales** mientras se mantenga la homogeneidad de la comunidad biológica, aunque en la práctica se aplica principalmente a los sistemas ecológicos en escala local donde los **flujos dominantes** son los de **integración vertical** (Christofoletti, 1998).



Históricamente, la ecología tradicional se ha ocupado del estudio de los procesos de la naturaleza en sentido vertical, es decir, analizando procesos ecológicos sin referencia a las relaciones espaciales del sistema que se estudia. Más aún, los ecólogos han hecho esfuerzos por ubicar sus sitios de muestreo en áreas homogéneas, para obviar el ruido producido por la variación espacial. Sin embargo, desde hace un par de décadas, se acepta en forma general que este ruido es parte integrante del ecosistema natural, y que los procesos varían espacial y temporalmente (Matteucci y Colma, 1998). Desde la inclusión de los factores espaciales y temporales, entonces, ha emergido la ecología de paisajes, una ciencia por definición transdisciplinaria que se ocupa del estudio de los efectos recíprocos de los patrones espaciales en los procesos ecológicos, promoviendo el desarrollo de modelos y teorías acerca de las relaciones espaciales, la colección de nuevos tipos de datos sobre patrones y dinámica espacial, y el análisis de escalas espaciales raramente abordadas en la ecología tradicional (Pickett & Cadenasso, 1995). Así es que, en contraste con esta última, considera a la heterogeneidad espacial como un factor causal medular en los sistemas ecológicos.

La ecología de paisajes está motivada por la necesidad de entender el desarrollo y la dinámica de los patrones en los fenómenos ecológicos, el rol de los disturbios en los ecosistemas, y las escalas espaciales y temporales características de los eventos ecológicos. Justamente los patrones, generados por procesos en escalas variadas, son el sello distintivo de un paisaje (Urban et al., 1987).



¿Qué son los paisajes?

Existen numerosas definiciones del paisaje desde diferentes enfoques culturales y científicos (*Farina, 2006*): es un área heterogénea de la Tierra compuesta por un conglomerado de ecosistemas interactuantes, que se repite en forma similar a través de la región (*Forman & Godron, 1986*); una configuración particular de topografía, cobertura vegetal, uso de la tierra y patrón espacial que delimita alguna coherencia de procesos y actividades naturales y culturales (*Green et al., 1996*); una unidad del nivel regional, ecológicamente más uniforme, un mosaico donde la mezcla de ecosistemas locales y usos de la tierra se repite en forma similar a escala de kilómetros (*Forman, 1995*); un mosaico heterogéneo de tipos geomorfológicos, tipos de vegetación y tipos de uso de la tierra (*Urban et al., 1987*); un área espacialmente heterogénea, a la escala de los organismos y/o procesos de interés (*Turner et al., 2001*). Algunos investigadores consideran el paisaje como un ecosistema grande complejo; otros como un conjunto de ecosistemas. En realidad la diferencia proviene de la escala a la cual trabajan. En la práctica, su delimitación es arbitraria y depende de los criterios usados para su identificación y de los objetivos para los cuales se delimita (*Matteucci, 1998 c*). A pesar de la gran cantidad de concepciones, todas coinciden en que es heterogéneo, pudiéndose distinguir componentes diversos.

Componentes de los paisajes

Los paisajes están compuestos por unidades menores, denominadas elementos del paisaje o **parches** (**Fig. N° 1**). Un parche predominante y continuo o un tipo de cobertura actúan como matriz en la que aparecen los demás parches (*Pickett & Cadenasso, 1995*). A su vez, el paisaje es un elemento de la región, siendo esta última un área geográfica grande que tiene



m. Son unidades discretas y limitadas que se diferencian por su estructura biótica y abiótica o por su composición.

un macroclima y una esfera de actividad e intereses humanos comunes, con una gran cohesión interna, un conjunto de paisajes que forman un patrón no recurrente, de grano grueso y alto contraste (Forman, 1995).



Figura N° 1 | Paisaje serrano característico de las Sierras Bonaerenses. Foto: Ilda Entraigas

El paisaje tiene tres características que lo definen: **estructura, función y cambio.**

La estructura se refiere a las relaciones espaciales entre los parches que lo conforman y estudia los tamaños, formas, cantidades, clases y configuraciones de los elementos y su arreglo espacial. La función comprende el conjunto de interacciones entre los elementos del paisaje, que se manifiesta en los flujos de energía, materia e información entre ellos. Los espacios no son estáticos, ni en estructura ni en función: el cambio es una propiedad importante que incluye el componente temporal en el análisis, reconociendo las modificaciones que sufren los paisajes en estructura y función con el tiempo (*Matteucci, 1998 a y c*). Estructura, función y cambio están estrechamente relacionados: de la estructura del paisaje depende la resistencia y también la facilidad con que se produce el flujo de materiales y organismos, así como la transmisión de las perturbaciones naturales o antropogénicas.

Los **paisajes**, entonces, son **sistemas complejos** que muestran patrones diferentes de acuerdo con la escala de observación o el nivel de percepción con el que se estudien, y en los cuales la **heterogeneidad** es la principal característica de los patrones que exhiben.

La heterogeneidad es una característica inherente al mosaico paisajístico, y puede ser definida como la distribución asimétrica no aleatoria de los objetos (*Forman, 1995*). El análisis de este patrón tiene importancia fundamental en el entendimiento de la gran mayoría de los procesos ecológicos y del funcionamiento de



m. La heterogeneidad espacial refiere a la variabilidad y complejidad de las propiedades del sistema ya sea en sentido horizontal y/o vertical. La heterogeneidad temporal se vincula a diferencias en las propiedades del sistema en un punto respecto del tiempo. La heterogeneidad funcional se relaciona con variaciones de las entidades ecológicas.

sistemas complejos como los paisajes. En el estudio de los paisajes pueden considerarse, tres **tipos de heterogeneidad** (Farina, 2006): heterogeneidad espacial (variabilidad y complejidad de las propiedades del sistema entre un punto y otro, ya sea en sentido horizontal y/o vertical); temporal (diferencias en las propiedades del sistema en un punto respecto del tiempo) y funcional (variaciones de las entidades ecológicas). Las propiedades del sistema pueden ser los nutrientes del suelo, el mosaico de parches, la biomasa aérea, la distribución de animales, etc. La heterogeneidad crea bordes, márgenes y contrastes entre parches diferentes, y este patrón, a su vez, genera nuevos procesos. Heterogeneidad significa que hay al menos dos tipos de parches que difieren en su aptitud, y al mismo tiempo los parches se pueden definir como discontinuidades en los estados de las características ambientales de interés.

Los paisajes a toda escala son mosaicos de teselas de tamaños, formas y contenidos diversos, que se organizan formando un patrón, el cual refleja la acción de procesos ecológicos subyacentes y tiene influencia en muchos procesos ecológicos. La definición más general de “patrón” dice que es el arreglo espacial o temporal de la variable que se estudia. El origen del patrón del paisaje en mosaicos es diverso: los parches pueden surgir a causa de disturbios naturales o antrópicos, por fragmentación o regeneración de un tipo de cobertura, por diferencias persistentes en los recursos ambientales, o por introducciones humanas (Pickett y Cadenasso, 1995).

Frecuentemente, para estudiar un paisaje de interés, suele elegirse una o más características de **fenosistema** (conjunto de componentes o características de fácil percepción que constituyen la manifestación visible del sistema) que nos sean útiles como indicadores del criptosistema (componentes o caracteres no visibles o de difícil percepción) y, por lo tanto, nos permitan predecir su existencia.



m. Conjunto de componentes o características de fácil percepción que constituyen la manifestación visible del sistema.

La vegetación es uno de los elementos del paisaje de más fácil percepción: tiene la propiedad de ser sésil y tridimensional, con gran parte de su cuerpo sobre la superficie de la tierra. Vegetación es un término muy amplio que se refiere a la manifestación de las plantas sobre la superficie terrestre, y suele utilizarse para referirse al conjunto de plantas que forman parte de un ecosistema en un sitio dado. La misma es el resultado de factores ambientales actuando sobre el pool genético disponible, por lo que refleja características del suelo, el clima, factores bióticos y antropogénicos, además del paso del tiempo (Matteucci & Colma, 1998). La comunidad vegetal es una abstracción, al igual que las poblaciones; simplemente consiste en todas las plantas que ocupan un área que los ecólogos circunscriben para su estudio (Crawley, 1996).

Así como los ecosistemas forman un mosaico en el paisaje, la vegetación también se organiza en un patrón de teselas (fragmentos, manchones, parches) diferentes, exhibiendo una amplia variedad de estructuras tridimensionales y mostrando heterogeneidad espacial en muchas escalas. La vegetación se estructura jerárquicamente en sentido vertical y horizontal: cada nivel se manifiesta de manera diferente y refleja variables distintas o niveles distintos de las mismas variables, lo que implica que el análisis que se haga de la vegetación depende del nivel jerárquico que se considere (Matteucci y Colma, 1998; Crawley, 1996).

La distribución y composición florística de las diferentes formaciones vegetales está determinada en gran parte por el clima: en áreas extensas, la heterogeneidad se manifiesta en forma de gradientes definidos por la abundancia de diferentes grupos funcionales de plantas, la productividad primaria o la diversidad florística (Chaneton, 2005). En una determinada región es posible distinguir paisajes caracterizados por distintos niveles de heterogeneidad fisiográfica, los cuales presentan diferencias más o menos notables en la heterogeneidad espacial de la vegetación (Jobbagy et al., 1996; Perelman et al., 2001). Tanto

la composición como la riqueza de la flora regional dependen de procesos históricos y biogeográficos relacionados con la dinámica de migración de especies, las tasas de extinción, el uso de la tierra y las invasiones biológicas.

Los paisajes de la región

Una característica del territorio bonaerense es que más del 90% de su superficie corresponde a ambientes llanos, lo cual le imprime condiciones hidrológicas particulares. Específicamente en la Pampa Deprimida, las pendientes topográficas regionales son muy poco perceptibles (entre 10^{-3} y 10^{-4}), apenas sobrepasando alturas de 120 m.s.n.m. en la llanura propiamente dicha (*Sala et al., 1983*). Lo anterior, perjudica el escurrimiento y hace que, a pesar del clima húmedo, la hidrografía presente aspectos de drenaje de tipo semiárido. Predominan los movimientos verticales de agua (evapotranspiración - infiltración) sobre los horizontales (escurrimientos), existiendo estrecha interrelación entre las aguas superficiales y subterráneas. Gran parte de la superficie de los partidos de Azul, Olavarría y Tandil, entre otros, se encuentra incluida dentro de la Pampa Deprimida (**Fig. N° 2**), la cual ocupa el centro este de la provincia de Buenos Aires, limitando al NNO con la Pampa Arenosa, al NNE con la Pampa Ondulada, al S con las Sierras Bonaerenses y al E con la costa Atlántica (*Matteucci, 2012*). El paisaje de la región se caracteriza por su relieve extremadamente llano, con alturas relativas que no pasan los 5-10 m y pendientes que varían entre 0,1 y 0,01 %. El relleno sedimentario de la depresión está conformado por depósitos de loess y limos loessoides de más de 8,5 km de espesor de edad cretácica y cenozoica. Las geoformas eólicas dominantes consisten en mantos irregulares y de baja topografía, compuestos por depósitos típicos de loess de alrededor de 1-1,5 m de espesor, que constituyen el material parental de los suelos actuales (*Zárate y Tripaldi, 2012*).

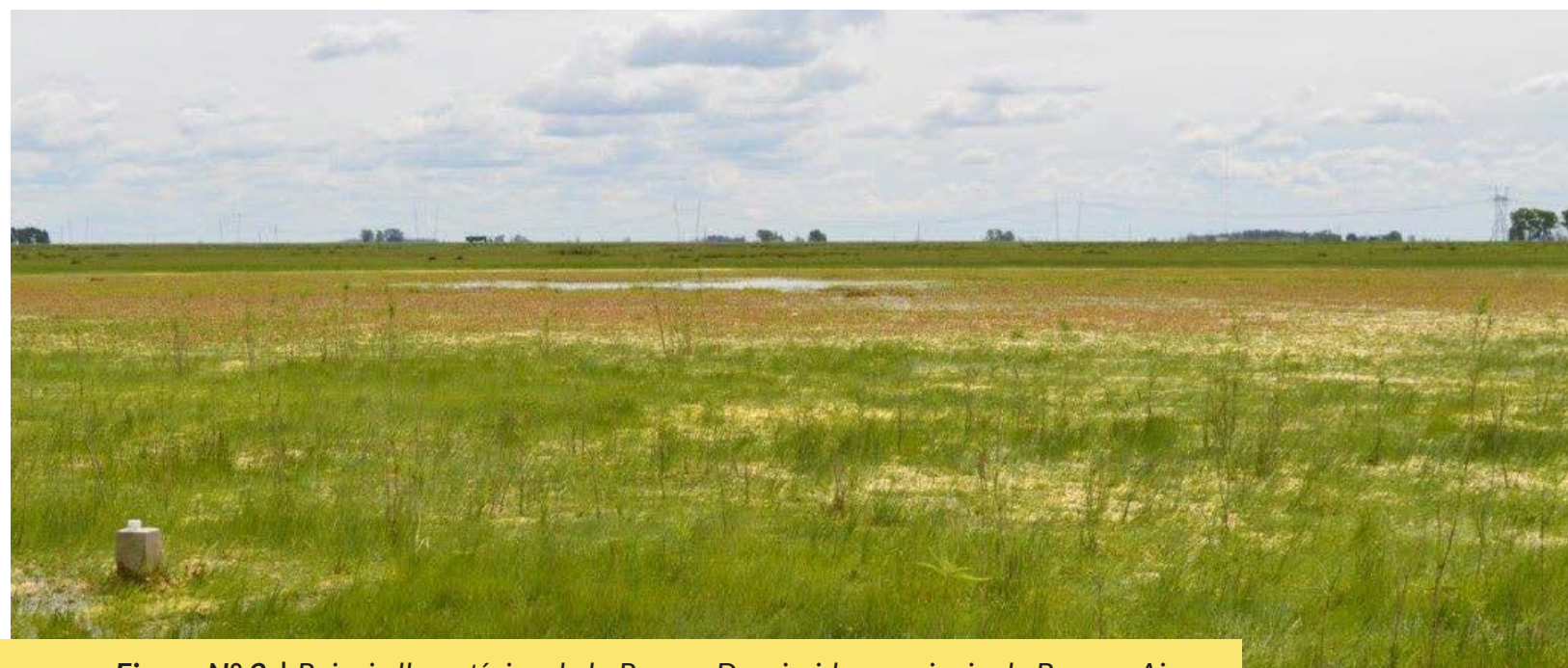


Figura N° 2 | Paisaje llano típico de la Pampa Deprimida, provincia de Buenos Aires.

Además, en la región abundan las depresiones de deflación, actualmente ocupadas por espejos de agua permanentes o temporarios someros. Las mismas son comunes y abundantes en toda el área, lo que contrasta con la reducida red fluvial existente. En el flanco norte del sistema de Tandilia (vertiente sur de la cuenca tectónica del Salado), donde predominan los cursos abortivos, se observan numerosas cubetas endorreicas y arreicas de escasa profundidad sin estratificación térmica (Dangavs, 2005). Otra geoforma eólica secundaria pero importante son las dunas lineales y parabólicas, las cuales presentan alturas relativas entre 1-1,5 m, 20-30 km de largo y alrededor de 0,3-0,5 km de ancho con orientación general NNE (Zárate y Mehl, 2010). Son las geoformas eólicas más conspicuas, por su grado de expresión morfológica y por las condiciones ambientales que localmente generan en el piedemonte norte de Tandilia, teniendo un papel destacado en el control de las redes de drenaje en los sectores distales.

Justamente en este sector de la Pampa Deprimida, los suelos están generalmente interrumpidos por una capa de costra calcárea entre 50 y 100 cm de profundidad, existiendo vastos sectores en que la misma se halla más cerca de la superficie o aflora. Predominan allí Argiudoles, Hapludoles, Natracuoles y Natrudoles, frecuentemente con horizonte petrocálcico (*Hurtado et al., 2005*).

La gran mayoría de los arroyos de la Pampa Deprimida nacen en las zonas más altas e inclinadas de la depresión (principalmente sobre el límite con el sistema de Tandilia), recorren una cierta distancia y luego se secan. Como ocurre en las regiones semiáridas, la integración de la red hidrográfica apenas se realiza durante las crecidas importantes. La gran mayoría de los cursos son de característica efluente y autóctonos de la Llanura. Los arroyos que nacen en las llanuras serranas (Tandil) aparentan tener un área generadora con drenaje fluvial adecuado, pero al ingresar a las zonas bajas carecen de afluentes, apareciendo una amplia área interfluvial entre los mismos con lagunas aisladas, donde dominan los procesos verticales y se desdibujan los cauces (**Fig. N°3**).

Esto ocurre, por ejemplo, con los arroyos del Azul, Chapaleofú, de los Huesos, Tapalqué, Brandsen, Pantanoso y Vallimanca. Según Usunoff et al. (2000) las subdivisiones clásicas en cuencas de llanuras como la presentes en la región (alta, media y baja) no resultan apropiadas para analizar la complejidad del sistema. Esto se verifica en la cuenca del arroyo del Azul donde, aunque se continúan utilizando los términos clásicos, los análisis se han enriquecido a partir de la aplicación de datos geomorfológicos y ecológicos.

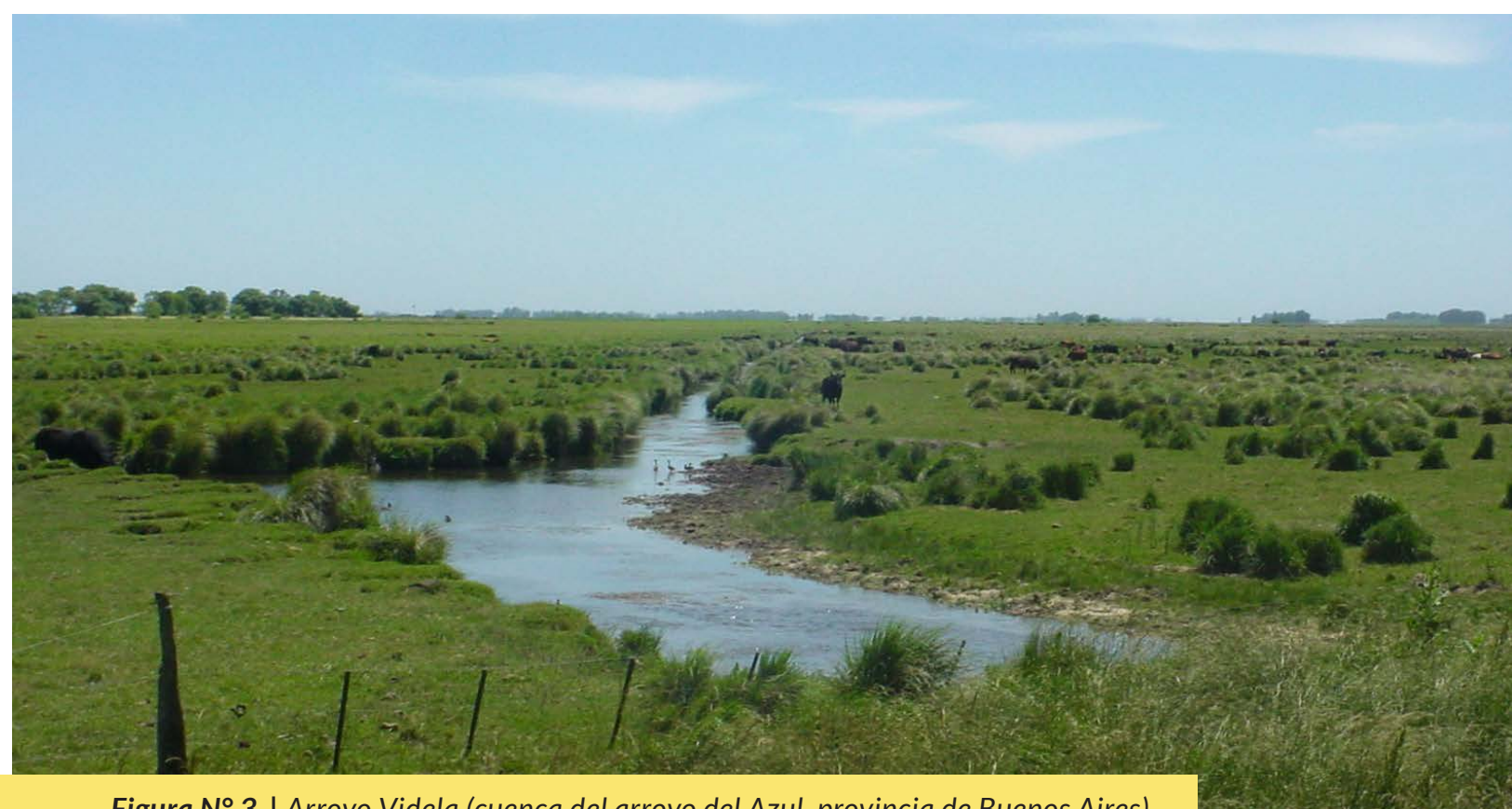


Figura N° 3 | Arroyo Videla (cuena del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires).

El paisaje de la región se caracteriza por su relieve **extremadamente llano**, con alturas relativas que no pasan los 5-10 metros y pendientes que varían entre 0,1 y 0,01%.

Las condiciones climáticas, topográficas, edáficas e hidrológicas determinan que toda la región Pampeana se encuentre ocupada por pastizales de distinto tipo, los cuales se diferencian en sus estructuras verticales y horizontales y en el ensamble de especies que habita en cada uno (Matteucci, 2012). En la Pampa Deprimida, específicamente, la comunidad climax es el flechillar de *Piptochaetium montevidense*, *Nassella neesiana* y *Bothriochloa laguroides*, acompañados de otros pastos y numerosas especies herbáceas no gramínoideas y algunos arbustos de poca altura (Cabrera, 1971). El flechillar alberga, además, numerosas especies exóticas que frecuentemente compiten en abundancia con los elementos nativos. En toda la depresión, es frecuente la presencia de pajonales dominados por *Paspalum quadrifarium* (paja colorada), una gramínea formadora de matas altas y densas, acompañada por especies propias del flechillar. Tanto pajonales como flechillares (**Fig. N° 4 A y B**) varían en su composición de especies de acuerdo con las características del suelo, la pendiente y el régimen de drenaje local.

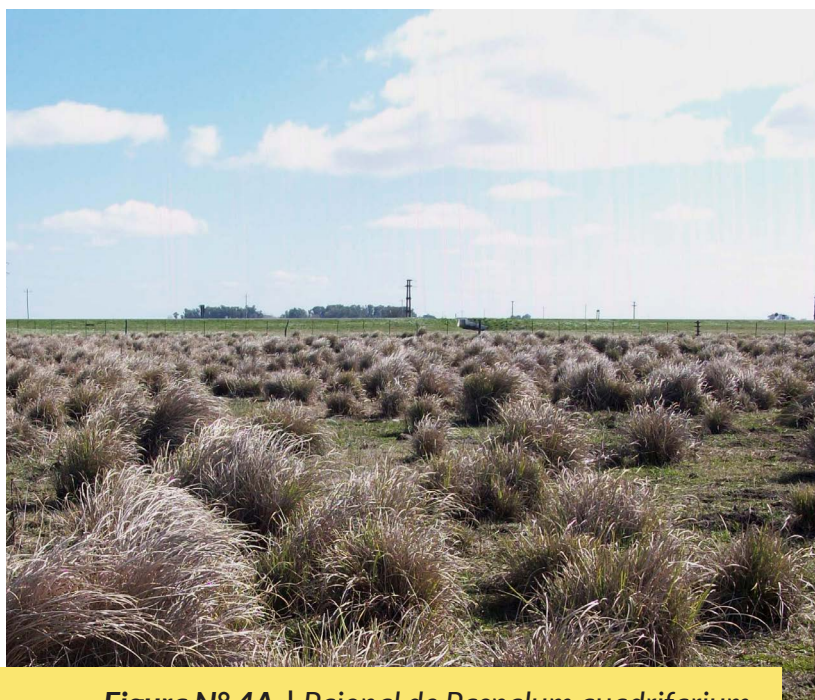


Figura N° 4A | Pajonal de *Paspalum quadrifarium*

Figura N° 4B | Flechillar de *Nassella* spp.



Además de la presencia de flechillares, en la Pampa Deprimida son muy numerosas las comunidades edáficas: en depresiones, lagunas y orillas de los cursos de agua son frecuentes los juncales de *Schoenoplectus californicus*, los totorales de *Typha sp.* así como también los espadañales o pajonales de espadaña (*Zizaniopsis bonariensis*) y duraznillales de *Solanum glaucophyllum*, apareciendo frecuentemente acompañados de especies flotantes como las lentejas de agua (géneros *Lemna*, *Spirodela*, *Wolffia*, etc.) y el helechito de agua (*Azolla filiculoides*), entre otras (**Fig. N° 5**). En suelos con alcalinidad y/o salinidad en superficie hay praderas de pastos salados (*Distichlis sp.*), hunquillares de *Juncus acutus* y espartillales de *Sporobolus densiflorus* principalmente en cangrejales al este de la región. En las dunas costeras estabilizadas, aparecen comunidades psamófilas con predominio de *Sporobolus coarctatus*, *Panicum racemosum* o *Adesmia incana* (Cabrerá, 1971; Vervoort 1967).



Figura N° 5 | Juncales y duraznillales en cuerpos de agua de la cuenca baja del arroyo del Azul, Bs. As.

La heterogeneidad florística del pastizal de la Pampa Deprimida ha sido sintetizada por Perelman et al. (2001), en 5 grandes unidades de vegetación denominadas Praderas de Mesófitas, Praderas Húmedas de Mesófitas, Praderas de Hidrófitas o Vegas de Ciperáceas, Estepas de Halófitas y Estepas Húmedas de Halófitas; cada una de estas reúne dos o tres variantes o tipos de comunidad. Los mismos autores encontraron que, a pesar la existencia de gradientes climáticos latitudinales que se desarrollan a lo largo de distancias de cientos de kilómetros a través de la región, una gran proporción de la variación en la composición de especies queda incluida en áreas pequeñas de entre 0,1 y 10 km², siendo responsables de esta diversidad las variaciones topográficas mínimas y la existencia de parches con alta salinidad edáfica.

En escala de paisaje la heterogeneidad florística de los pastizales de la Pampa Deprimida, está asociada con la heterogeneidad geomorfológica y edafológica. El arreglo espacial de la vegetación queda constituido por un mosaico de comunidades herbáceas (Burkart et al., 1990), donde la composición de especies responde a variaciones locales en la topografía y la salinidad del suelo, además de haber sido modificada por siglos de pastoreo por parte del ganado doméstico que no solo modificó la composición de especies nativas, sino que también favoreció la introducción de numerosas especies exóticas (León et al., 1984; Sala et al., 1986). El pastizal está típicamente constituido por un mosaico de stands de superficie variable entre algunas decenas de metros cuadrados y varias decenas de hectáreas, los cuales tienen límites claramente reconocibles y, dentro de ellos, la composición florística es relativamente homogénea (Batista et al., 2005). Las características del ambiente relacionadas con la humedad y con la salinidad de los suelos serían los principales controles de la heterogeneidad del pastizal, variando a lo largo de esos gradientes la estructura, composición florística, diversidad y productividad del pastizal (Perelman et al., 1982; Batista et al., 1988; Batista y León, 1992; Perelman et al., 2001).

Si ingresa al código QR podrá acceder a un video explicativo sobre diferentes aspectos desarrollados en el capítulo. El mismo se enmarca en una salida de de campo llevada a cabo por investigadores del IHLLA en el paraje Shaw del partido de Azul. Para ingresar deberá contar en su teléfono móvil con una aplicación: lector de código Qr.



CAPÍTULO

2

Suelos, ¿qué miran quienes los clasifican?

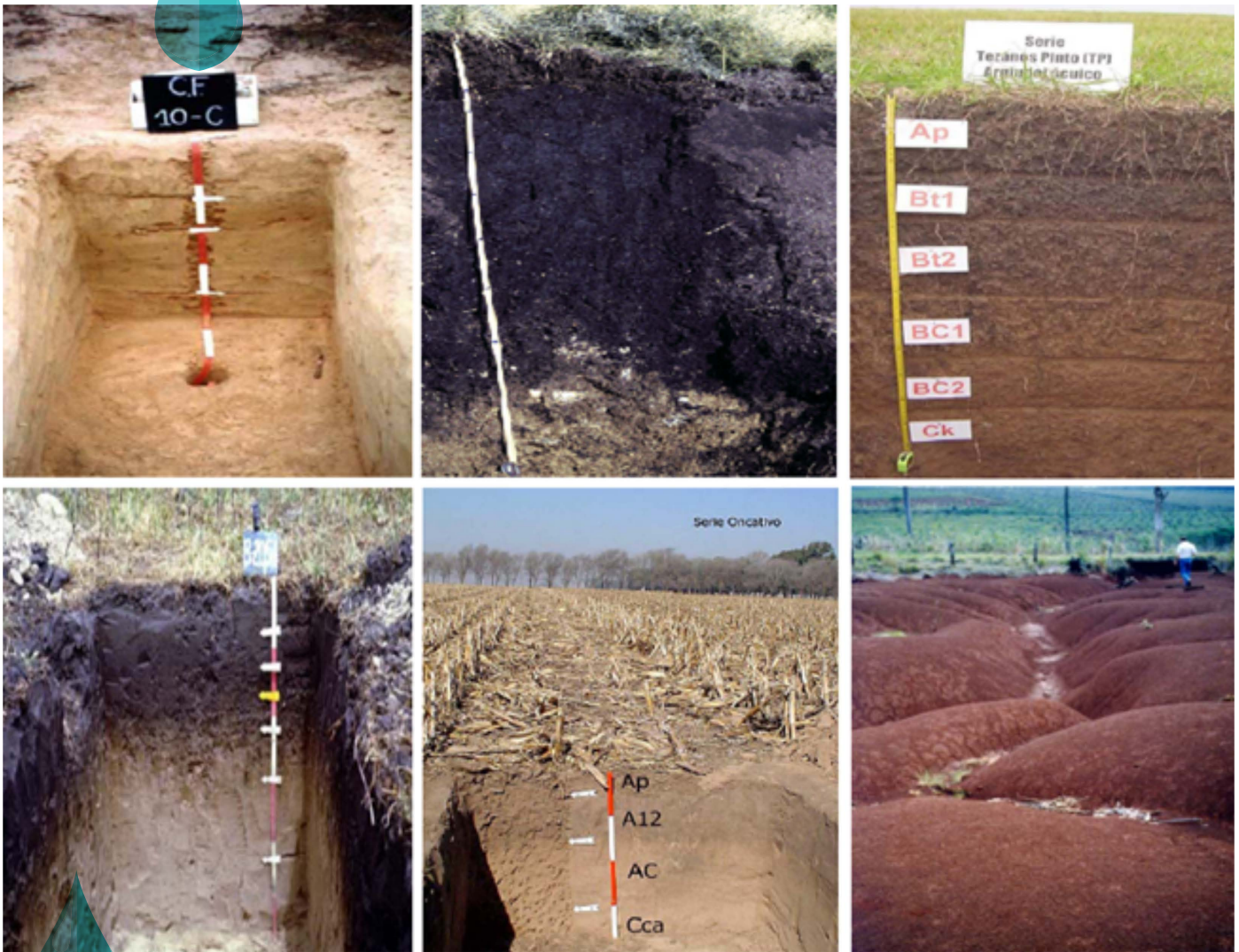
FLAVIA PELIZARDI

pelizardi@gmail.com

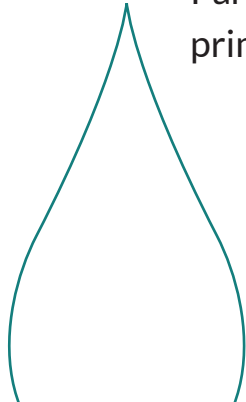


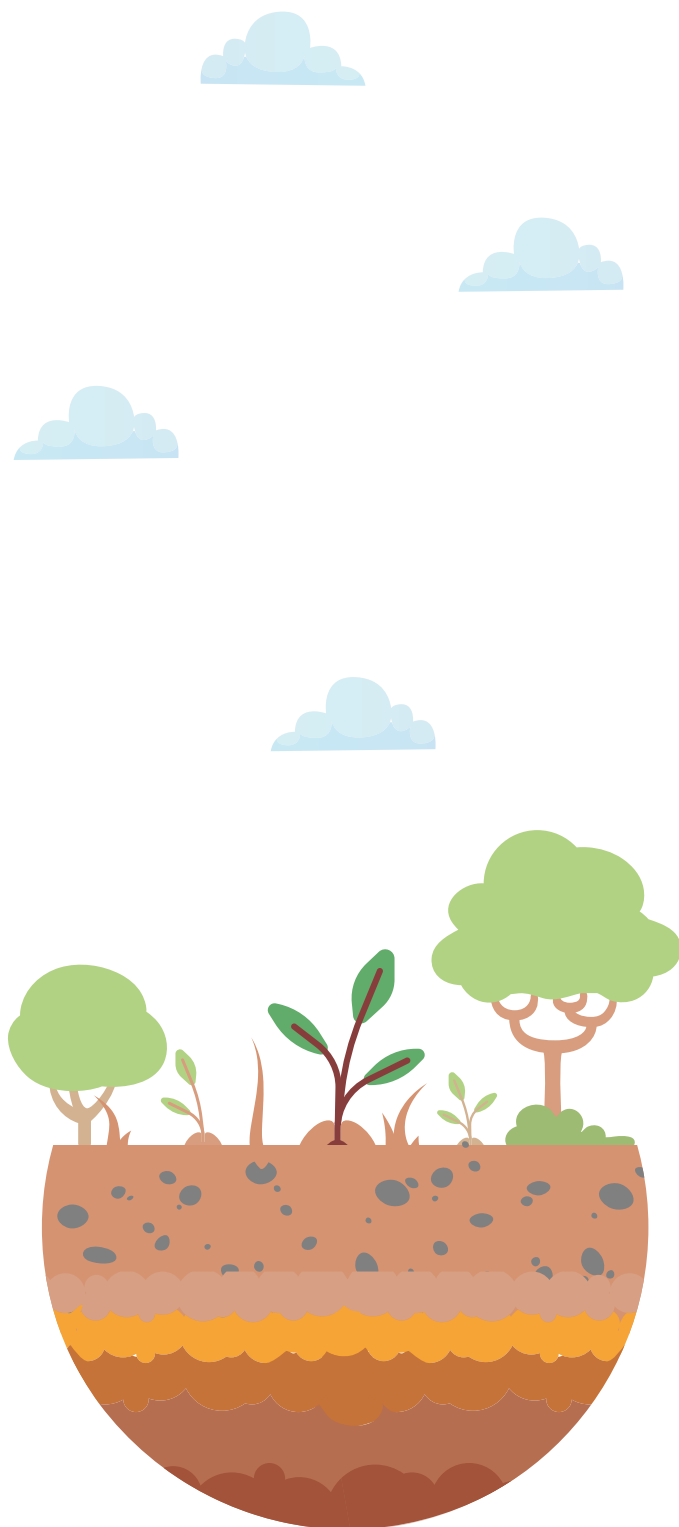
¿Suelos? ¿Perfiles? ¿Por qué presentan diferentes colores y texturas? ¿Qué influye en un suelo para que sea permeable? ¿Todos los suelos tienen los mismos componentes? ¿En todos los suelos el agua infiltra de la misma manera?

Observando las siguientes imágenes de diferentes tipos de suelo sería posible decir ¿cuál/es de ellas corresponde/n a nuestra llanura?



Para dar respuesta a las preguntas anteriores es necesario acordar primero, qué entendemos por **suelo**.





El **suelo** es un **recurso natural no renovable** que ocupa parte de la superficie terrestre y sostiene el crecimiento de los vegetales. Está compuesto por **sólidos** (componentes minerales y orgánicos), **líquidos y gases** incorporados a él.

Componentes minerales del suelo

Los componentes minerales del suelo están presentes en partículas de distintos tamaños. Las más grandes son rocas gravas y arenas gruesas. Las más pequeñas son arenas, limos y arcillas. Las partículas de más de 2 mm son los elementos gruesos de un suelo. En la **Tabla 1** se presentan datos que permiten identificar las partículas más finas que son las que definen la textura del suelo.



Tabla N° 1 | Clasificación de las partículas de suelo de acuerdo a su tamaño.

¿Cómo puede medirse la textura del suelo?

En cualquier método de medición de textura del suelo se hace un tamizado previo con malla de 2 mm. Como vimos, las partículas de más de 2 mm son los elementos gruesos de un suelo y no se consideran en la textura.

En el método de campo se parte de una muestra tamizada y se la humedece con unas gotas de agua hasta formar una pasta. A continuación, en una superficie lisa se intenta hacer un cilindro muy fino de unos 3 mm de diámetro:

- Si no se puede conformar dicho cilindro y la muestra se deshace, se está ante un suelo arenoso.
- Si se consigue hacer el cilindro y luego un anillo y al tacto es suave y fino, se está ante un suelo arcilloso.
- Si se logra el cilindro y el anillo, pero este último tiene una textura no muy suave, entonces el suelo será franco.
- Si consigue el cilindro pero al hacer el anillo, este se rompe, se está ante un suelo franco-arcilloso.

En el método de laboratorio se separan los componentes por granulometría en laboratorio y se calculan los porcentajes de arena, limo y arcilla. El triángulo textural del departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA) es el referente que se utiliza para decidir de qué tipo de suelo se trata.

Materia orgánica del suelo

La materia orgánica está formada por sustancias que contienen carbono, provenientes de compuestos orgánicos producidos por el metabolismo actual y pasado en el suelo y de la degradación de restos de organismos que vivieron en él (**Figura 3**).

¿Qué funciones cumple la materia orgánica en el suelo?

- Une a las partículas minerales en estructuras granulares y las hace resistentes a la fuerza de la lluvia.
- Aporta porosidad.
- Permite que el suelo incremente su capacidad de ingreso y retención del agua.
- Es fuente de nutrientes para las plantas. El Nitrógeno (N), el Fósforo (P), el Azufre (S), otorgan fertilidad al suelo.
- Es fuente de carbono y de energía para los organismos del suelo.

Insectos, lombrices

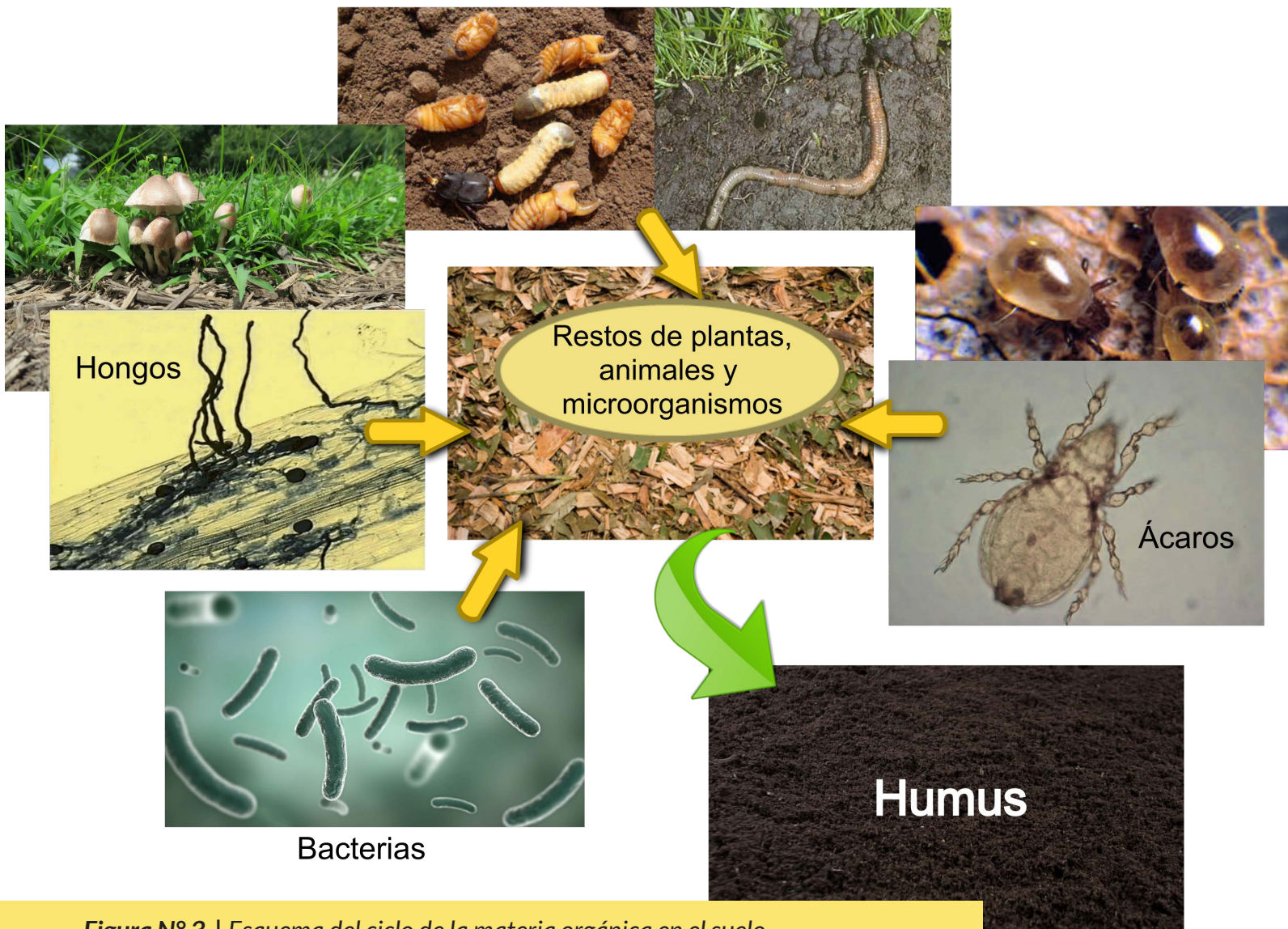


Figura N° 3 | Esquema del ciclo de la materia orgánica en el suelo.

Además de estudiar los componentes de un suelo y de analizar la textura que este presenta, se puede examinar su estructura.

La estructura se define en términos de grado, clases y tipo de agregados (USDA, 1951):

- El grado es la intensidad de agregación y expresa la diferencia entre la cohesión dentro de los agregados y la adhesividad entre agregados. En referencia a ella, el suelo se define como sin estructura, o con estructura débil, moderada o fuerte.

- La clase describe el tamaño de los agregados.

- El tipo hace referencia a la forma y ordenación de los agregados.

En función de las tres características, la estructura resultante puede ser clasificada según diferentes métodos. Uno de los más utilizados es una tabla diseñada por el USDA y adoptada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para la descripción de la estructura del suelo. En ella se describen el grado y tipo de estructura. El tipo de estructura describe la forma o configuración de los agregados individuales. En la **Figura 4** se muestran algunos tipos de estructura de suelos.

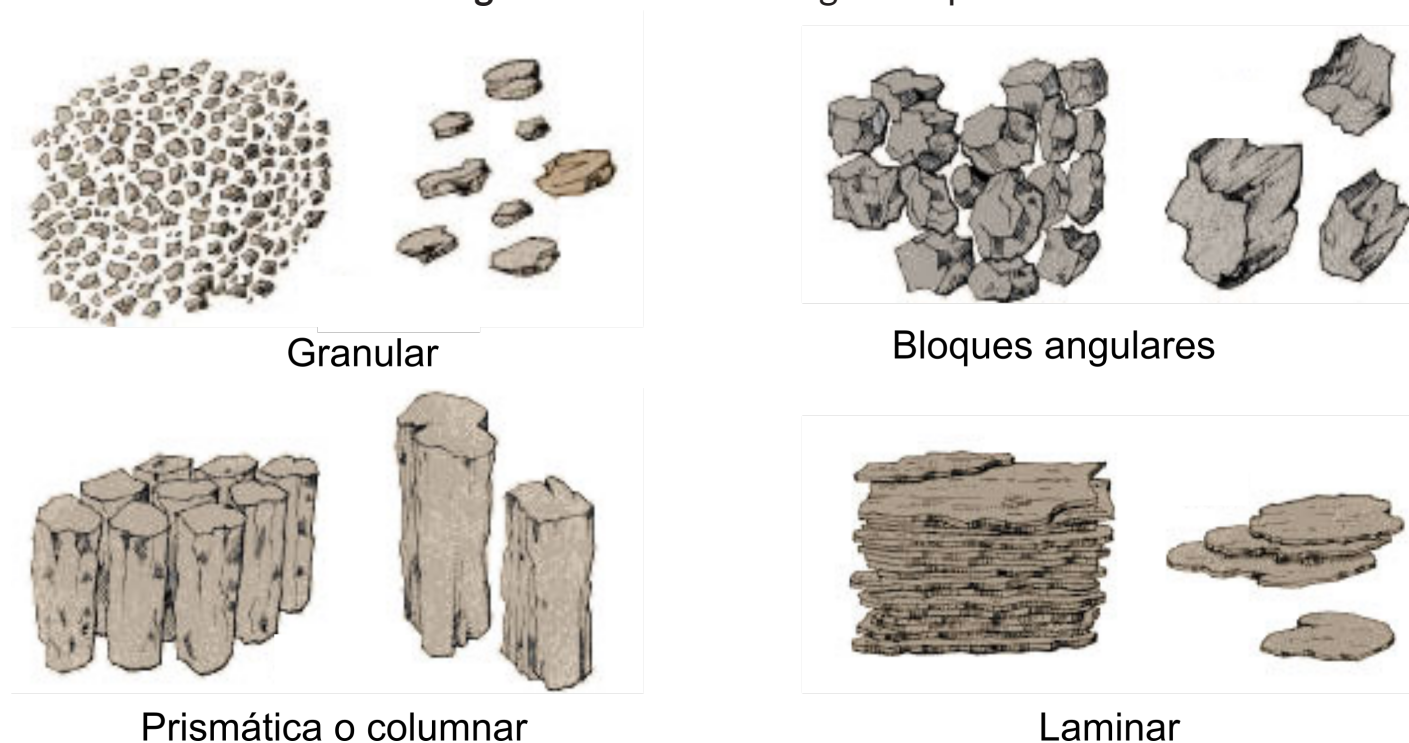


Figura N° 4 | Esquema de tipos de estructuras de suelos.

Clasificación de suelos

Volviendo a la pregunta del título de este artículo ¿Qué miran quienes lo clasifican?, es interesante destacar que textura, estructura y materia orgánica son tres de los criterios principales para la clasificación de los suelos. Otros criterios como profundidad, color, pendiente, procesos erosivos, completan los aspectos que se toman en cuenta a la hora de una categorización de tierras basada en características distintivas y en criterios de uso.

Nuestro país, Argentina, por su extensión norte- sur y su relieve desde el nivel del mar hasta los casi 7.000 m.s.n.m, tiene una gran diversidad de suelos. Existe una clasificación realizada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), siguiendo el sistema de clasificación de suelos de USDA (Soil Taxonomy). De ella surgen productos como cartas de suelos, mapas de usos de suelo, mapas y libros de clasificación de suelos por región, provincia, etc. Estos productos se encuentran a diferente escala y generalmente organizados por provincias. Debido a las dimensiones N-S del país y su diversidad climática, los doce órdenes están representados en Argentina (**Figura 5**).

Textura, estructura y materia orgánica son los criterios principales para clasificar suelos.

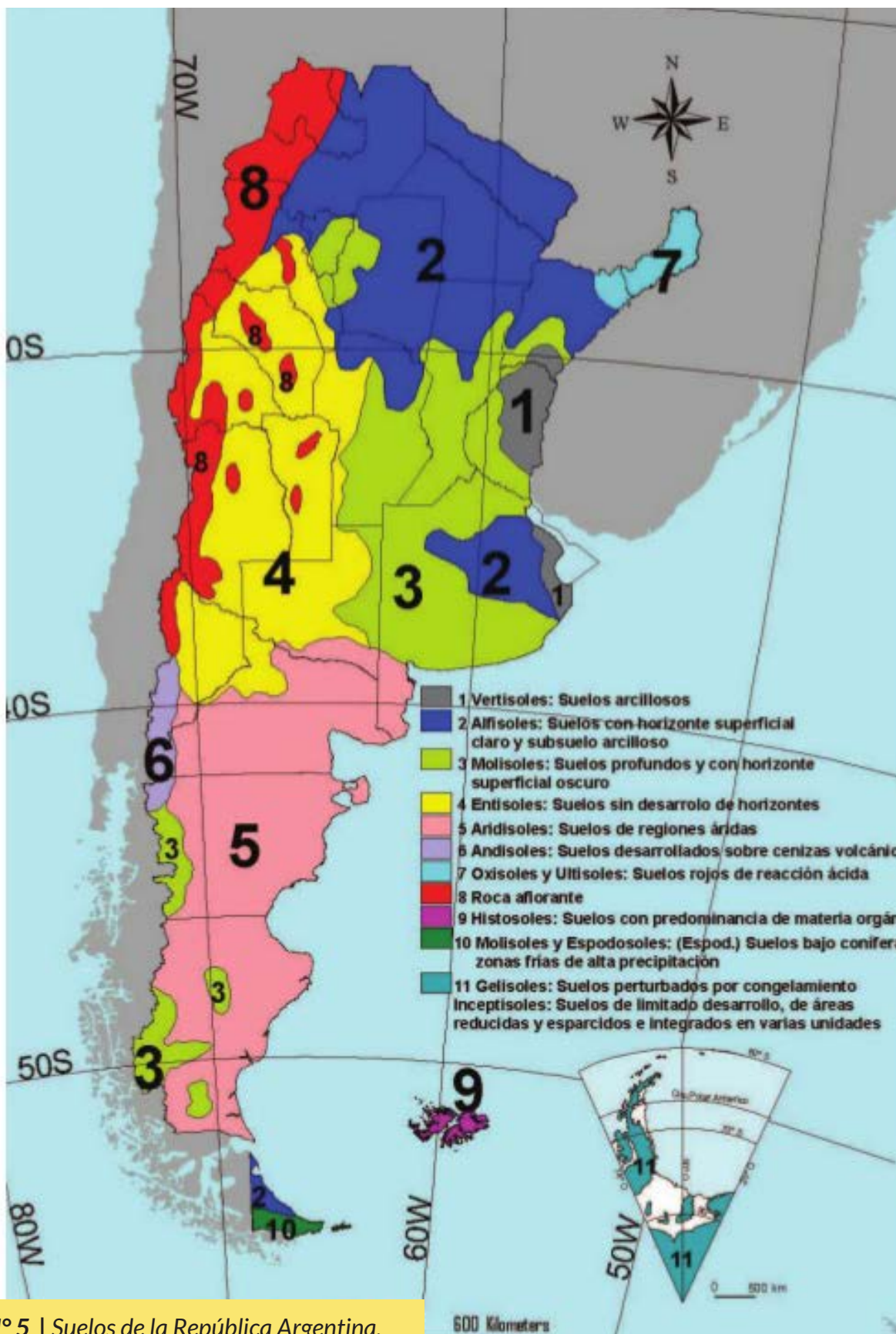


Figura N° 5 | Suelos de la República Argentina.

Los suelos reconocidos en la llanura pampeana corresponden a cinco órdenes del sistema de clasificación Soil Taxonomy. Ellos son:

- **Molisoles:** también denominados “suelos negros”. Estos son suelos sueltos y oscuros, ya que poseen una alta proporción de materia orgánica y con buen drenaje. Son los de mayor fertilidad y de mayor valor económico del país. Se encuentran en las grandes superficies de la llanura Chaco-pampeana. En la **Figura 6** se muestra una descripción de un suelo correspondiente a este orden realizado por el INTA.



Figura N° 6 | Descripción de un argiudol típico.

- **Alfisoles:** también llamados “suelos grises”. Son suelos arcillosos de baja permeabilidad, generalmente húmedos, y su contenido de materia orgánica es de bajo a mediano. Se encuentran en la pampa deprimida, en regiones que presentan escurrimiento superficial dificultoso y que están sometidas a inundaciones periódicas. Estos fenómenos producen una acumulación de sales de sodio en superficie. En la **Figura 7** se muestra una descripción de un suelo correspondiente a este orden, realizada por el INTA.
- **Entisoles:** también denominados “suelos castaños”. Son suelos muy escasamente desarrollados, con materiales que fueron acumulados por el agua, el viento o la fuerza de gravedad. Se caracterizan por la textura del material originario, que en la mayoría de los casos es areno-franca.

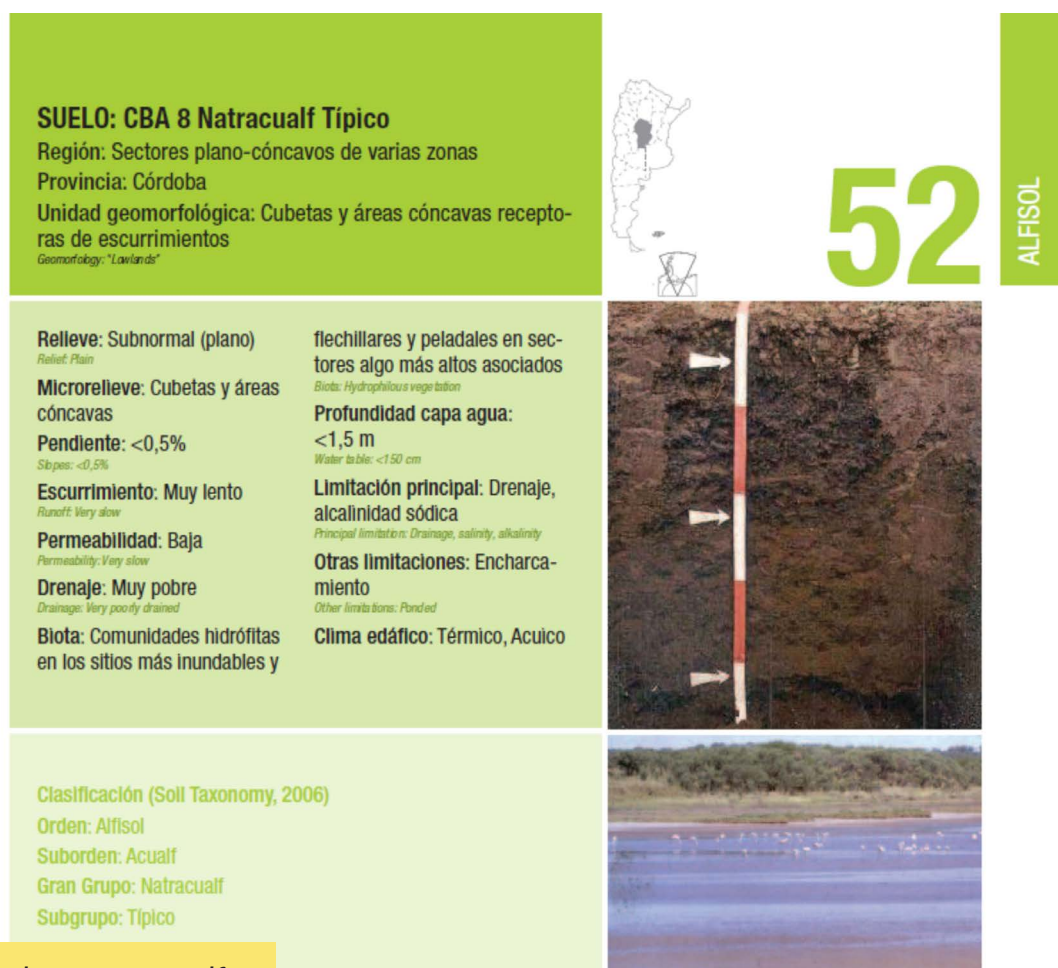


Figura N° 7 | Descripción de un natracualf.

- **Aridisoles:** son suelos de regiones áridas de muy bajo contenido en materia orgánica y escasa fertilidad. Por esta ausencia de nutrientes es que presenta colores muy claros y sus materiales son muy fácilmente erosionables. Estos suelos están cubiertos por pastos duros, por lo que se los utiliza para el pastoreo de ganado poco numeroso y resistente a estas condiciones.
- **Vertisoles:** son suelos pesados, arcillosos y difíciles de trabajar, ya que al humedecerse se expanden y al secarse se agrietan. A pesar de que suelen tener buen contenido de nutrientes, se restringe su uso para la actividad agrícola. Pero sí pueden constituirse en buenas áreas pastoriles.

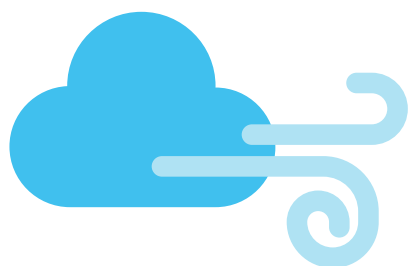
Lo mencionado previamente es una breve descripción de los principales órdenes de suelos de la región. Es importante destacar que la información de suelos de la República Argentina se encuentra disponible en: <http://geointa.inta.gov.ar/>

CAPÍTULO 3

¿Qué es la erosión hídrica?

MARÍA GUADALUPE ARES

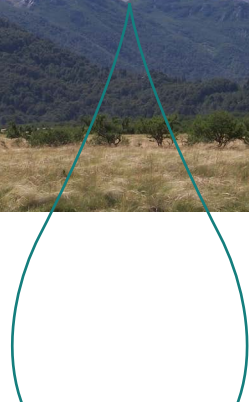
gares@faa.unicen.edu.ar



La **erosión** es un proceso que ocurre naturalmente y que contribuye a **dar forma a los paisajes** sobre la superficie de la Tierra. De este modo, genera cambios lentos que son perceptibles después de siglos.

A este tipo de erosión se la denomina **erosión geológica**. Los **agentes** que la generan son el **agua, el viento, las variaciones de temperatura, la gravedad y los glaciares**, a los que se debe atribuir el desgaste de los cerros y las montañas y el modelado actual de la Tierra con sus elevaciones esculpidas, cañones, llanuras, deltas y cursos de agua (Hudson, 1982).

Analicemos estas imágenes:



Al observarlas resulta relativamente fácil hallar diferencias, pero ¿qué tienen en común? Estos paisajes han sufrido a lo largo del tiempo el efecto de diferentes fuerzas de desgaste, que producen erosión. Por el contrario, la erosión acelerada o antrópica es el proceso influido por la acción del hombre, que se genera cuando, por ejemplo, prepara la tierra para el cultivo o cuando la utiliza para construir edificios o caminos (FAO, 1967). En el caso de la erosión hídrica, el agente que provoca el desgaste acelerado de las tierras es el agua que cae en forma de lluvia. Si la lluvia posee energía suficiente y se mueve sobre un terreno con condiciones que resultan favorables: escasa cubierta vegetal protectora y suelo poco resistente, se expresa ese poder erosivo. Así, se desprenden partículas del suelo y, como consecuencia, se pierde la capacidad productiva de las tierras. Este tipo de erosión, entonces, surge como consecuencia de la interacción entre el poder de la lluvia para generar la pérdida de suelo: la erosividad, y la susceptibilidad de ese suelo ante la acción del agua: la erodabilidad. La erosividad es la capacidad potencial de la lluvia para erosionar, y está asociada a su energía. La energía de la lluvia se evalúa a través de su intensidad, es decir, de la cantidad de precipitación que cae durante un período de tiempo determinado.

Los **paisajes** han sufrido a lo largo del tiempo **procesos de desgaste** provenientes de diferentes fuerzas: las naturales y la antrópica.



f. Es un índice de la susceptibilidad a la erosión que depende de las propiedades intrínsecas de cada suelo y del uso que se haga de él.

La **erodabilidad del suelo** puede asociarse a tres aspectos principales:

1. Las características fundamentales del suelo, que determinan la capacidad de ingreso del agua al suelo, lo que evita que escurra por su superficie:

- La presencia de materia orgánica.
- La textura del suelo, dada por la proporción de partículas de arena, limo y arcilla.
- La estructura del suelo, que se forma al agregarse o reunirse las partículas de arena, limo y arcilla junto a la materia orgánica. Los agregados que resultan pueden ofrecer resistencia ante la acción de la lluvia.

2. Cómo y para qué se usa el suelo. Aquí entran en juego:

- **Las especies que se cultivan:** trigo, cebada, maíz, girasol, soja, como ejemplos frecuentes en la provincia de Buenos Aires.
- **La secuencia de cultivos:** cómo se alternan en el tiempo, lo que determina, entre otros aspectos, la cantidad de cubierta protectora que puede quedar en el suelo a partir de los residuos de los cultivos.
- **La implementación de prácticas** que contribuyan a disminuir la cantidad de agua que escurra por el terreno, es decir si los cultivos se realizan a favor o en contra de la pendiente para controlar el agua que escurra por el terreno.

3. La pendiente del terreno y su longitud: su grado de inclinación, y si la pendiente es corta o larga.

EROSIÓN HÍDRICA: es función de:

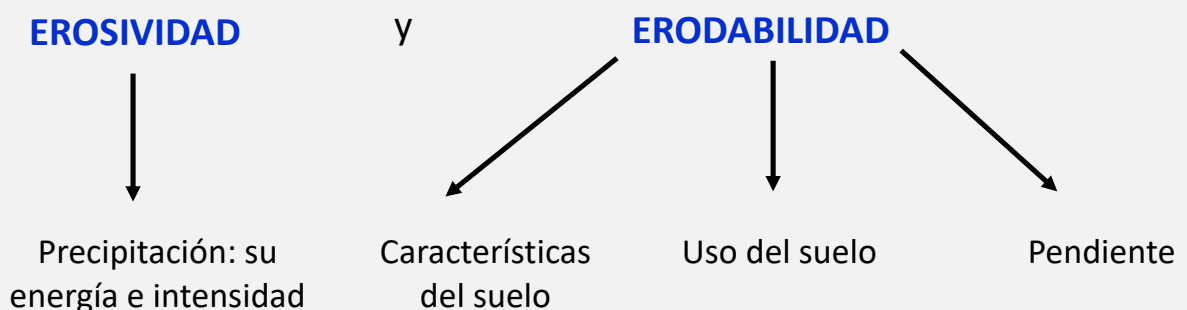


Figura N° 1 | Agentes que condicionan el proceso erosivo.

La erosión hídrica se produce en tres etapas principales:

1. La etapa de desprendimiento, en la que intervienen las gotas de lluvia. Estas gotas caen con una energía vinculada a su velocidad de caída, que se disipa sobre la superficie del suelo y rompe los terrones o agregados. Como consecuencia, se desprenden partículas que pueden tapar los poros pequeños del suelo y la superficie resulta sellada, con un aspecto como el que muestra la **Figura 2**. A su vez, si hay pendiente, algunas de esas partículas pueden moverse hacia las partes más bajas del terreno. En esta fase se produce erosión por la salpicadura que generan las gotas.



Figura N° 2 |
Fases del proceso erosivo.

2. La etapa de transporte, en la cual se moviliza el material desprendido en el agua que escurre sobre la superficie. El agua puede escurrir en forma de lámina o manto con velocidad lenta. También lo puede hacer en forma turbulenta con mayor velocidad, capacidad de transporte y de desprendimiento de partículas con respecto al escurrimiento laminar. En esta etapa se produce la erosión laminar, la erosión en surcos y la erosión en cárcavas, que se evidencian en el campo de manera diferente, como muestra la **Figura 3**.

EROSIÓN POR SALPICADURA**EROSIÓN EN SURCOS****Flujo concentrado****EROSIÓN LAMINAR****Flujo laminar****EROSIÓN EN CÁRCAVAS**

Figura N° 3 |
Tipos de erosión.

La erosión laminar consiste en la remoción de una capa o lámina más o menos uniforme de suelo, y a corto plazo es poco perceptible, pero puede ser muy importante con el pasar de los años, ya que la cantidad de tierra removida puede ser considerable (Cisneros *et al.*, 2012).

La erosión en surcos se produce cuando se arrastra más material y como consecuencia de ello, quedan pequeños canales que pueden eliminarse con las labores de la maquinaria agrícola. En cambio, la erosión en cárcavas se produce si los surcos se profundizan por el agua concentrada corriendo por los mismos. En este caso, el terreno no puede nivelarse con los instrumentos de labranza comunes (FAO, 1967).

3. La etapa de sedimentación, en la cual el suelo desprendido y transportado se deposita en sitios debido a la falta de energía que continúe su movimiento (Figura 2).

Consideraciones finales

En Argentina, estadísticas recientes indican que 64,6 millones de hectáreas se encuentran afectadas por erosión hídrica, y que tal proceso está en avance: la superficie erosionada se incrementó en 34,6 millones de hectáreas en los últimos 25 años (Casas, 2015). En la provincia de Buenos Aires, es una problemática prioritaria en la región de las Sierras de Tandilia (Sfeir, 2015), y allí este proceso de degradación está estudiándose. Con esa finalidad se registran los escurrimientos y el material de suelo desprendido en el curso de agua que drena una cuenca pequeña. Los resultados obtenidos hasta la fecha indican la presencia de erosión laminar y en surcos, estos últimos asociados a lluvias intensas y suelos con escasa cobertura en su superficie. Si bien el proceso en surcos es menos frecuente que el laminar, es el responsable de la mayor pérdida de suelo y nutrientes como el fósforo en el área bajo análisis (Ares, 2014; Ares et al., 2016). La información que se está generando contribuye a profundizar el conocimiento de la dinámica del proceso erosivo a escala de cuenca agrícola, la unidad donde pueden ser implementadas las prácticas de manejo para su control.

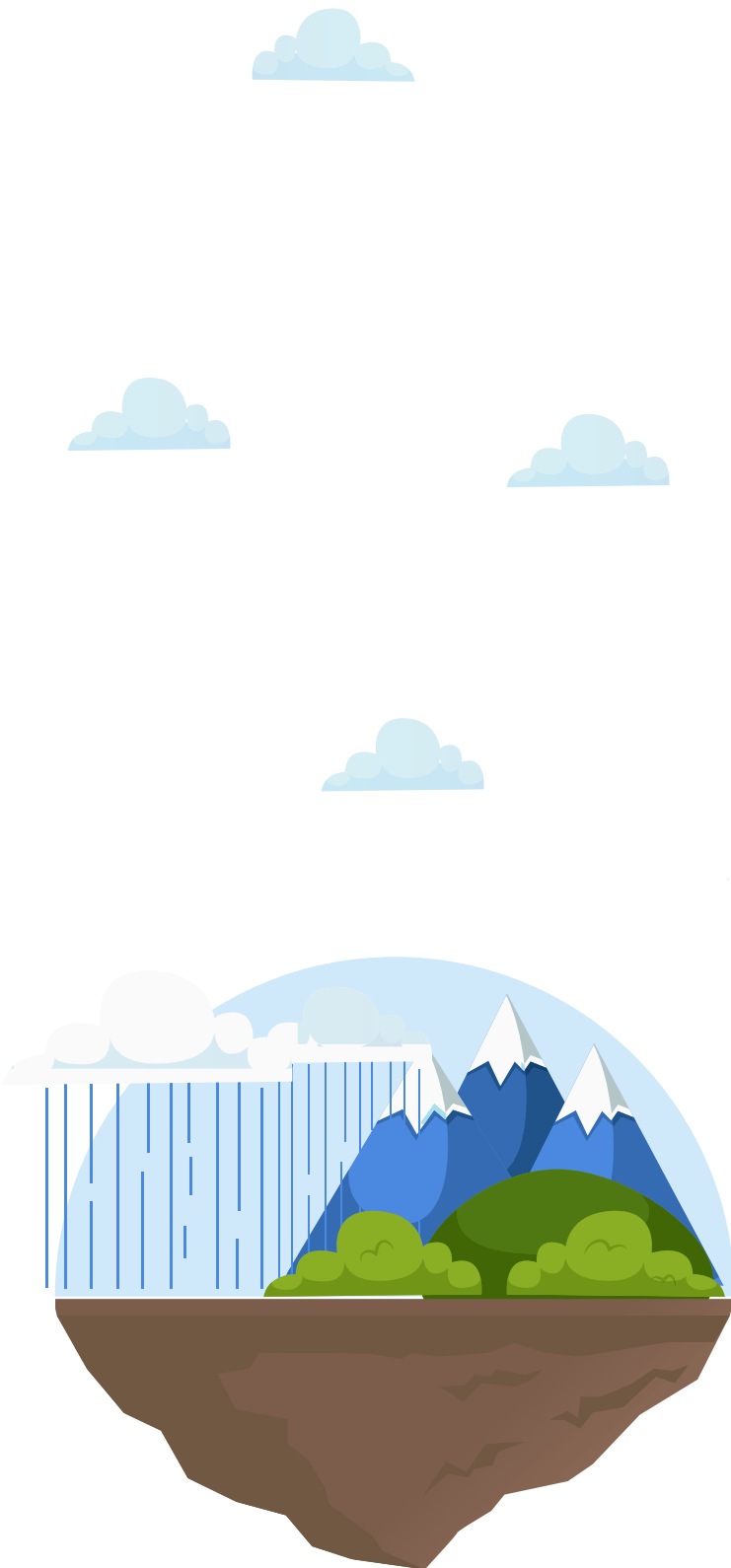
CAPÍTULO

4

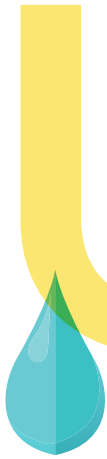
El agua en el subsuelo: zona no saturada y acuíferos

SEBASTIÁN DIETRICH

sebadietrich@ihlla.org.ar



En reiteradas oportunidades seguramente ha podido observar que **luego de una precipitación intensa**, el suelo parece haber absorbido gran cantidad del agua. Pero en realidad ¿cuál es el **destino del agua de lluvia?**, ¿será el mismo en todos los suelos? ¿A qué nos referimos al hablar de **agua subterránea?** Estos interrogantes son respondidos y ampliados en el presente trabajo.



Una vez que el agua de las precipitaciones llega a la superficie del terreno, puede tomar diferentes caminos. En las zonas de llanura, debido a las bajas pendientes que caracterizan el paisaje ($< 1\%$, es decir, un declive de 1 m por cada 100 m en la horizontal), el agua puede permanecer estancada por tiempos lo suficientemente largos como para evaporarse y volver hacia la atmósfera en forma de vapor. En otras zonas, donde las pendientes son un poco mayores (1-5 %), como podrían ser las cabeceras de las cuencas de llanura, el agua de precipitaciones puede escurrirse superficialmente y alimentar los cursos fluviales (ríos y arroyos) ya formados en el ambiente. Finalmente, si el agua logra escapar a los dos procesos mencionados anteriormente puede infiltrarse, esto es, ingresar en el suelo a través de sus poros.

Si observáramos en detalle la composición de un suelo o, en términos geológicos, de un sedimento, veríamos que se compone de fragmentos de rocas denominados clastos o granos y de poros, que son los espacios que quedan entre ellos (**Figura 1**). El agua se moverá, entonces, a través de los poros e ingresará al suelo por infiltración. En esta primera porción del subsuelo, una fracción de los poros está rellena con agua y el resto del espacio es ocupado por gases provenientes de la atmósfera y de la respiración de la microfauna. Esta porción del suelo en que los poros no están completamente ocupados por agua es conocida con el nombre de zona no saturada. El agua presente en la **zona no saturada** tiene la posibilidad de retornar a la atmósfera a través de la traspiración de las plantas, que absorben agua a través de sus raíces, la elevan por su sistema vascular y la expulsan a través de sus hojas. En menor medida, el agua también puede evaporarse directamente desde el suelo sin la acción de las plantas. Como no es posible medir ambos términos en forma aislada, se suele hablar de evapotranspiración. Este es un proceso muy importante, especialmente en las zonas



f. Porción del suelo en la que los poros no están completamente ocupados por agua sino que además contiene gases.

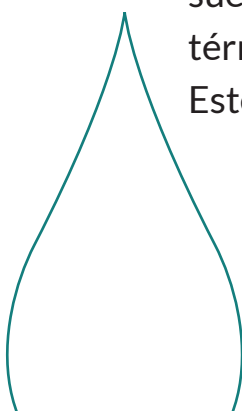




Figura N° 1 | Representación esquemática de un sedimento.

de llanura, ya que aproximadamente el 90% de las precipitaciones que alcanzan la superficie del terreno regresa a la atmósfera por evapotranspiración (Usunoff et al., 2009).

Si el agua de infiltración logra penetrar más allá de la zona de influencia de las raíces, proseguirá su camino descendente hasta alcanzar el acuífero. Este proceso se denomina recarga.

Pero antes de adentrarse en los acuíferos, es importante detenerse en otros aspectos de la zona no saturada. Si se pudiera medir cada una de las variables que se mencionaron anteriormente durante un año hidrológico completo, que bien podría corresponder en nuestra zona a un año calendario, podemos realizar un balance de agua que permitirá conocer cuánta agua puede llegar hasta el acuífero, es decir, la recarga.

¿En qué favorece conocer la recarga? No hay que perder de vista que el fin último de los estudios hidrológicos y/o hidrogeológicos es poder realizar una administración adecuada de los recursos, es decir, qué volumen se puede extraer sin producir un agotamiento

de los mismos y un detrimento de su calidad química.

Uno podría preguntarse ¿y cómo es posible realizar un balance de agua? La respuesta conceptual es sumamente simple y se basa en el principio de conservación de la masa.

La masa de agua proveniente de las precipitaciones (P), que es la variable de entrada al sistema, se distribuye entre la escorrentía superficial (E_s), la evapotranspiración (ET) y la infiltración (I) o recarga (**Fig. 2**). El último término (ΔS) corresponde a la variación en la cantidad de agua en el suelo desde el comienzo hasta el final del año hidrológico, y que puede ir variando de acuerdo a la magnitud del resto de los procesos (*Custodio y Llamas, 1983*).

El almacenamiento del agua en el suelo puede conocerse a través de la medición de la humedad, definido como el volumen de agua contenido en una unidad de suelo, y suele expresarse como un porcentaje. Existen actualmente diferentes tecnologías para estimar la humedad con cierta precisión.

Entonces, conociendo cuatro de las cinco variables de la Ecuación de balance de agua en el suelo (**ecuación 1**), la quinta puede estimarse con un simple pasaje de términos. Es decir, que podemos conocer, o al menos, tener una estimación de la recarga, midiendo las precipitaciones, la escorrentía, la evapotranspiración y la humedad del suelo (**Fig. 2**).

En las **zonas de llanura** un 90% de las **precipitaciones** que alcanzan la superficie del terreno regresa a la atmósfera por **evapotranspiración** (*Usunoff et. al., 2009*).

$$P = E_s + ET + I \pm \Delta S$$

Ecuación N° 1 | Balance de masa de agua en el suelo.

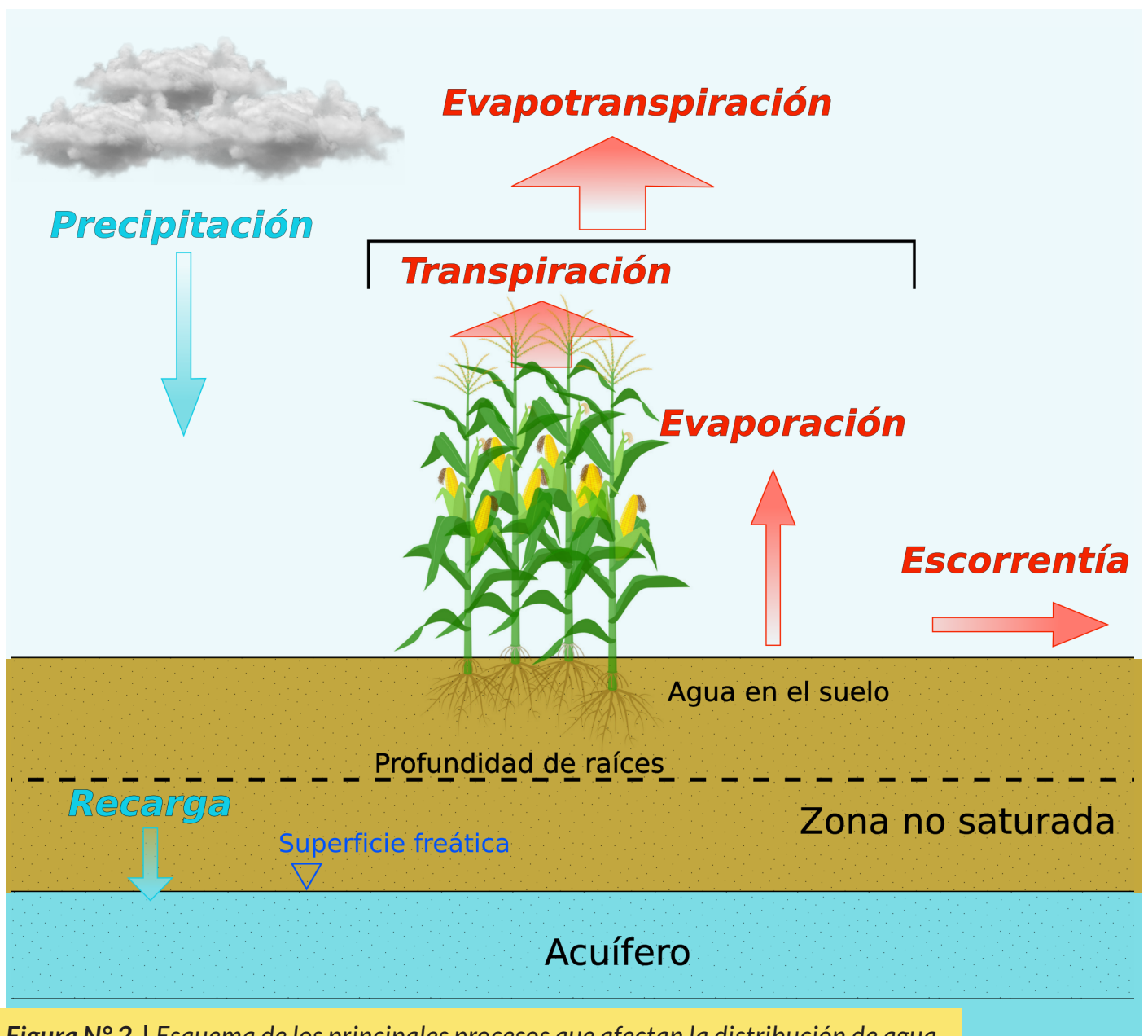


Figura N° 2 | Esquema de los principales procesos que afectan la distribución de agua en la superficie y en la zona no saturada.

Los Acuíferos: ¿reservas de agua dulce?



m. *Formación geológica capaz de albergar y transmitir agua de modo que pueda ser explotado de una manera fácil y económica.*

Definida la recarga como la entrada de agua al acuífero, resta preguntarse ¿qué es un **acuífero**? Se lo define como una formación geológica capaz de albergar y transmitir agua de modo que pueda ser explotado de una manera fácil y económica (CDCIHS, 2009). Es decir, que para poder denominar a una formación como acuífera, debe contener agua pero a la vez debe permitir que la misma se mueva. En contraposición, existen formaciones que contienen grandes volúmenes de agua pero debido a que están conformadas por partículas extremadamente pequeñas (arcillas), el agua se mueve tan lentamente que no puede ser extraída.

De acuerdo a su comportamiento hidráulico, los acuíferos pueden dividirse en confinados, semiconfinados o libres. Sin embargo, nos detendremos en el último caso dado que es el que predomina en las regiones de llanura húmeda. Este tipo de acuíferos está delimitado en su parte superior por la superficie freática que bien podría idealizarse como el punto a partir del cual los poros están completamente saturados con agua, a diferencia de lo que ocurría en lo abordado anteriormente (zona no saturada). La razón de su denominación de “libre” radica en el hecho de que esta superficie se mueve libremente hacia arriba o hacia abajo según un equilibrio entre las entradas de agua y las salidas (balance de agua en el acuífero).

Entérminos formales, la superficie freática es definida como la superficie en la cuál la presión del agua subterránea es igual a la atmosférica.

Ahora bien, el límite inferior de estos acuíferos suele ser una roca impermeable, que en el caso de nuestra región de estudio, la llanura pampeana, suelen ser rocas graníticas y metamórficas muy antiguas. Esto se denomina basamento hidrogeológico porque de alguna manera constituye el “apoyo” de este sistema acuífero. En la **Figura 3** se muestra un acuífero libre delimitado en su parte superior por la superficie freática y en su parte inferior por un

basamento hidrogeológico. Se muestra la posición de la zona no saturada. Se esquematiza una sección de flujo subterráneo de área A por la que circula un caudal subterráneo Q . Este esquema constituye el modelo conceptual del funcionamiento del acuífero libre en la cuenca del arroyo Azul.

El hecho de que una formación geológica sea capaz de albergar y transmitir agua implica que la misma es porosa y que el agua se encuentra dentro de los poros que fueron esquematizados inicialmente. Por lo tanto, para el caso de nuestra región, debemos abandonar la concepción de los acuíferos como ríos subterráneos que corren por grandes cavidades.

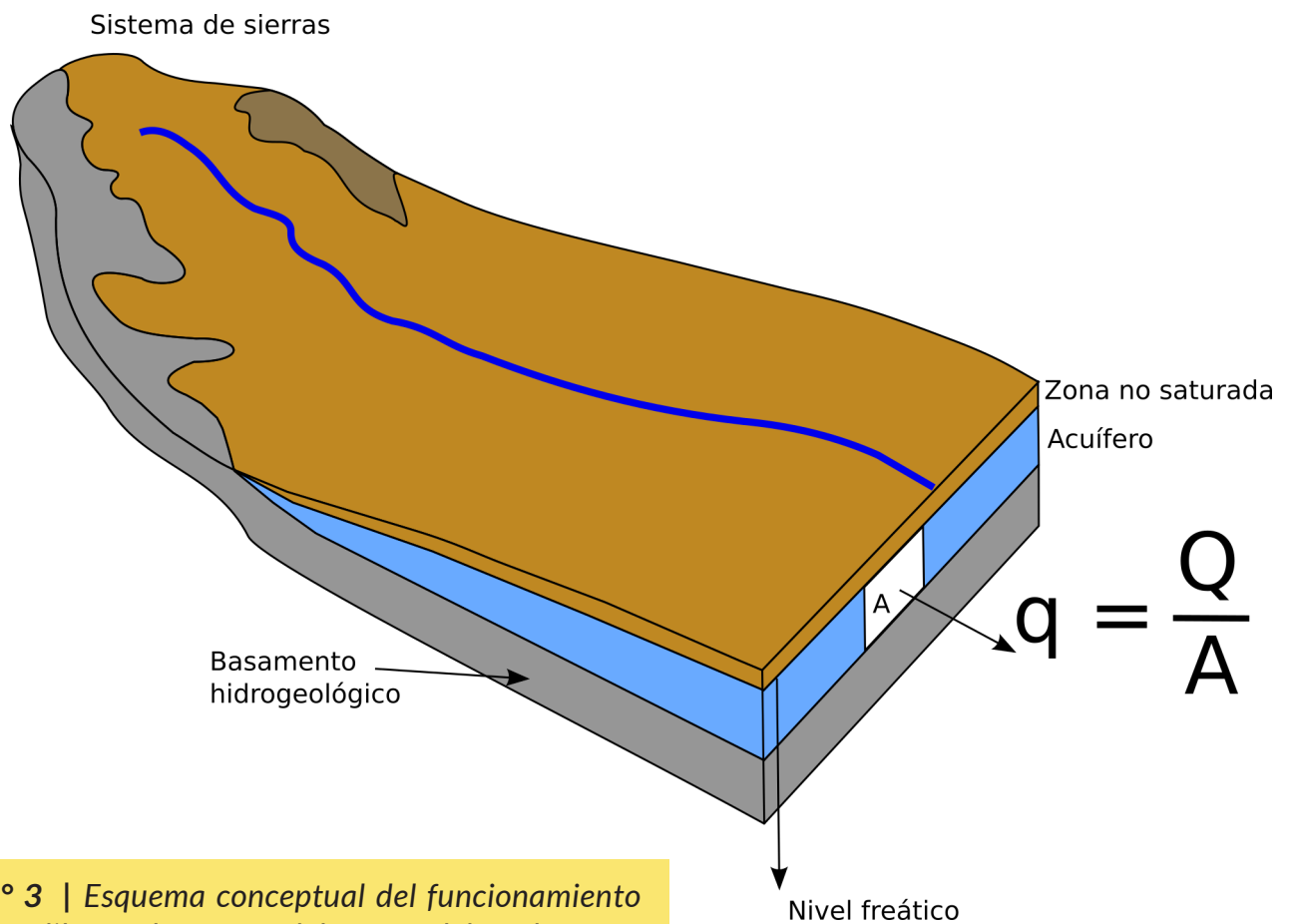


Figura N° 3 | Esquema conceptual del funcionamiento del acuífero libre en la cuenca del Arroyo del Azul.

Ahor bien, ¿qué pasa con el agua dentro de estos poros? ¿Se mueve? ¿A qué velocidad? Uno de los primeros en dar una respuesta cuantitativa a esta pregunta fue el ingeniero francés Henry Darcy, quien realizó diversos experimentos con tanques de arena y publicó un tratado en 1856 en el que establecía la ley que gobierna el flujo subterráneo en la mayoría de los acuíferos. Según esta ley, el agua se mueve con una velocidad que es proporcional a la diferencia de potencial hidráulico y a una constante de proporcionalidad que se denomina conductividad hidráulica. En los próximos párrafos desarrollaremos estos conceptos. Pero los hidrogeólogos no pueden acceder directamente a su objeto de estudio para realizar observaciones en forma directa, tal como lo hiciera Darcy con sus experimentos. La forma que se tiene de acceder al acuífero es través de una perforación, que es una información puntual. Por lo tanto, debe ser interpretada y extrapolada a sitios en los que no se cuenta con esta información para poder estimar su comportamiento en dichas zonas sin datos.

¿Qué información es la que se puede obtener una vez que se realiza un pozo o perforación?

Una vez terminada la perforación, tendremos un tubo inserto en el terreno que ha sido ranurado en algún sector para permitir el ingreso del agua. En general, y esto es así en la mayoría de los pozos de nuestra zona, tendremos que la primera parte del tubo estará seco y a partir de una cierta profundidad, el tubo estará completo con agua. Entonces, el primer dato que se quiere conocer es la profundidad, medida desde la superficie, a la cual se encuentra el agua. Si contamos con más de un pozo y extrapolamos lateralmente esta profundidad podemos construir una superficie, denominada superficie freática. ¿Y por qué este dato? Si podemos referir esta profundidad de la superficie freática a una superficie de referencia, que podemos denominar absoluta, tendremos conocimiento del



m. En los acuíferos libres es la altura de la superficie freática respecto de la altura media del nivel del mar.

nivel piezométrico. Para facilitar dicha medición, los hidrogeólogos cuentan con una herramienta denominada sonda freaticométrica que consiste en una cinta métrica de varios metros de longitud en cuyo extremo posee adosado un sensor eléctrico que al entrar en contacto con el agua emite un sonido o una señal lumínica. Finalmente, necesitamos contar con la altitud del terreno, que se extrae de los mapas topográficos o con GPS, a la cual se le resta la profundidad medida con la sonda. Si recordamos la ley de Darcy, una de las variables que controla el flujo subterráneo es la diferencia de potencial hidráulico, que equivale a decir, la diferencia de nivel piezométrico. Entonces, conocido el nivel freático en dos pozos, el agua se moverá desde el mayor al menor nivel y con mayor velocidad cuanto mayor sea la diferencia entre ambos.

En la **Figura 4** se presentan todos estos conceptos. En la misma se esquematiza un acuífero y dos perforaciones en las que se tiene información del nivel freático. Conocida la separación entre ambos, se obtiene el gradiente hidráulico que requiere la Ley de Darcy. En la figura también se han incluido las líneas de flujo subterráneo (líneas azules) y, en forma perpendicular a ellas, las líneas equipotenciales (líneas rojas) vistas de perfil.

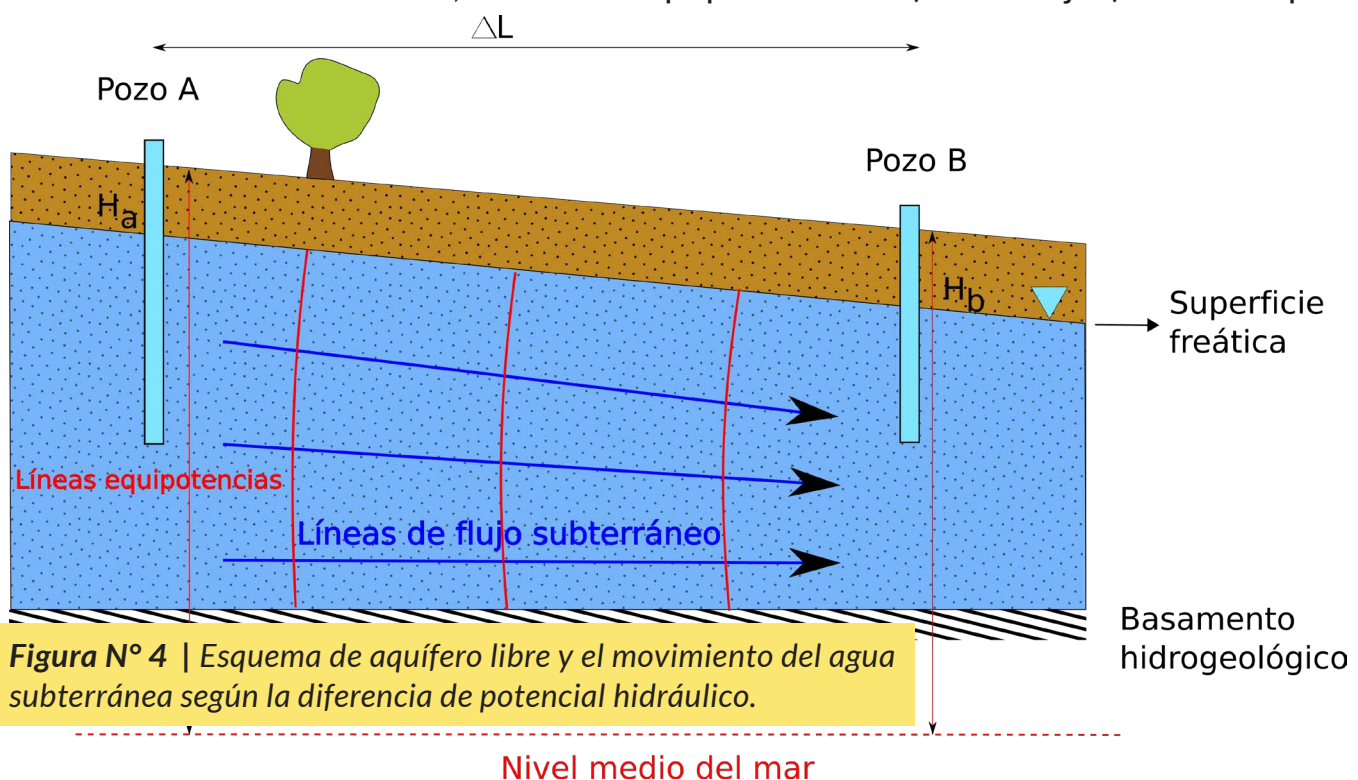


Figura N° 4 | Esquema de acuífero libre y el movimiento del agua subterránea según la diferencia de potencial hidráulico.

Si se pudiera contar con una red de pozos distribuidos en la superficie de toda una cuenca y se realizara un mapa freático, con líneas isopiezas que conecten puntos de igual nivel freático, podría conocerse los movimientos de agua en toda esa superficie, ya que las líneas de flujo se disponen en forma perpendicular a las isopiezas. En la **Figura 5** se muestra un mapa piezométrico correspondiente a la cuenca del arroyo Azul.

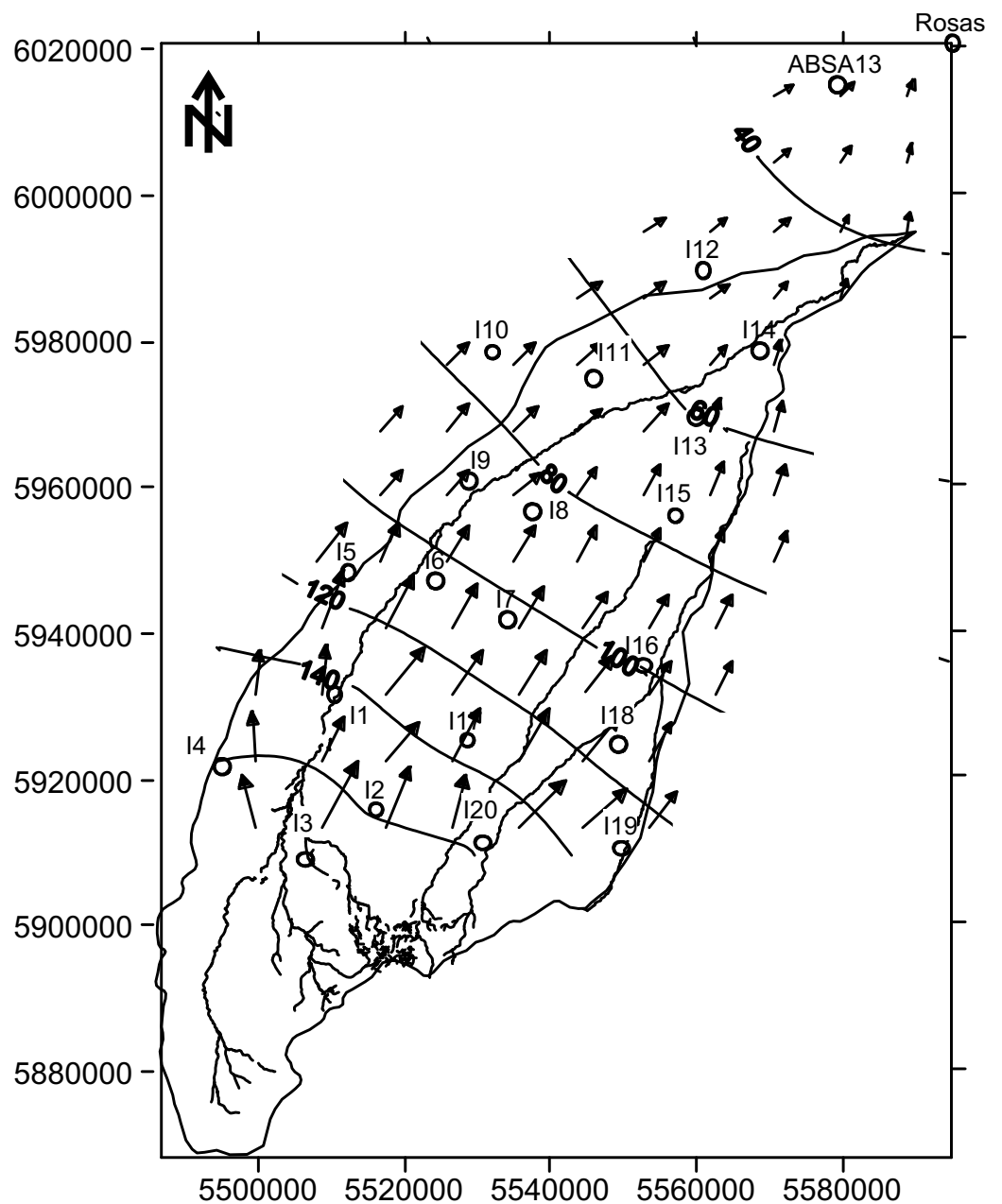


Figura N° 5 | Mapa de líneas equipotenciales para la cuenca del Arroyo Azul.

La superficie freática es un indicador de las reservas disponibles en los acuíferos. Se comentó anteriormente que la recarga es la entrada de agua al acuífero. Por lo tanto, ante un evento de recarga, se notará una elevación del nivel freático. En la **Figura 6** se observan las recargas que producen algunas de las precipitaciones.

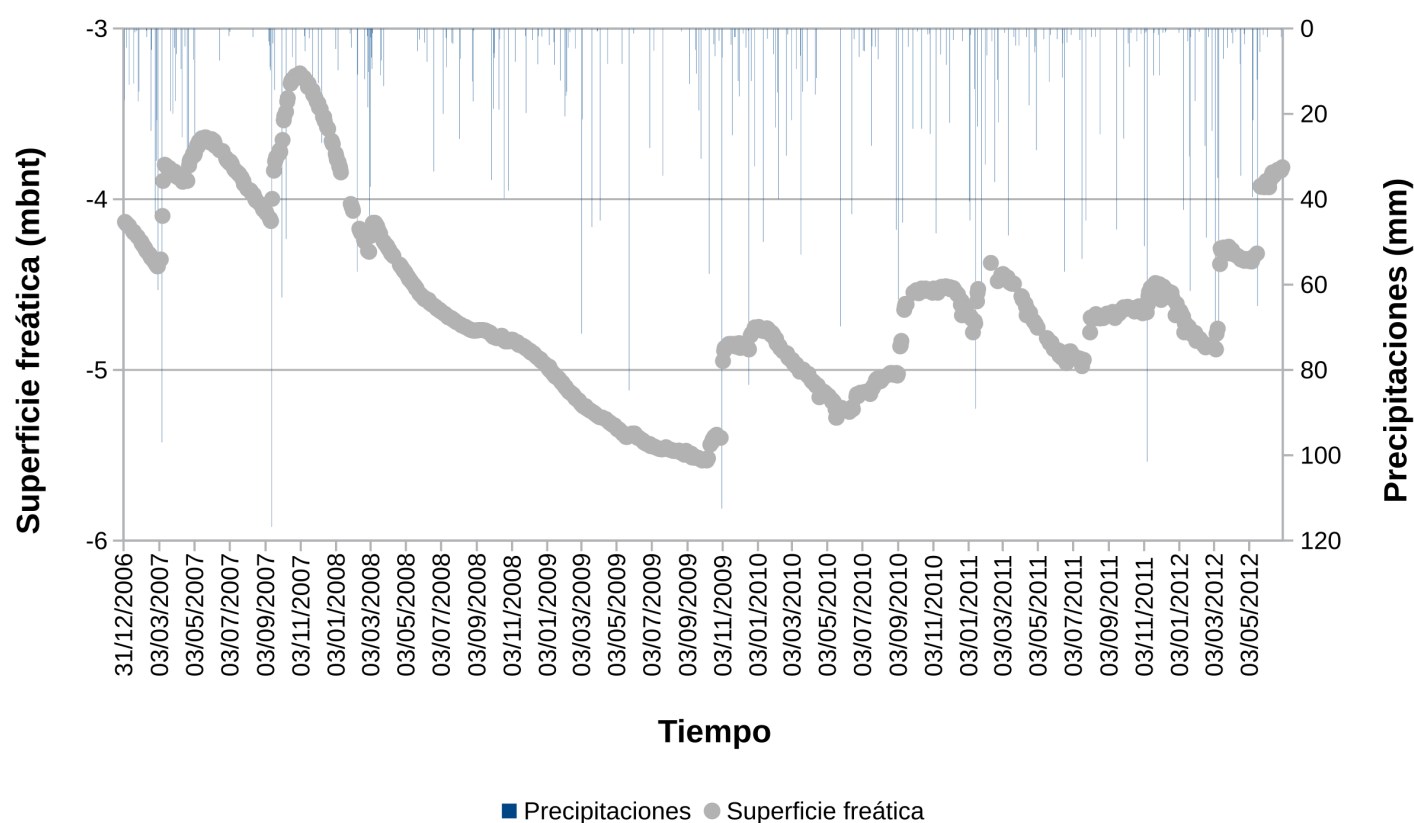


Figura N° 6 | Respuesta del nivel freático ante los eventos de precipitación.

A su vez, los acuíferos se descargan, es decir, alimentan ríos, lagunas e incluso vierten sus aguas en el mar. Muchos se habrán preguntado alguna vez, “¿por qué los ríos no se secan cuando cesa la lluvia?” Y la respuesta es que los ríos y arroyos de nuestra llanura están alimentados, la mayor parte del tiempo, por el agua subterránea. Es decir, los acuíferos descargan sus aguas en los cauces y mantienen el caudal de los mismos. Por otro lado, esta descarga hace disminuir la superficie freática, es decir, las reservas de los acuíferos. Por lo tanto, la posición de la superficie freática

resulta de un equilibrio entre las entradas y las salidas al acuífero. Finalmente, la conductividad hidráulica es el otro parámetro que describe el movimiento del agua subterránea y que fue enunciado por Darcy. Es un parámetro que describe la facilidad con la que el medio es capaz de transmitir el agua que alberga. Matemáticamente, es una constante de proporcionalidad entre el caudal subterráneo y el gradiente hidráulico. A principios del siglo pasado, fue definido como uno de los dos parámetros fundamentales de la hidrogeología. Si bien, es un parámetro de difícil estimación, es posible conocer su valor mediante diferentes técnicas, dentro de las cuales, lo más usual es realizar ensayos de bombeo. Estos consisten en bombear el pozo y medir a determinados tiempos como desciende la superficie freática.

A modo de cierre

El agua subterránea se mueve y su velocidad está controlada por la conductividad y el gradiente hidráulico.

Las preguntas inevitables son ¿por qué invertir dinero y tiempo en conocer la superficie freática en toda una cuenca? y ¿para qué sirve tener toda esta información?

En este punto es importante subrayar que la gran mayoría de las ciudades de la provincia de Buenos Aires y también del resto del país, se abastecen para consumo humano de agua subterránea. Por lo tanto, es necesario asegurar la calidad de este recurso.

Con la información que nos aporta la piezometría podemos estimar las direcciones y velocidades del flujo subterráneo. Ello permite conocer dónde se encuentran las principales áreas de recarga y de descarga. Haciendo un seguimiento en el tiempo, es posible estimar cómo varían las reservas de estos acuíferos ante, por ejemplo, diferentes usos o cambios climáticos. Es posible así definir las áreas más propicias para futuras captaciones de agua y las zonas que debieran estar protegidas frente a posibles usos antrópicos.

CAPÍTULO

5

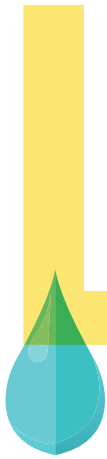
¿Qué entendemos por calidad de agua?

JOSÉ GONZÁLEZ CASTELAIN
SABRINA DUBNY

josegc@faa.unicen.edu.ar - sabridu@gmail.com



En el presente material se discute el concepto de **calidad del agua** y se presentan las relaciones entre la calidad del agua superficial y el **ambiente** en el que se encuentra, integrado a las interacciones con los demás compartimentos del ciclo del agua y de la cuenca de drenaje. Como caso de aplicación, se presenta una **metodología de ensayos** de laboratorio con biota, para determinar cuánto afectan la salud de los organismos acuáticos las distintas sustancias químicas presentes en los cuerpos de agua.



La noticia nos acerca información referida a los ambientes acuáticos que provocan nuestra atención y curiosidad. A veces, esa información es confusa y apela a la mitificación. Pero el conocimiento reunido por las ciencias permite interpretar esa información, y relacionarla con los procesos involucrados con sus causas y consecuencias. En este caso, ¿de qué hablamos cuando hablamos de calidad del agua? y ¿a qué se debe que un agua posea cierta calidad?

 MENÚ

LA NACION


SUSCRIBITE

INGRESAR

LA NACION | TURISMO | VIAJES | OHLALÁ! VIAJA

La segunda vida de Villa Epecuén

Hace 30 años quedó bajo las aguas del lago Epecuén; hoy, junto con la vecina Carhué buscan resurgir con turismo termal y otras propuestas

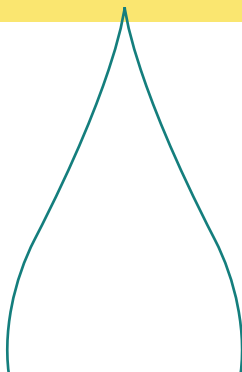


Hace 30 años quedó bajo las aguas del lago Epecuén; hoy, junto con la vecina Carhué buscan resurgir con turismo termal y otras propuestas



Extracto de una nota del Diario La Nación del 14/08/2016.

<https://www.lanacion.com.ar/turismo/viajes/la-segunda-vida-de-villa-epencuen-nid1927246>).



Concepto de calidad

Cuando vemos una bella playa tropical, con azules aguas cristalinas y arenas blancas, si bien puede tratarse de un espacio muy adecuado para disfrutar de agradables baños de mar, ese agua marina es de mala calidad para el consumo humano o animal debido a su alta salinidad (no se adecua a las características requeridas para la ingesta).



Según el diccionario de la Real Academia Española “Calidad” es:

- Propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor.
- Adecuación de un producto o servicio a las características especificadas.

Ambas definiciones son correctas y aplicables al agua, aunque pueden significar cosas diferentes según el enfoque conceptual (criterio) que se utilice. Para hablar de calidad se ha de pensar sobre el término en sí mismo y sobre la intención de quién lo presenta.

El agua de un lago glaciar es transparente, mientras la de un río de llanura es turbia (con sedimento en suspensión) o coloreada (con sustancias disueltas) (**Figura 1**). Suponiendo que no hay alteraciones antrópicas en ninguno de los casos que se muestran en las fotografías, ambas aguas poseerían la calidad natural esperable para ese ambiente y en cada uno de esos ambientes se desarrollarían las especies animales y vegetales típicas de cada región.

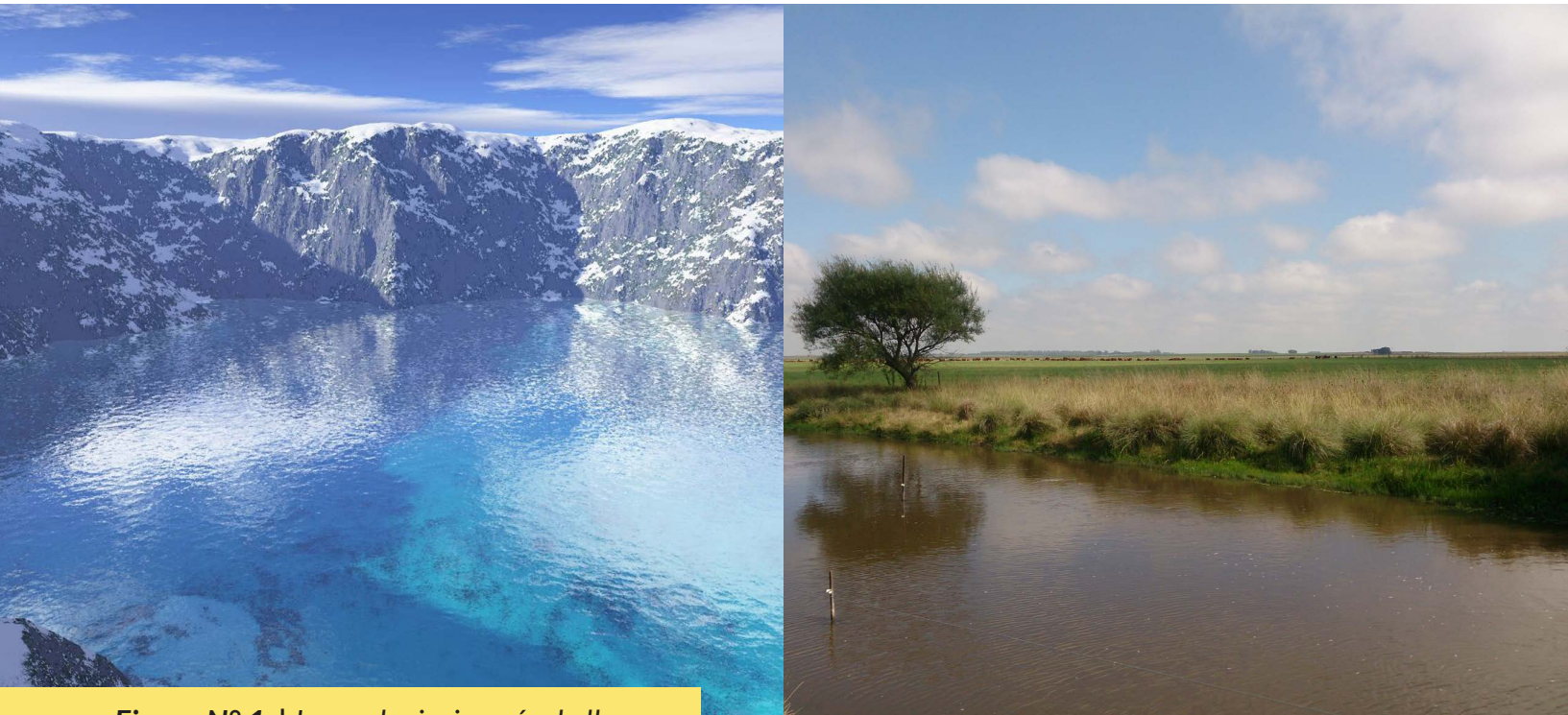


Figura N° 1 | Lago glaciar y río de llanura.

Pero ¿siempre es de baja calidad el agua cuando posee turbidez, o color? ¿Se puede hacer un rápido juicio de valor al respecto con ese dato?

El concepto de calidad del agua incluye las características químicas, físicas y biológicas del agua. Entonces, calidad del agua es un término utilizado para describir esas características. Existen parámetros fisicoquímicos que permiten identificar en qué condiciones se encuentra un cuerpo de agua. Esto brinda información rápida, aunque parcial del estado de un cuerpo de agua. Por tal motivo, es común el empleo de indicadores biológicos como complemento de los parámetros fisicoquímicos para la evaluación de calidad de agua, ofreciendo así una visión más integradora de los efectos perturbadores en los cursos de agua (Crettaz Minaglia et al., 2014).

Así, el conjunto de análisis físico-químicos y biológicos (pH, salinidad, oxígeno disuelto, temperatura, DBO, DQO, conductividad eléctrica, concentración de diferentes sustancias químicas en el medio, tipo y densidad de organismos presentes) permiten hacer una evaluación de la calidad del agua.

El concepto de **calidad del agua** incluye las características **químicas, físicas y biológicas** del agua y el uso que se hace de ella.

A su vez, la calidad del agua está referida al uso que se le va a dar. Por lo tanto, si es para consumo humano, existen normativas que determinan las concentraciones de sustancias o parámetros que deben estar por debajo de ese valor umbral. Existen también para consumo de agua por parte del ganado vacuno, o para uso recreativo, etc.



¿Por qué existen aguas de diferentes calidades?

Evolución natural de las aguas

En los distintos compartimentos del ciclo del agua, el agua interactúa con el entorno biogeoquímico, siguiendo distintos caminos hasta llegar a los ríos, arroyos, lagunas, y todo tipo de cuerpo de agua superficial (embalses, estanques, canales, etc.). Dependencia con las características del ambiente que atraviesa,

se observan cambios en la calidad del agua, principalmente el incremento progresivo de material fino en suspensión, y de la concentración de los nutrientes principales (nitrógeno y fósforo) en forma disuelta o particulada.

La tendencia natural de las aguas de una cuenca es pasar de un estado de baja salinidad (baja conductividad eléctrica) con aguas de tipo bicarbonatadas cálcico-magnésicas, hacia un incremento en la salinidad con aguas de tipo clorurado-sódicas. ¿Por qué?



La tendencia natural de las aguas de una cuenca es incrementar su salinidad.

Procesos relacionados con el flujo en cauces

Causas naturales:

- Aporte de agua de afluentes.
- Aportes difusos (no puntuales, distribuidos) por ingreso de agua de lluvia y agua subterránea.
- Procesos biogeoquímicos.

Causas antrópicas:

- Descargas puntuales (domiciliarias, urbanas, industriales).
- Aportes difusos (urbanos, rurales).

¿Por qué existen aguas de diferentes calidades?

Interacción del agua de lluvia con los componentes de la atmósfera: reacciones, disolución, condensación o arrastre

Causas naturales:

- Arrastre de aerosoles de origen marino o partículas elevadas por los vientos, condensación de nieblas, etc.

Causas antrópicas:

- Disolución de NO_x y SO_x (que generan la lluvia ácida) y arrastre del smog producto de la quema de combustibles fósiles, entre otros.

Interacción del agua de precipitación con la vegetación o con la superficie del suelo

Causas naturales:

- Disolución y arrastre de sustancias solubles o material particulado (incluyendo microorganismos), en función de la

energía de transporte (velocidad de flujo, pendiente).

Causas antrópicas:

- Erosión y lavado de suelos. Remoción de partículas finas del suelo sin estructura o sin cobertura, disolución de fertilizantes y otros agroquímicos aplicados en el agro; lavado y arrastre en escombros producto de la actividad minera; lavado y arrastre en suelos de áreas urbanas (combustibles, detergentes, microorganismos, etc.).

Interacción del agua que infiltra con el suelo somero (agua del suelo, subsuperficial)

Causas naturales:

- Disolución de sustancias del suelo, transporte de microorganismos, en función de la saturación y porosidad del suelo. Lixiviación, salinización, intercambio de iones con el material sedimentario, etc.

Causas antrópicas:

- Disolución de fertilizantes y otros agroquímicos, detergentes, lixiviación de residuos mineros y urbanos (basurales), etc.

Interacción con el agua subterránea, de origen local o no

Causas naturales:

- Mezcla de aguas, interacciones con el material sedimentario, etc.

Causas antrópicas:

- Mezcla con aguas contaminadas de origen urbano, industrial, minero, agrícola, pozos negros, etc.

Procesos relacionados con el flujo en cauces

Causas naturales:

- Afluentes. Aportes difusos (no puntuales, distribuidos) por ingreso de agua de lluvia y agua subterránea. Procesos biogeoquímicos.

Causas antrópicas:

- Descargas puntuales (domiciliarias, urbanas, industriales). Aportes difusos (urbanos, rurales).

Contaminación de las aguas continentales

Se entiende por contaminación de las aguas continentales a cualquier modificación del ambiente que, directa o indirectamente, altera las características y/o el funcionamiento del ambiente. Puede causar riesgos sanitarios, reducir el bienestar del hombre y de las comunidades acuáticas y perjudicar el mejor uso del agua actual o potencial. La contaminación no se refiere sólo a desechos tóxicos, ya que desechos no tóxicos como materia orgánica (por ej. residuos cloacales, desperdicios de frigoríficos) pueden afectar seriamente el funcionamiento de los cursos de agua alterando completamente sus características.

Los factores contaminantes son diversos y pueden agruparse de la siguiente forma:

- 1. Sustancias orgánicas biodegradables:** materia orgánica que, al degradarse por la biota, incrementa los requerimientos de oxígeno disuelto en el agua.
- 2. Sustancias orgánicas tóxicas:** son producidas por el hombre, y en general no son biodegradables. Ej. biocidas, anilinas, hidrocarburos, dispersantes (en la explotación petrolera), etc.
- 3. Sustancias inorgánicas tóxicas:** originadas por la industria y la minería. Ej. metales pesados, etc.
- 4. Sólidos en suspensión:** sedimentos que llegan por escorrentía provenientes de la construcción, industria cerámica, dragado, lavado de suelos por el agua de lluvia, etc.
- 5. Agentes patógenos:** microorganismos que pueden afectar la salud de humanos o animales.
- 6. Contaminación térmica:** cambios abruptos de la temperatura del agua, lo que altera el funcionamiento biogeoquímico natural.
- 7. Agentes radiactivos:** provenientes de la energía nuclear o tecnologías afines.

Las vías por las cuales estos factores pueden llegar a las aguas continentales son: a través de la atmósfera (Ej. plomo y mercurio), por precipitación (lluvia ácida), por entrada de cursos de agua tributarios, por aguas subterráneas, por escorrentía, o por liberación directa del hombre al cuerpo de agua.

Los contaminantes no sólo están en suspensión o disueltos en el agua, sino que también se acumulan en el sedimento y en las comunidades que allí viven (bioacumulación, biomagnificación).

Análisis físico-químicos y biológicos para determinar calidad de agua

La determinación de parámetros como pH, salinidad, oxígeno disuelto, temperatura, DBO, DQO, conductividad, concentración de diferentes sustancias químicas en el medio, tipo y densidad de organismos presentes, etc., son los requeridos para la evaluación de la calidad de agua de un ecosistema acuático.

Como se dijo anteriormente, la calidad del agua está referida al uso que se le va a dar (consumo humano, abrevado animal, riego, protección a la vida acuática, cuerpos de agua destinados para recreación, etc.). Para ello, existen normativas en función del uso del recurso hídrico. Para el consumo humano, se recomienda el uso de los valores guía de la calidad sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) como objetivo final en los sistemas de distribución de agua. Nunca se deben superar los valores máximos tolerables propuestos por la OMS.

Los niveles guía están relacionados al uso del recurso agua. A nivel nacional, estos niveles se encuentran establecidos dentro de distintos anexos del Decreto Reglamentario N° 831/93 de la Ley Nacional N° 24.051 sobre régimen de desechos peligrosos. En el Anexo II Tabla 2 del Decreto nombrado, se presentan los niveles guía de calidad de agua para la protección de la vida acuática (agua dulce superficial).

¿Cómo medir los parámetros químicos del agua?

Algunos de los parámetros químicos pueden ser medidos a campo y otros requieren de un análisis en laboratorio. Para aquellos parámetros que deben ser analizados en laboratorio, es necesaria la toma de muestras de agua. Recolectar la muestra consiste en tomar una pequeña porción de ésta, que represente la calidad de la zona de estudio. Por ello, la muestra debe ser representativa, y de ella se deben poder obtener los datos reales de las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua.

Por ejemplo, para realizar un análisis químico de un cuerpo de agua superficial, se precisan botellas color ámbar con tapa de teflón. Se deben enjuagar 3 veces con agua del arroyo y luego introducir la botella subsuperficialmente hasta completarla con agua. La muestra se debe mantener en frío (alrededor de 4°C) hasta la determinación en el laboratorio. En la **Figura 2**, se observan muestras de agua superficial (análisis químico), muestras de sedimento y muestras de macroinvertebrados bentónicos (frasco de plástico).



Figura N°2 | Muestras de agua superficial, sedimento y macroinvertebrados bentónicos.

Para acceder a un video que muestra una salida a una laguna típica del centro de la provincia de Buenos Aires ingresar en el siguiente código QR. Para ingresar deberá contar en su teléfono móvil con una aplicación: lector de código Qr.



Bioensayos de toxicidad



m. Pruebas bajo condiciones de laboratorio que permiten evaluar los efectos de los contaminantes sobre los seres vivos.

Existen pruebas conocidas con el nombre de **bioensayos de toxicidad** que, bajo condiciones de laboratorio, permiten evaluar los efectos de los contaminantes sobre los seres vivos. Son útiles, entonces, para analizar la toxicidad potencial del agua y los sedimentos sobre los organismos acuáticos (Ronco et al., 2004). Se pueden detectar efectos tanto de inhibición como de magnificación. Las reacciones de los organismos pueden ser crecimiento, proliferación, multiplicación, cambios morfológicos, fisiológicos o histológicos, o incluso, la muerte.

Los distintos efectos que pueden ocurrir en los organismos dependen de las propiedades químicas del compuesto, de la duración y frecuencia de la exposición, así como también, de la etapa del ciclo de vida de ellos. Por lo tanto, en relación al tiempo de exposición, existen dos tipos de bioensayos: crónico y agudo. El primero se refiere a ensayos en el que se exponen organismos de prueba a la presencia de concentraciones graduadas de un potencial agente tóxico, durante un periodo de exposición que cubre, al menos, una generación del organismo de prueba. En cambio, en los bioensayos de toxicidad aguda, los organismos se exponen durante un periodo de exposición breve (horas, días), respecto del ciclo de vida del organismo de prueba.

De estos ensayos se obtienen valores umbrales. Esto se refiere a que la concentración de la sustancia sea inferior a la que determina el deterioro del ecosistema. Uno de los resultados que se obtienen de estos ensayos de toxicidad sobre los organismos, es la LC50 (concentración letal 50). Este valor, evalúa la mortalidad de los organismos que se expusieron en la prueba y determina la concentración de la sustancia (que se probó sobre los organismos) en la que se muere el 50% de la población expuesta. Esto indica que existe una concentración del tóxico por debajo de la cual, ningún organismo se vería afectado.

Esto, permite establecer una relación entre la concentración de la sustancia contaminante en el medio y la manifestación de efectos adversos en el ecosistema. Entonces, a algún valor de concentración de la sustancia considerada, el ecosistema mostrará que ha sido adversamente afectado por la presencia de ese factor estresante. De ese modo, el valor del indicador en ese punto será usado como criterio para tomar la decisión de que el ecosistema ha sido impactado.

Estos ensayos toxicológicos realizados a seres vivos se han convertido en tecnologías destinadas a identificar posibles riesgos de contaminación química en agua. Por lo tanto, también son instrumentos idóneos para prevenir en forma temprana posibles efectos sobre la salud de los ecosistemas y de las personas que de ellos dependen.

Es importante realizar monitoreos ecotoxicológicos utilizando especies autóctonas. Estas especies deben presentar una sensibilidad equivalente a las especies recomendadas por organismos internacionales que establecen protocolos para estos bioensayos. Algunas de las características que deben presentar son la sensibilidad a sustancias tóxicas, relevancia ambiental, ciclos de vida cortos, fáciles de mantener en condiciones de laboratorio, tolerancia a las variaciones fisicoquímicas del medio, facilidad de identificación taxonómica e importancia ecológica. Debido a que la especie *Hyalella curvispina* (Crustacea: Amphipoda) (**Figura 3**) se encuentra ampliamente distribuida en América del Sur y presenta altas densidades en los cuerpos de agua poco profundos de la región pampeana, es adecuada para su uso como organismo centinela para la evaluación del impacto ambiental (*Mugni et al., 2015*). Sin embargo, existen ensayos toxicológicos realizados a otras especies autóctonas (vertebrados e invertebrados).

En algunos casos, para realizar estas pruebas en laboratorio, se requieren mantener estos organismos fuera del ambiente natural. Por ello, se los mantiene en laboratorio asemejando las condiciones naturales. Para el cultivo de *H. curvispina*, se deben

controlar las condiciones de temperatura, fotoperiodo, pH, oxígeno y alimentación, entre otros. En la **Figura 3**, se observan anfípodos alimentándose con una hoja de lechuga y en la **Figura 4**, los acuarios donde se los mantiene y crían.

Los ensayos ecotoxicológicos permiten analizar la potencial toxicidad del agua sobre los organismos acuáticos, a fin de determinar fluctuaciones en la diversidad de organismos presentes, densidad y distribución espacial de sus poblaciones. Constituyen herramientas de evaluación prácticas para la gestión de los recursos hídricos.



Figura N°3 | *H. curvispina* alimentándose. Cultivo en laboratorio.

Figura N°4 | Cultivo de *Hyalella curvispina* en laboratorio



Consideraciones finales

Los ambientes acuáticos superficiales son un compartimento del ciclo del agua, y las características (la calidad natural) que poseen ellos y sus aguas son resultado de la interacción con los otros compartimentos de ese ciclo. Esta calidad natural se altera como respuesta de las actividades del hombre.

La gestión de los recursos hídricos debe tener una visión integral de los condicionantes naturales y de los efectos de las actividades antrópicas, con el fin de asegurar la satisfacción de las necesidades de nuestra sociedad y de preservar la integridad de los ecosistemas y su funcionamiento.

Glosario

- **Bioacumulación:** Proceso por el cual un compuesto es absorbido del agua a través de las branquias, tejidos epiteliales o cadena alimenticia y concentrado en el organismo.
- **Bioconcentración:** Proceso por el cual un compuesto es absorbido del agua a través de las branquias o tejidos epiteliales y concentrado en el organismo. Difiere de la bioacumulación en que no tiene en cuenta la incorporación de contaminantes a través del alimento.
- **Biomagnificación:** Proceso por el cual un contaminante se acumula en los organismos, aumentando su concentración a medida que sube en la cadena alimentaria, de manera que cada eslabón posee una concentración del contaminante superior a la del eslabón precedente.
- **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO):** Procedimiento químico estandarizado, a través de la incubación durante un determinado periodo de tiempo de una muestra líquida, a fin de determinar la cantidad de oxígeno requerido por la comunidad microbiana para oxidar biológicamente la materia orgánica existente en ella.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Procedimiento químico que permite la medición de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica presente en una muestra líquida.
- **Ecotoxicología:** Estudio del efecto de los contaminantes sobre los ecosistemas.
- **Efecto tóxico:** Es cualquier desviación del funcionamiento normal del organismo que ha sido producida por la exposición a sustancias tóxicas.
- **Exposición:** Es el contacto de una población o individuo con un agente químico o físico.

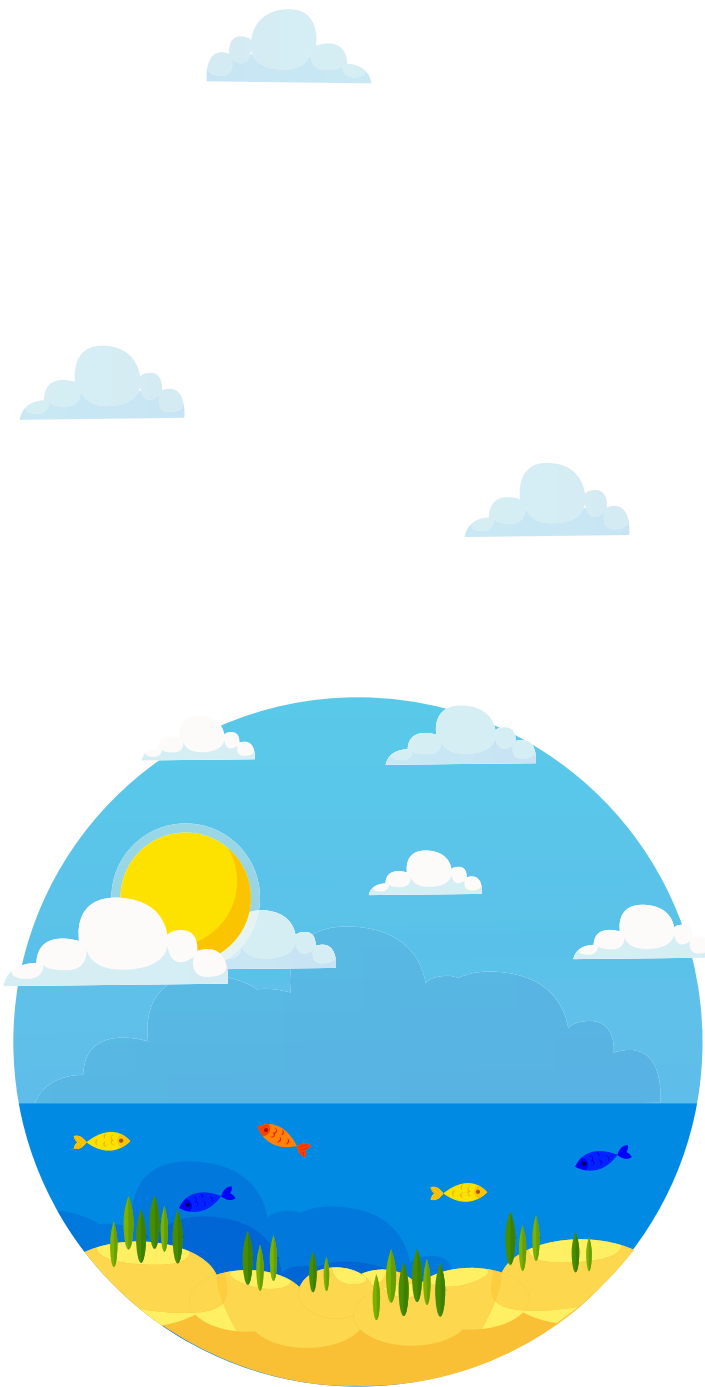
- **Ensayos de toxicidad aguda:** Ensayo en el que se exponen organismos de prueba a la presencia de concentraciones graduadas de un potencial agente tóxico, durante un periodo de exposición breve (días, horas), respecto del ciclo de vida del organismo de prueba.
- **Ensayo de toxicidad crónico:** Ensayo en el que se exponen organismos de prueba a la presencia de concentraciones graduadas de un potencial agente tóxico, durante un periodo de exposición que cubre, al menos, una generación del organismo de prueba.
- **LC50:** Cantidad del tóxico en el medio (agua, aire, alimento, etc.) que mata al 50% de la población expuesta. Es la concentración letal para el 50% de los organismos expuestos.
- **Nivel guía de calidad:** Es un valor numérico de concentración límite, recomendado para proteger y mantener organismos nativos o un cuerpo de agua para un uso específico. Puede ser un nivel guía de calidad para suelos, agua, sedimentos.
- **Tributario:** Arroyo o río secundario que desemboca o desagua en otro principal.
- **Tóxico:** Es toda sustancia capaz de producir interacciones nocivas con organismos vivos.

CAPÍTULO

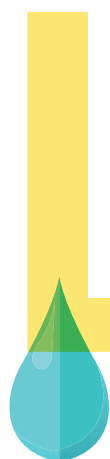
6

¿Para qué y
cómo se estudia
la composición
química del agua
subterránea?

MARÍA EMILIA ZABALA
mzabala@ihlla.org.ar



La **composición química** del agua subterránea varía espacialmente y temporalmente. Estas variaciones son el resultado de la ocurrencia de varios **procesos físicos-químicos naturales** como pueden ser, la concentración del agua de lluvia antes y/o durante la infiltración debido a la evaporación/ evapotranspiración, la disolución de dióxido de carbono (CO_2) en el suelo durante la infiltración del agua de lluvia, la disolución de los minerales que componen el terreno, la mezcla de aguas de distintos orígenes, entre otros.

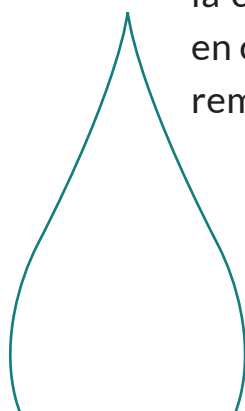


La composición química del agua subterránea varía espacialmente y temporalmente. Estas variaciones son el resultado de la ocurrencia de varios procesos físicos-químicos naturales como pueden ser, la concentración del agua de lluvia antes y/o durante la infiltración debido a la evaporación/evapotranspiración, la disolución de dióxido de carbono (CO_2) en el suelo durante la infiltración del agua de lluvia, la disolución de los minerales que componen el terreno, la mezcla de aguas de distintos orígenes, entre otros. La ocurrencia de estos procesos está condicionada por la geología, por la geomorfología (forma del paisaje) y por las condiciones climáticas del sector en estudio. Las actividades humanas a su vez, pueden cambiar la composición química del agua subterránea a través de la incorporación de algunos elementos o especies químicas.

Como consecuencia de la creciente contaminación de los recursos hídricos, países como Canadá, Estados Unidos, Australia y los que componen la Unión Europea han incorporado en sus respectivas legislaciones programas para establecer el **Fondo Químico Natural (FQN)** de los cuerpos de aguas tanto superficiales como subterráneos. El FQN se define como el rango de concentraciones de un elemento o especie química, o de alguna sustancia presente en el agua que deriva de fuentes naturales, geológicas, biológicas o atmosféricas (Baseline, 2003). Conocer qué procesos naturales originan el FQN de las aguas subterráneas, así como sus posibles cambios espacio temporales y causas, es una herramienta fundamental para la gestión y planificación del uso del recurso hídrico que permite además detectar de forma temprana tendencias de deterioro de la calidad química del agua y contar con un valor de referencia en caso de tener que implementar programas de protección y de remediación (Manzano et al., 2003).



m. Rango de concentraciones de un elemento o especie química o de alguna sustancia presente en el agua que deriva de fuentes naturales, geológicas, biológicas o atmosféricas.



En la Argentina, hasta el momento no existen leyes equivalentes, pero en la literatura científica ya comienzan a encontrarse estudios relacionados a este tema.

Estudio del Fondo químico Natural del agua subterránea

Para identificar los principales procesos físicos y químicos que le confieren al agua subterránea su composición química, es necesario conocer, además de la composición química del agua subterránea y del agua de lluvia, las características del sedimento (fase sólida) y las actividades humanas que se desarrollan en el sector en estudio.

¿Cómo realizar un muestreo representativo de agua subterránea?

El muestreo de agua subterránea se inicia con la medición de la profundidad del agua (profundidad del nivel freático) mediante la utilización de una sonda eléctrica (**Figura 1**). Conociendo la profundidad del nivel freático y la cota topográfica del terreno de los puntos donde se toman las muestras de agua, es posible trazar el **mapa piezométrico**. Este mapa nos permite conocer la dirección y el sentido en el que se mueve el agua subterránea dentro del acuífero.



m. Permite conocer la dirección y el sentido en que se mueve el agua subterránea dentro del acuífero.



Figura N°1 | Medición de la profundidad del agua en un piezómetro, en un pozo de explotación, en una bomba sapo y en un molino.

¿Qué es un acuífero?

Es una formación geológica capaz de almacenar y transmitir al agua. Una vez medida la profundidad del nivel freático se procede a purgar las perforaciones. En el caso que se estén muestreando piezómetros o pozos, estos se purgan mediante la utilización de una bomba sumergible, mientras que las bombas sapos y los molinos se purgan haciéndolos funcionar por unos minutos (**Figura 2**).



Figura N°2 | Purgado de un piezómetros, de una bomba sapo y de un molino.

Un **acuífero** es una **formación geológica** capaz de acumular y transmitir al agua.

Luego de purgar la perforación se procede a medir in situ y mediante la utilización de una sonda multiparámetrica los parámetros físico-químicos temperatura (T°), pH y conductividad eléctrica (CE) (**Figura 3**). La sonda multiparamétrica se conecta a una celda de flujo continuo para evitar que el agua subterránea entre en contacto con la atmósfera.



Figura N°3 | Medición in situ de los parámetros físico-químicos.

Es muy importante que el agua que se muestrea sea representativa del acuífero. Una vez estabilizados estos parámetros se mide la alcalinidad del agua in situ y se procede a la toma de la muestra (**Figura 4**).

Luego de su uso, todo el instrumental se enjuaga con abundante agua destilada. Las muestras son almacenadas en botellas de PVC, son preservadas del sol directo y transportadas al laboratorio químico. Toda la información del muestreo se registra en una planilla de campo.



Figura N°4 | Medición in situ de la alcalinidad de la muestra.

El muestreo del agua de lluvia consiste en la instalación en **varios puntos** (a distintas cotas topográficas) de muestreadores que recolecten la precipitación del mes.



Muestreadores de agua de lluvia.

¿Cómo se realiza un muestreo de agua de lluvia?

Las muestras se recolectan mensualmente (**Figura 5**) y son trasvasadas a bidones mayores los cuales se encuentran guardados en el instituto. Cada muestreador tiene asociado un bidón. En estos bidones se almacena el agua y una vez que se recolectaron 6 meses de muestra se toma una muestra integrada plurimensual (una por bidón) y a estas muestras se les realizan análisis físico-químicos e isotópicos (isótopos estables ^{18}O y ^2H). También es muy importante conocer cuánto ha llovido cada mes. La cantidad de lluvias se mide utilizando pluviómetros.



Figura N°5 | Recolección de muestras de agua de lluvia.

Caracterización de la fase sólida (sedimentos)

En zonas de llanura la caracterización de la fase sólida se realiza principalmente a través de la realización de perforaciones (**Figura 6**). El material recuperado en las perforaciones es clasificado en campo y luego en el laboratorio de suelos. Además se les realizan distintos análisis como ser, textural (para conocer el tamaño del grano), mineralógico (para identificar los minerales que componen los sedimentos), de contenido de carbonatos, entre otros.



Figura N°6 | Perforación de pozo y recuperación del material acuífero.

Planteo del modelo hidrogeoquímico conceptual

Un modelo hidrogeoquímico conceptual es una versión simplificada de la realidad que permite entender el funcionamiento de un acuífero. Una vez que se conoce la composición química del agua subterránea y del agua de lluvia, la piezometría, las características de la fase sólida y las actividades humanas que se desarrollan en el sector en estudio, estamos en condiciones de integrar toda esta información y de plantear nuestro modelo hidrogeoquímico conceptual. En este modelo se plantean a modo de hipótesis los procesos físicos-químicos que controlan la composición química del agua subterránea, el cual en un paso posterior deberá ser validado mediante modelación hidrogeoquímica con el objetivo de verificar que la ocurrencia de los procesos propuestos es posible desde el punto de vista termodinámico.

En la **Tabla 1** se presenta el modelo hidrogeoquímico conceptual propuesto para explicar la composición química del agua subterránea en la cuenca del Arroyo del Azul.

| FUENTES DE SOLUTOS | PROCESOS |
|----------------------------|---|
| 1. Aporte atmosférico | 1. Concentración del agua de lluvia antes y/o durante la infiltración debido a evapotranspiración. |
| 2. CO ₂ edáfico | 2. Disolución de CO ₂ durante la infiltración. |
| 3. Carbonatos sólidos | 3. Disolución de calcita y dolomita. |
| 4. Silicatos | 4. Disolución de silicatos de Mg (piroxenos, hornblenda, biotita). Disolución incongruente de feldespato potásico. Disolución incongruente de anortita. Disolución incongruente de albita. |
| 5. Arcillas | 5. Intercambio catiónico de ablandamiento |
| 6. Actividad agrícola | 6. Incorporación de NO ₃ ⁻ y K ⁺ |
| 7. Actividad agropecuaria | 7. Incorporación de NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , Cl ⁻ |
| 8. Actividad doméstica | 8. Contaminación variada (Cl ⁻ , Na ⁺ , SO ₄ ²⁻ , ...) |

Tabla N°1 | Modelo hidrogeoquímico conceptual.

A modo de cierre

Establecer el FQN del acuífero, consiste en identificar y cuantificar qué procesos físicos y químicos naturales controlan la composición química del agua subterránea. Si la escala de trabajo es regional, si las muestras de agua proceden de distintos sectores y profundidades del acuífero y si el muestreo puede repetirse en distintas estaciones climáticas, podremos además conocer cómo varía el FQN tanto en el espacio como en el tiempo.

Conocer los valores del límite superior del FQN del acuífero permite detectar de forma temprana tendencias de deterioro de la calidad química del agua y contar con un valor de referencia en caso de tener que implementar programas de protección y de remediación. Por lo que ésta es una herramienta fundamental para la gestión y planificación del uso del recurso hídrico.

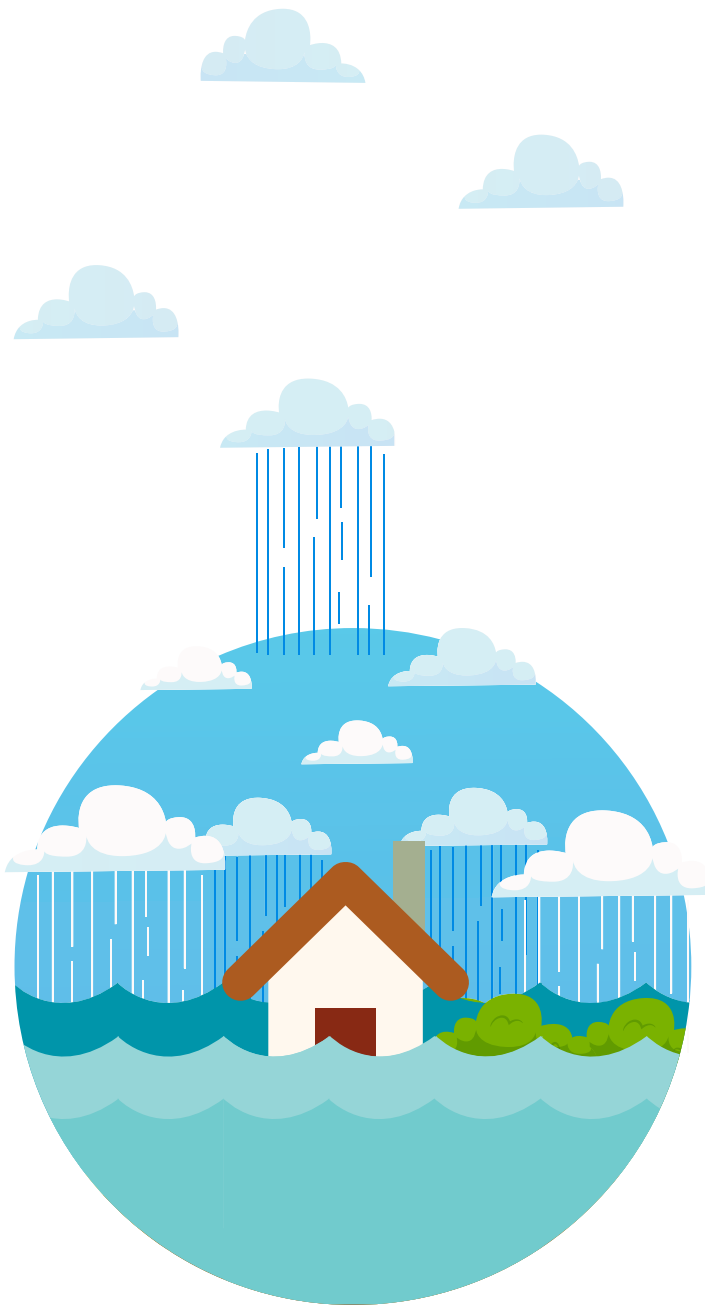
La línea de investigación de la autora responsable de este material es el estudio del FQN de los acuíferos Pampeano y Puelches, siendo sus principales zonas de estudios la cuenca del Arroyo del Azul (*Zabala, 2013; Manzano et al., 2015; Zabala et al., 2015; Zabala et al., 2016ab*) y la cuenca del río Matanza-Riachuelo (*Manzano y Zabala, 2012; Zabala et al., 2016b*).

CAPÍTULO 7

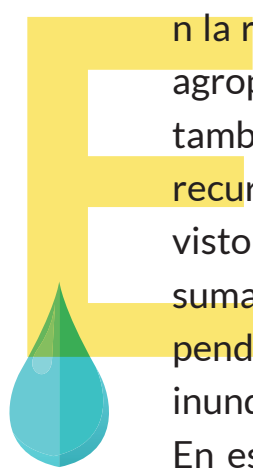
Sistema de gestión de información hidrológica y red de alerta de inundaciones, implementación y operación

GEORGINA CAZENAVE

cazenave@ihlla.org.ar




Optimizar los sistemas de alerta ante inundaciones en el partido de Azul y en toda la cuenca es una **innegable necesidad**. ¿Qué es posible hacer desde los diferentes organismos para contribuir a que fenómenos naturales como las inundaciones afecten lo menos posible a una región?; ¿Con qué frecuencia se detectan amenazas hídricas y se gestionan los medios para prevenir catástrofes en la ciudad de Azul?



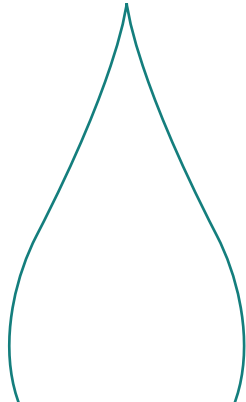
En la región central de la provincia de Buenos Aires la producción agropecuaria es la principal fuente de actividad e ingresos, y es también la principal demandante de una mejor gestión de los recursos hídricos. Históricamente la Llanura bonaerense se ha visto sometida a una alternancia de períodos secos y lluviosos. Se suma a esta alternancia la particularidad del relieve de Llanura con pendientes muy suaves a nulas que generan escurrimiento laminar inundando durante largos períodos grandes extensiones de tierra. En este marco, las componentes verticales del ciclo hidrológico adquieren mayor relevancia y es necesario cuantificarlas.

En las localidades que sufren inundaciones recurrentes una herramienta utilizada son los modelos numéricos de predicción de crecidas. Pero además de las limitaciones propias de los modelos, se encuentran inconvenientes para obtener datos de precipitación confiables y con resoluciones espacio-temporales para realizar un pronóstico adecuado.

La ciudad de Azul (provincia de Buenos Aires) cuenta con un modelo de predicción hidrológica, calibrado y validado a partir de datos tomados de la red de monitoreo tradicional instalada por el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), que permite realizar el pronóstico a partir de datos horarios de lluvia.



Desde el año 2005, la ciudad tiene una red de alerta de inundaciones que permite pronósticos de crecidas más ajustados. El IHLLA trabaja en diferentes líneas de investigación que propenden al conocimiento y desarrollo de metodologías que acompañen las actividades relacionadas con la dinámica climática regional a través del conocimiento del movimiento del agua en el sistema suelo-agua-atmósfera.



Red de alerta de inundaciones

Una red de alerta de inundaciones consiste en un conjunto de estaciones hidrometeorológicas que midan la precipitación y los niveles en los arroyos. Las estaciones deben estar comunicadas a una central que recibe la información a tiempo real y son representativas de un sector de la cuenca donde se encuentran instaladas.

El diseño de la red de alerta comprende la selección de los lugares de emplazamiento estratégico de cada una de las estaciones hidrometeorológicas teniendo en cuenta la necesidad de información y cobertura de la misma, así como la definición de los tipos de sensores a instalar en cada sitio. Para ello fue preciso analizar toda la información generada por el IHLLA y el municipio durante los eventos que provocaron inundaciones, como el análisis de los datos de la red básica hidrológica existente. Las estaciones hidrometeorológicas miden: niveles de arroyo, precipitación, velocidad y dirección de viento, temperatura y humedad relativa del aire y presión atmosférica.

El tipo de comunicación telemétrica de las estaciones con la central de operaciones que recibe la información debe tener en cuenta las características geográficas de la zona y garantizar la actualización de los datos bajo cualquier escenario.

La red de alerta posee umbrales de lluvia y de niveles de los arroyos, que conjuntamente con el equipo de técnicos encargados de llevar adelante los trabajos de pronóstico de crecida, personal para tareas de campo y los de defensa civil, conforman el sistema de alerta temprana de inundaciones.

Todo diseño de una red de observación, en este caso con la complejidad de que debe responder a las alertas de extremos de exceso hídricos, debe ser concebido como una primera aproximación, que con el tiempo es probable que deba ser parcialmente replanteada o ampliada.

El sistema de estaciones automáticas de adquisición de datos hidrometeorológicos están interconectadas entre sí y a dos Centrales de Control (una en el IHLLA y otra en el municipio de la ciudad de Azul) a través de un sistema de radio UHF de comprobada eficiencia y seguridad. Se conforma una red modular, absolutamente flexible, autónoma y expandible en el tiempo, según los requerimientos de nuevas áreas de investigación y/o monitoreo. La red de estaciones hidrometeorológicas implementada en la cuenca del Azul fue provista por la empresa CAE (www.cae.it), quien se encargó además de la instalación de la misma.

En el diseño de este tipo de redes de alerta se tiene en cuenta su autonomía, o en otras palabras, su independencia de servicios o requerimientos no controlados y que pueden llegar a colapsar o cortar en situaciones de crisis, como electricidad, telefonía, etc. Para ser más preciso, la transferencia de información o telemetría puede realizarse por otros medios diferentes: teléfono, telefonía móvil y satélite, pero todas ellas, no aseguran que el sistema pueda trabajar de forma completamente autónoma ni garantiza la transmisión. La telefonía puede cortarse por la caída de algún poste; la telefonía celular es la primera en colapsar en situaciones de crisis por el gran uso y la satelital es muy costosa. Por ello la telemetría con los equipos de radio resulta muy confiable, en especial en las épocas de tormentas eléctricas.

La información de las estaciones llega al servidor de la Central de Control y se guarda en una base de datos segura y actualizada a tiempo real, que permite al Operador/Administrador de la cuenca:

- Tener una completa gestión de datos, monitoreo permanente, control y generación de un sistema de alertas automáticos.
- Obtener y mantener registros históricos de datos hidrometeorológicos.
- Desarrollar estudios y aplicaciones científicas, modelaciones e investigación hidrológica (modelos de pronóstico de crecidas,

modelos conceptuales del ciclo hidrológico en la cuenca, variaciones espaciales y temporales de las variables hidrometeorológicas, etc.). Con el monitoreo a tiempo real de las variables hidrometeorológicas se establecen y configuran cuadros de alarmas y emisión automática de boletines de alertas, personalizados, vía teléfono celular (GSM) o telefonía fija, a través de mensajes de voz, correo electrónico o la activación de cualquier dispositivo de alarma convencional, y permiten al personal a cargo iniciar los protocolos de seguimiento y pronóstico de crecidas.

Las personas que recibirán las alertas del sistema de control de la red, que es el que realiza los llamados telefónicos correspondientes, pertenecen al Instituto de Hidrología de Llanuras o a la Municipalidad de Azul (Dirección de Hidráulica y Vialidad Rural), y se encuentran en contacto y con acceso al sistema de monitoreo telemétrico. En este sistema es fundamental, en situaciones de crisis, definir las jerarquías y responsabilidades. Para ello se ha dejado claramente especificado que la responsabilidad del control en los momentos de crisis lo asume totalmente la Dirección de Hidráulica y Vialidad Rural, siendo el IHLLA el órgano de colaboración y apoyo técnico. La ubicación de las seis estaciones y las dos centrales se observa en la **Figura 1**, donde también se muestran las estaciones limnimétricas que el IHLLA tiene dentro de su red de monitoreo. Las estaciones limnimétricas tienen equipos de registro automático (sin telemetría) de las variaciones de altura del arroyo en secciones de control de los principales afluentes del Arroyo del Azul.

Cada estación de la red de alerta de inundaciones (**Figura 2**) consta de una antena direccional VHF que transmite la información recolectada a la antena repetidora ubicada en Cerro del Águila. Esta repetidora es la que transmite la información a cada una de las dos Centrales de Control que consultan a la repetidora y ésta, a su vez, a las estaciones.



Figura N°1 | Estaciones telemétricas y limnimétricas de la red de monitoreo del IHLLA.



Figura N°2 | Estación de la red de alerta del IHLLA.

Tan importante como la instalación del sistema de alerta de inundaciones es el programa de mantenimiento de las estaciones y central de control. Se deben revisar los equipos en campo y en gabinete para asegurar su buen funcionamiento y operatividad en momentos de crisis. Las tareas de campo son llevadas adelante por el IHLLA, con asesoramiento de la empresa, que en forma remota también controla la operatividad de central de control y las comunicaciones. Hay varios niveles de mantenimiento que son: de rutina (mensuales), de control (trimestral) y correctivo (de emergencia).

El mantenimiento de rutinas se refiere a las actividades de conservación de las estaciones hidrometeorológicas, de acuerdo a las normas y recomendaciones del fabricante de los equipos CAE, según un plan de inspecciones (visitas), asistencia remota y verificaciones, previamente programadas. El mantenimiento de control se refiere a las actividades de mantenimiento preventivo de toda la red (estaciones y centros de control) que, al igual que el mantenimiento de control, están pactadas por el fabricante. El mantenimiento correctivo es aquel que se realiza ante fallas de sensores de la estación, la repetidora, central de control o en la comunicación y se procede a la brevedad de notar la anomalía, con la asistencia de la empresa proveedora.

Las estaciones limnimétricas tienen equipos de registro automático de las variaciones de altura del arroyo en secciones de control de los principales afluentes.

Sistema de gestión de la información hidrológica

El IHLLA tiene implementado, desde el 2002, un sistema soporte de gestión de la información hidrológica denominado Base de Datos Hidrológicos BDH (www.azul.bdh.org.ar) que permite almacenar toda la información de la cuenca hidrográfica y ser consultada o ampliada de forma remota por medio de Internet, como una herramienta fundamental para uso de todos los organismos o personas involucradas en el estudio de los recursos hídricos o en la gestión sustentable del mismo.

Es importante la actualización permanente de la base de datos web del Instituto de Hidrología de Llanuras, en la cual contar con boletines meteorológicos y registro de los datos de cada sensor en cada estación. En los boletines meteorológicos se muestran los datos actualizados y la evolución de las últimas 48 horas de cada una de las variables meteorológicas registradas. Los datos anteriores se guardan como registros históricos en cada estación.

Por otro lado se desarrolló una ventana de visualización en la web de datos hidrológicos del IHLLA (**Figura 3**), donde se muestra la información que se recibe de la red telemétrica de alerta de inundaciones, colocando de esta forma la información climática de la cuenca a disposición de toda la comunidad. Actualmente se ha implementado la carga automática de la información de la red cada 15 minutos. Es decir, estructuralmente la herramienta almacena temporalmente la información en tiempo real de la red para posteriormente cargarla en los puntos de medidas.

La BDH envía los boletines meteorológicos por e-mail o telefonía celular a los usuarios que lo soliciten, en los que se describen todos los parámetros medidos en las distintas estaciones telemétricas.

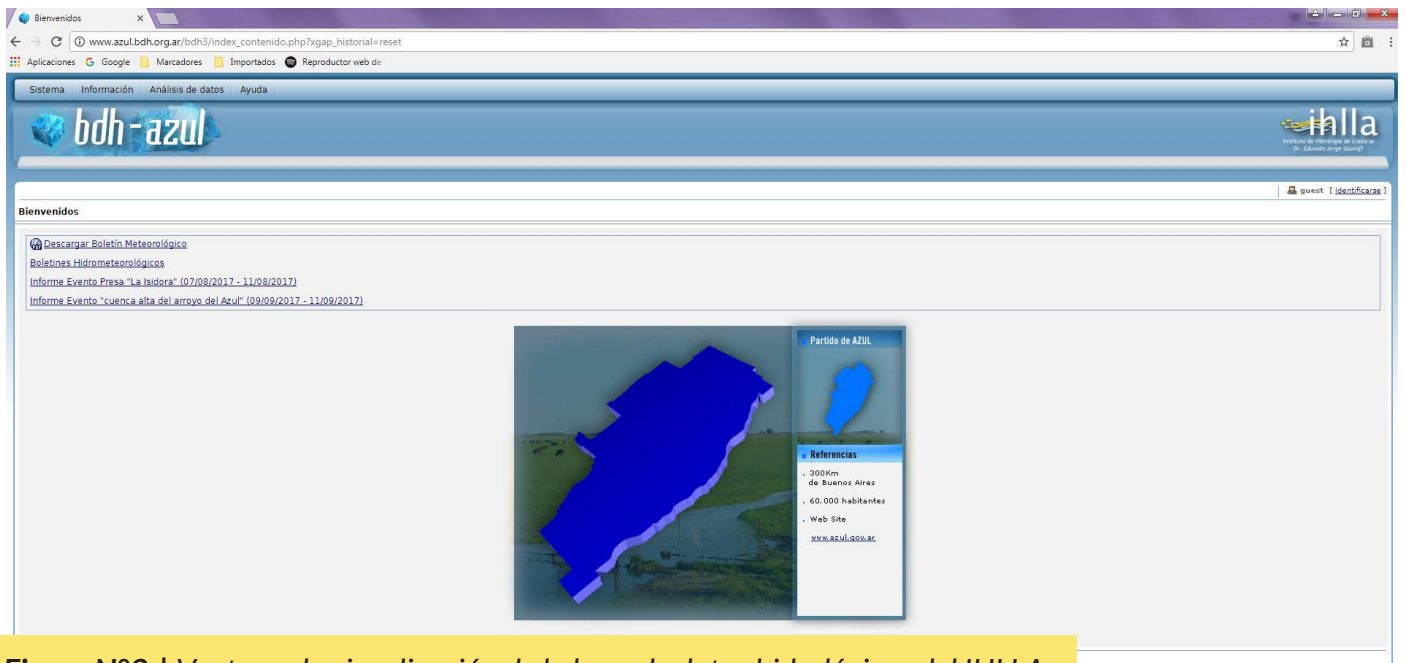


Figura N°3 | Ventana de visualización de la base de datos hidrológicas del IHLLA.

La **BDH del IHLLA** envía boletines meteorológicos por e-mail y telefonía celular a los usuarios que lo soliciten. En ellos se describen todos los **parámetros medidos** en las estaciones telemétricas.

Consideraciones finales

El sistema de alerta de inundaciones implementado permite monitorear en tiempo real las variables hidrometeorológicas, establecer y configurar cuadros de alarmas y emitir en forma automática boletines de alertas, personalizados, vía teléfono celular (GSM) o telefonía fija, a través de mensajes de voz, correo electrónico o la activación de cualquier dispositivo de alarma convencional. Se tienen entonces todos los elementos necesarios para llevar adelante las tareas relacionadas con un plan de contingencia contra inundaciones tanto a nivel de pronóstico de crecidas como protección civil.

La red telemétrica y la información disponible en la BDH son parte de las herramientas tecnológicas que el IHLLA ha desarrollado como soporte a los responsables regionales de la gestión de los recursos hídricos y a los productores rurales.

Tener mayor información espacio-temporal de las variables hidrometeorológicas permite mejorar y optimizar los modelos matemáticos de pronóstico para alerta de inundaciones y la evaluación continua y gestión de los recursos hídricos disponibles en la cuenca. Además de favorecer la actividad productiva de la región que cuenta con una mejor cuantificación y distribución de su insumo elemental: el agua.

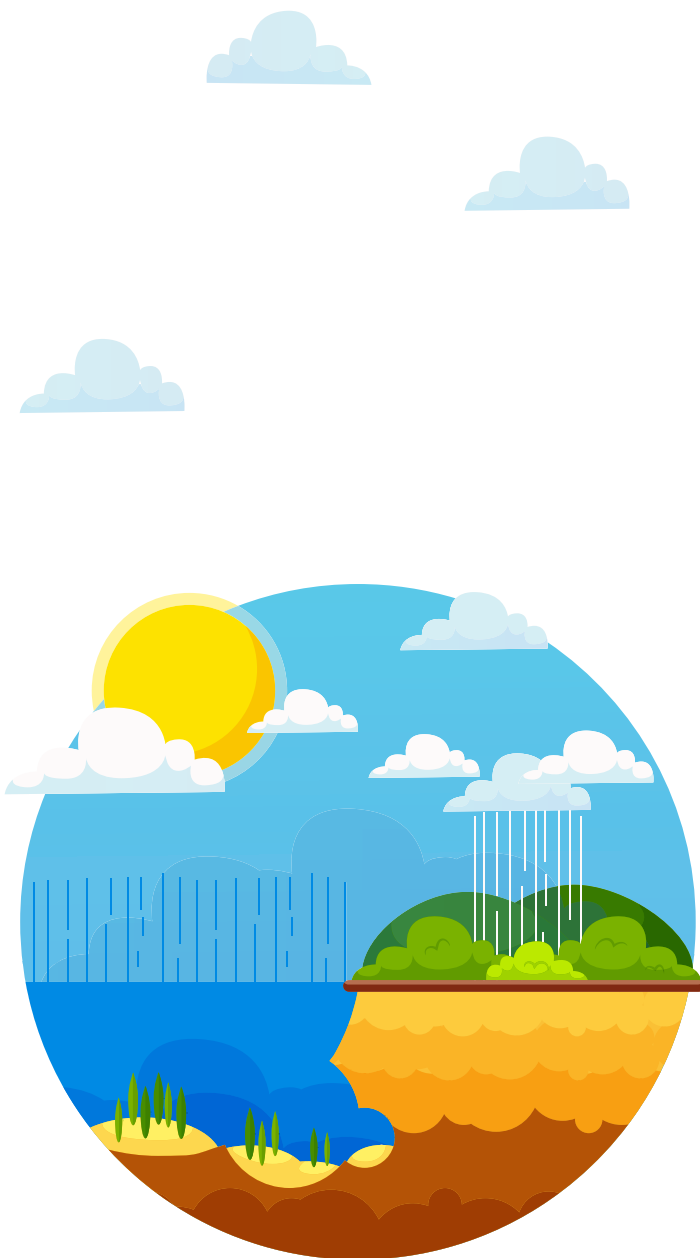
CAPÍTULO

8

La teledetección
aplicada a estudios
hidrológicos
y del sistema
suelo-agua-planta

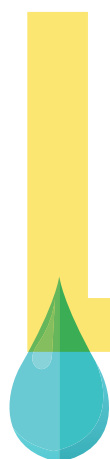
MAURO E. HOLZMAN

m.holzman@ihlla.org.ar



La evapotranspiración es el movimiento vertical de agua hacia la atmósfera a través del suelo (evaporación) y de la vegetación (transpiración).

La evapotranspiración es un término fundamental del ciclo hidrológico en llanuras, dado el predominio de movimientos verticales del agua debido a las escasas pendientes del terreno.

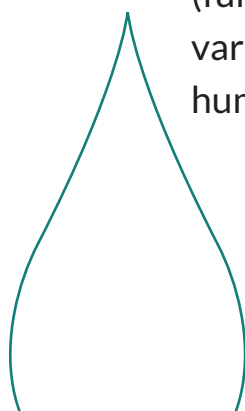


Los métodos tradicionales de cálculo de la evapotranspiración se basan en el uso de datos recolectados por estaciones de terreno y toman en cuenta diversos condicionantes que varían espacialmente, como pueden ser: disponibilidad de agua en el suelo, tipos de vegetación, tipos de suelo, entre otros. Sin embargo, frecuentemente estos métodos se ven limitados por la disponibilidad de datos debido a una pobre cobertura espacial de las estaciones de terreno. En las últimas décadas se han desarrollado diversos métodos de estimación de la evapotranspiración y otras variables hidrológicas, basados en la teledetección (Papadavi, 2013). La ventaja principal de la teledetección es la incorporación de la dimensión espacial de procesos que ocurren en el sistema suelo-planta, con la posibilidad de integrarlos temporalmente según el periodo de revisita del satélite (Figura 1). Así, la teledetección se presenta como un conjunto de técnicas que complementan los estudios tradicionales basados en estaciones de terreno.



f. Consiste en la obtención de información de objetos de la superficie terrestre desde sensores a bordo de satélites que miden la energía electromagnética proveniente de estos objetos.

La **teledetección** consiste en la observación y obtención de información de objetos de la superficie terrestre desde sensores a bordo de satélites, los cuales miden la energía electromagnética proveniente de dichos objetos (Sobrino, 2000). Como complemento, los datos obtenidos en terreno son utilizados fundamentalmente para validar o ajustar las estimaciones realizadas desde el satélite. Diversos métodos de estimación de la disponibilidad de agua se basan en la información captada por los satélites en el sector reflectivo (espectro solar) y emisivo (espectro térmico o infrarrojo térmico) del espectro electromagnético. Es decir, que los sensores a bordo de los satélites reciben la energía reflejada y emitida (función de la temperatura del cuerpo) por la superficie, la cual varía según las características de esos objetos (ej.: estado de humedad, suelo desnudo, vegetación) (Chuvienco, 2008).



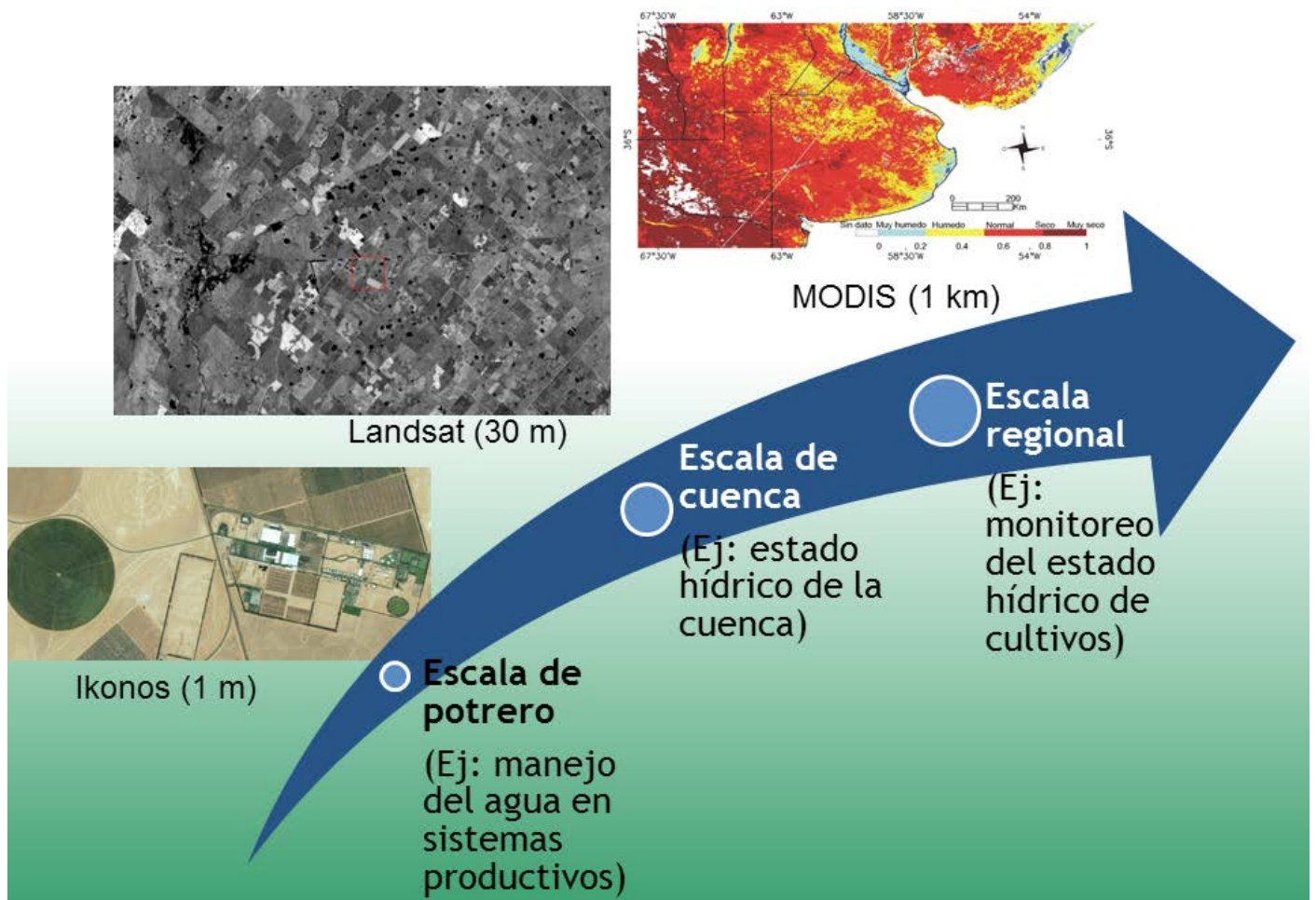


Figura N°1 | Imágenes satelitales con distinta resolución y algunas de sus aplicaciones hidrológicas.

Los cambios en el comportamiento reflectivo de las cubiertas vegetales, más específicamente en el infrarrojo cercano (IRc, 0.74-1 μm) y en el visible, son indicadores de su condición (**Figura 2**). Esto ha sido la base para el desarrollo de índices de vegetación que muestran la vigorosidad y capacidad fotosintética de la vegetación, como el clásico índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index o NDVI) (Rouse, Hass, Schell, & Deering, 1974):

$$NDVI = \frac{\rho_{IRc} - \rho_{rojo}}{\rho_{IRc} + \rho_{rojo}}$$

donde ρ_{IRc} y ρ_{rojo} son las reflectividades de superficie en las bandas del infrarrojo cercano y rojo, respectivamente. Dicho índice toma valores cercanos a -1 para agua y suelos muy húmedos y valores próximos a 1 para máxima cobertura vegetal en condiciones de alta fotosíntesis.

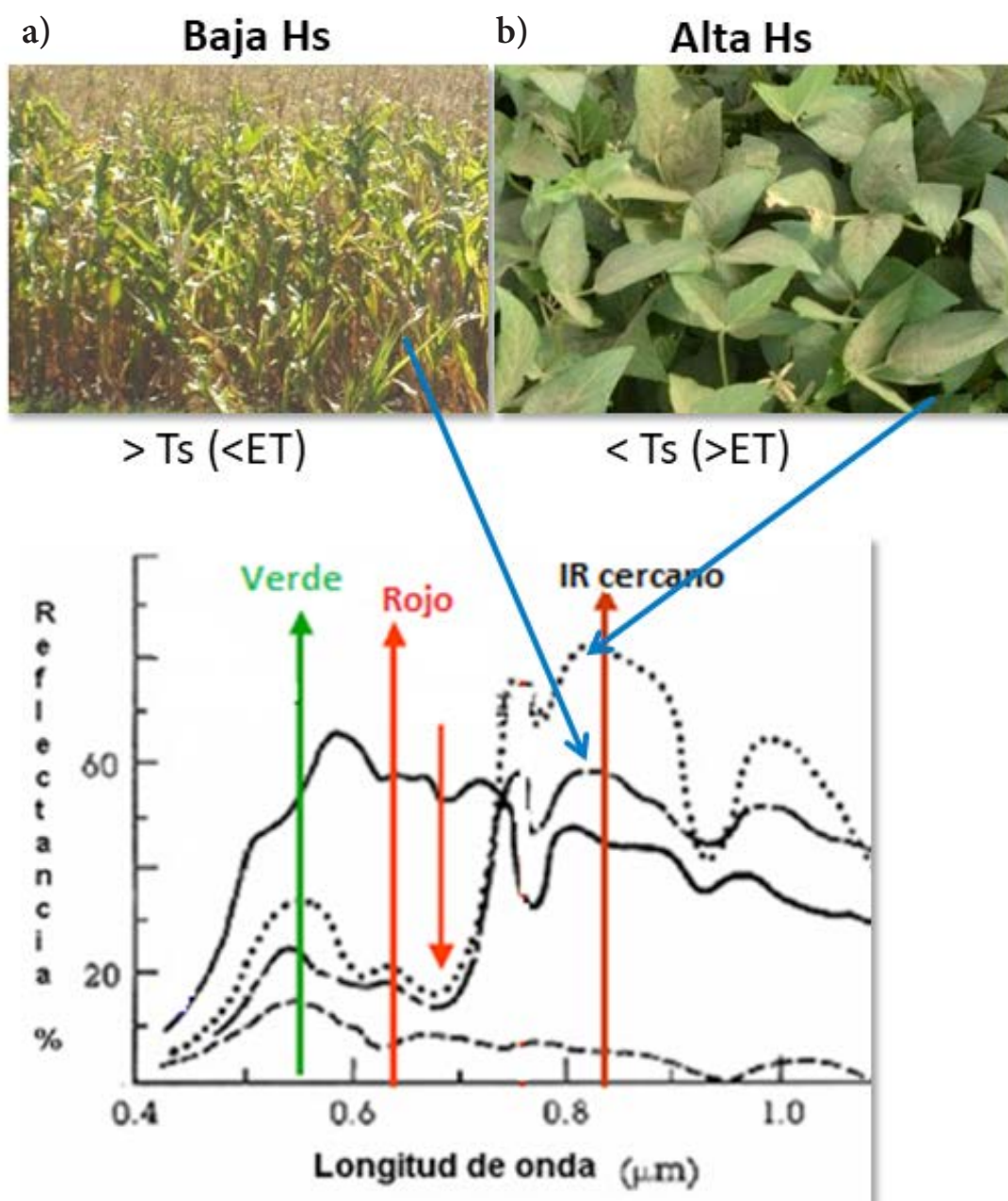
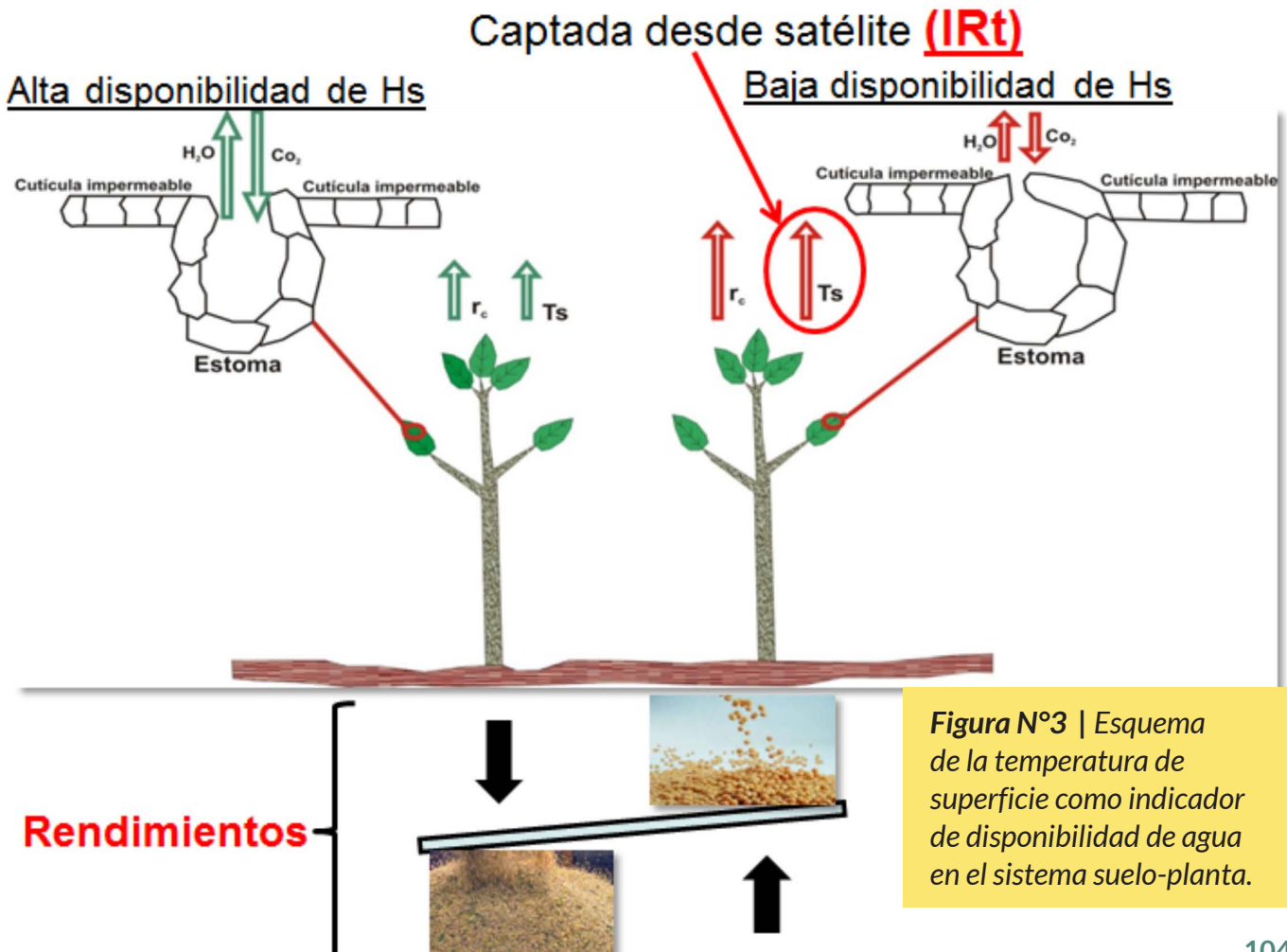


Figura N°2 | Esquema de la relación entre el comportamiento reflectivo-térmico de cubiertas de cultivos y evapotranspiración (ET), según la disponibilidad de agua en el suelo.

En cuanto al infrarrojo térmico del espectro electromagnético (IRT, 8 a 14 μm), un cuerpo emite más energía cuanto mayor es su temperatura, lo que ha permitido la utilización de la temperatura de superficie (T_s) en el estudio de procesos de la superficie terrestre, como por ejemplo, los cambios en la humedad del suelo, la humedad en la vegetación y la tasa de evapotranspiración (Rivas *et al.*, 2011; Rivas y Caselles, 2004). Así, en condiciones de escasa humedad en el suelo (H_s), además de reducciones en los índices de vegetación debido a afectación en el aparato fotosintético, se observan aumentos en la temperatura de superficie en una etapa más temprana de la sequía, ya que el cultivo regula la apertura de sus estomas y por lo tanto ejerce mayor resistencia (r_c) a la pérdida de agua hacia la atmósfera (Figuras 2b y 3a).

a)

b)



Ese aumento en la temperatura de superficie es indicador de disminución de la evapotranspiración y es esperable una limitación en la productividad de la vegetación. En cambio, en condiciones de buena disponibilidad de agua (alta Hs), los valores de índices de vegetación serían altos y la temperatura, baja, indicando altas tasas de evapotranspiración (**Figura 2a y 3b**).

¿Cómo y a quiénes beneficia este conocimiento?

El grupo de teledetección del IHLLA (teledeteccion.wixsite.com/gtihlla) ha desarrollado diversos estudios para el cálculo de la evapotranspiración real o actual de cultivos dominantes en la región pampeana, a partir de modelos de distinta complejidad que utilizan datos satelitales, datos de estaciones de balance de energía en terreno y de sensores de humedad del suelo (**Figura 4**). Esto permite, por ejemplo, calcular espacialmente el agua utilizada por los cultivos para su producción de granos y materia seca, el agua transferida a la atmósfera y por lo tanto la dinámica de cuencas durante eventos de exceso hídrico.

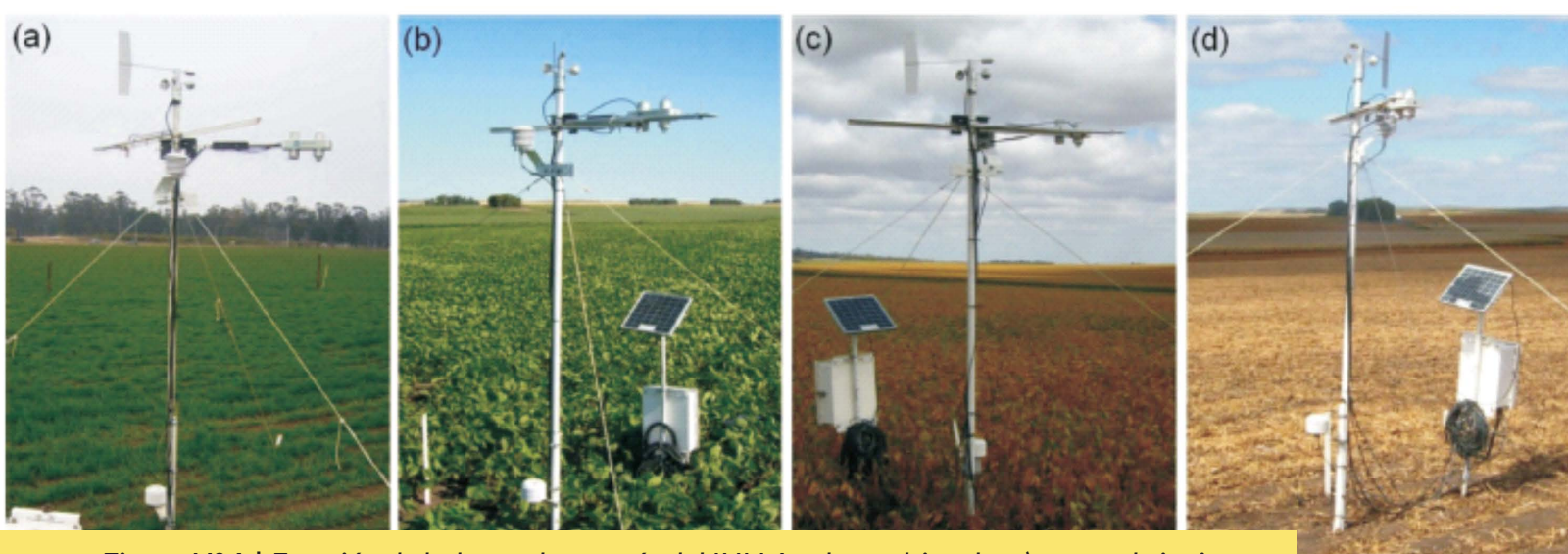


Figura N°4 | Estación de balance de energía del IHLLA sobre cultivo de: a) avena de invierno, b) soja de primera, c) soja de segunda, d) rastrojo de soja.

Cabe destacar que en sistemas productivos de secano (es decir, sin riego) la disponibilidad de agua es la mayor limitante regional para el crecimiento y producción de los cultivos. Los estudios de teledetección comentados han posibilitado, entre otros avances, el desarrollo de índices de estrés hídrico en cultivos, que permiten la estimación de disponibilidad de agua en el suelo y brindan información del estado de los cultivos. Estos índices han sido testeados para la región pampeana (*Holzman et al., 2014 y 2018*) y permiten evaluar espacialmente la intensidad de sequías. Mapas de estos índices son producidos actualmente por la Oficina de Riesgo Agropecuario de Nación para los meses claves para los cultivos (octubre-marzo) (ver <http://www.ora.gob.ar/tvdi.php>). Dichos mapas son una herramienta tanto para la gestión productiva (ej.: productividad de los cultivos, evaluación de riesgos productivos y posibles subsidios a otorgar) como para la gestión de cuencas (ej.: riesgo de inundaciones, excesos hídricos en superficie y en el suelo). La **Figura 5** muestra dos situaciones contrastantes de condiciones hídricas de la región pampeana a partir de índices de estrés hídrico. Tanto en el caso de la campaña 2002-2003 como 2007-2008, se registraron importantes pérdidas en los rendimientos de cultivos por excesos y déficits hídricos, respectivamente (*Holzman et al., 2014*).

El grupo de teledetección del IHLLA ha desarrollado diversos estudios para el cálculo de la evapotranspiración de cultivos en la región pampeana.

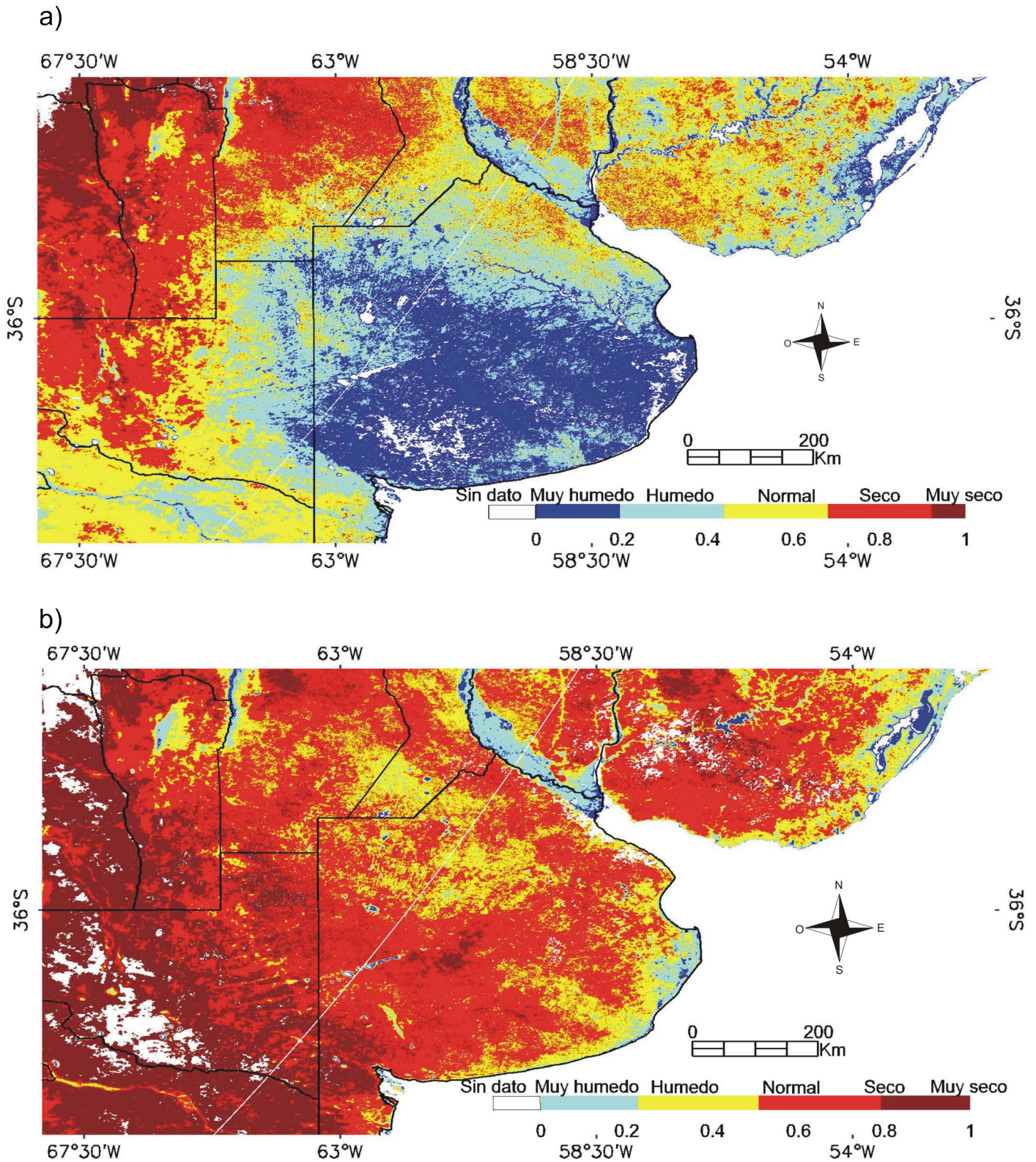


Figura N°5 | Mapas de stress hídrico de la región pampeana correspondientes a: a) octubre 2002 y b) diciembre 2007.

ANEXO



Bibliografía citada

Bibliografía

- Ares, M.G. 2014. Lluvia, escurrimiento y producción de sedimentos en una microcuenca agrícola del Sistema de Tandilia. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Ares, M.G., J. González Castelain, C. Chagas, y M. Varni, M. 2016. Pérdidas de fósforo en una microcuenca agrícola de la Provincia de Buenos Aires. Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, en soporte digital.
- Baseline, 2003. Natural baseline quality in European aquifers: A basis for aquifer management. Disponible en: <http://www.bgs.ac.uk/research/groundwater/europeanBaseline/home.html> (Accedido 1 abril 2015).
- Batista, W.B. y León, R.J.C. 1992. Asociación entre comunidades vegetales y algunas propiedades de los suelos en el centro de la Depresión del Salado. *Ecología Austral*, 2: 47-55.
- Batista, W.B.; León, R.J.C. y Perelman, S.B. 1988. Las comunidades vegetales de un pastizal natural de la Región de Laprida, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Phytocoenologia*, 16: 465-480.
- Batista, W.B.; Taboada, M.A.; Lavado, R.S.; Perelman, S.B. y León, R.J.C. 2005. Asociación entre comunidades vegetales y suelos en el pastizal de la Pampa Deprimida. En: Oesterheld, M; Aguiar, M.R.; Ghera, C.M. y Paruelo, J.M. (comp.). *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas: un homenaje a Rolando J.C. León*. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. Buenos Aires.

- Branco, Samuel Murgel. 1984. Limnología sanitaria; estudios de la polución de aguas continentales. Monografía No.28, serie Biología. OEA. Washington, D.C. 120 p.
- Burkart, S.E.; León, R.J.C. & Movia, C.P. 1990. Inventario fitosociológico del pastizal de la Depresión del Salado (Prov. Bs. As.) en un área representativa de sus principales ambientes. *Darwiniana*, 30: 27-69.
- Cabrera, A.L. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 14: 1-42.
- Casas, R. 2015. La erosión del suelo en la Argentina. En: El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Casas, R. y Albarracín, F.A. (Compiladores). Tomo 2, Parte 7: Erosión y degradación de suelos, 433-452.
- Christofolletti, A. 1998. Perspectivas para el análisis de la complejidad y la autoorganización en sistemas geomorfológicos. En: Matteucci, S.D. y Buzai, G.D. (eds.), *Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial*. Eudeba. Buenos Aires.
- Chuvieco, E. 2008. *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. 3º edición actualizada. Edit. Ariel, España.
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero Gutiérrez, A., González, J., Reynero, M., Diez, A., Bergesio L., Cantero J.J., Nuñez, C., Amuchástegui, A. y Degioanni, A. 2012. *Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo*. UniRío Editora, Río Cuarto, Argentina.
- Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea (CDCIHS). 2009. *Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea*. FCIHS, Barcelona.

- Conti, M., 2000. Principios de Edafología con énfasis en suelos argentinos. 2da. Edición. Editorial Facultad de Agronomía. Fac. de Agronomía. UBA.
- Crawley, M.J. 1996. The structure of plant communities. En: Crawley, M.J. (ed), Plant ecology. Blackwell Science, Oxford.
- Custodio, E. y Llamas, R., 1983. Hidrología subterránea. 2ª Edición. Barcelona, España.
- Dangavs, N.V. 2005. Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires. En: de Barrio, R.E.; Etcheverry, R.O.; Caballé, M.F. y Llambías, E. (eds.). Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata.
- Decreto Reglamentario n° 831/93 de la Ley Nacional 24.051. Presidencia de la Nación Argentina.
- FAO. 1967. La erosión del suelo por el agua. Colección FAO Fomento de Tierras y Aguas. Roma, Italia.
- Farina, A. 2006. Principles and methods in landscape ecology. Toward a Science of Landscape. Springer. The Netherlands.
- Forman, R.T.T. & Godron, M. 1986. Landscape Ecology. Wiley & Sons, New York.
- Forman, R.T.T. 1995. Land mosaics. The ecology of landscapes and regions. Cambridge Academic Press, Cambridge, UK.
- Green, B.H.; Simmons, E.A. & Woltjer, I. 1996. Landscape conservation. Some steps towards developing a new conservation

dimension. A draft report of the IUCN-CESP landscape Conservation Working Group. Department of Agriculture, Horticulture and Environment, Wye College, Ashford, Kent, UK.

- Holzman, M. E., Rivas, R., y& Piccolo, M. C. 2014. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28: 181-192.
- Holzman, M.E., Carmona, F., Rivas, R., Niclòs, R., 2018. Early assessment of crop yield from remotely sensed water stress and solar radiation data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 145 (Part B): 297-308.
- Hudson, N. 1982. *Conservación del suelo*. Editorial Reverté, Barcelona, España.
- Hurtado, M.A., Moscatelli, G.N. y Godagnone, R.E. 2005. Los suelos de la provincia de Buenos Aires. En: de Barrio, R.E.; Etcheverry, R.O.; Caballé, M.F. y Llambías, E. (eds.). *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*. La Plata.
- Imbellone, P.A., Giménez, J.E., Panigatti, J.L. 2010. *Suelos de la Región Pampeana: Procesos de formación*. Ed. INTA. Buenos Aires.
- INTA, 1989. *Mapa de Suelos de la provincia de Buenos Aires, Escala 1:500.000*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires.
- INTA, 1990. *Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000 y 1:1.000.000*. CIRN. Instituto de Evaluación de Tierras. Buenos Aires. Tomo I y Tomo II.

- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- León, R.J.C.; Rusch, G.M. & Oesterheld, M. 1984. Pastizales pampeanos - impacto agropecuario. *Phytocoenologia*, 12: 201-218.
- Ley Nacional 24.051. Residuos Peligrosos. Sancionada en 1991. Presidencia de la Nación Argentina.
- Manzano, M., Armengol Vall, S., Zabala, M.E. 2015. Actualización de los valores de referencia de los componentes inorgánicos en el fondo químico natural del sistema acuífero de la cuenca del Río Matanza-Riachuelo y evaluación de los contenidos de componentes orgánicos y trazas. Proyecto de Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo. Informe final.
- Manzano, M., Custodio, E. y Nieto, P. 2003. El fondo natural de la calidad del agua subterránea. I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Rosario. 607-620.
- Manzano, M., Zabala, M.E. 2012. El fondo químico natural del sistema acuífero de la cuenca del río Matanza - Riachuelo. Proyecto de Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo. Informe final. pp. 222. http://www2.acumar.bdh.org.ar:8081/bdh3/publicacion_master.php?idobject=15107&retorno=publicacion_listado.php
- Matteucci, S.D. & Colma, A. 1998. El papel de la vegetación como indicadora del ambiente. En: Matteucci, S.D. y Buzai, G.D. (eds.), *Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial*. Eudeba. Buenos Aires.

- Matteucci, S.D. 1998 a. El análisis regional desde la ecología. En: Matteucci, S.D. y Buzai, G.D. (eds.), *Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial*. Eudeba. Buenos Aires.
- Matteucci, S.D. 1998 b. La cuestión del patrón y la escala en la ecología de paisajes y de la región. En: Matteucci, S.D. y G.D. Buzai. *Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial*. EUDEBA, Buenos Aires.
- Matteucci, S.D. 2012. Ecorregión Pampa. En: Morello, J.; Matteucci, S.D.; Rodríguez, A.F. y Silva, M. 2012. *Ecorregiones y Complejos Ecosistémicos Argentinos*. 1º Edición. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires.
- Mugni H., Paracampo A., Solis M., Fanelli S., Bonetto C. 2015. Acute toxicity of Roundup to the Non Target Organism *Hyalella curvispina*. Laboratory and field study. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 96 (7): 1054-1063.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2006. *Guías para la calidad del agua potable. Volumen 1: Recomendaciones*. 3º edición. CAPÍTULO 2 Panigatti, J.L., 2010. Argentina: 200 años, 200 suelos (No. P32 INTA 18474 y CD 67). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Buenos Aires (Argentina).
- Papadavi, G. D. 2013. Remote sensing for determining evapotranspiration and irrigation demand for annual crops. *Remote Sensing of Environment - Integrated Approaches*, 25-56.
- Perelman, S.B.; León, R.J.C. & Oesterheld, M. 2001. Cross-scale vegetation patterns of Flooding Pampa grasslands. *Journal of Ecology*, 89: 562-577.

- Perelman, S.B.; León, R.J.C. y Deregibus, V.A. 1982. Aplicación de un método objetivo al estudio de las comunidades de pastizal de la Depresión del Salado (Provincia de Buenos Aires). *Revista de la Facultad de Agronomía de Buenos Aires*, 3: 27-40.
- Pickett, S.T.A. & Cadenasso, M.L. 1995. Landscape ecology: spacial heterogeneity in ecological systems. *Science*, 239: 331-334.
- Rivas, R., Carmona, F., Ocampo, D. 2011. Teledetección: Recientes aplicaciones en la Región Pampeana. cursosihlla.bdh.org.ar/Libro_011
- 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.
- Ronco A., Díaz Báez M.C., Pica Granados Y. 2004. Conceptos generales. En: Castillo Morales G. (ed.). *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones*. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, México. 17-22.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *NASASP-351, Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 symposium*, 309-317.
- Sala, J.M.; González, N. y Kruse, E. 1983. Generalización hidrológica de la provincia de Buenos Aires. En: Fuschini Mejía, M.C. (ed.). *Hidrología de las grandes llanuras*. Actas del Coloquio de Olavarría, 973-1009.

- Sala, O.E.; Oesterheld, M.; León, R.J.C. & Soriano, A. 1986. Grazing effects upon plant community structure in subhumid grasslands of Argentina. *Vegetatio* 67: 27–32.
- Salazar Lea Plaza, J.C., Moscatelli, G., 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. SAG y P-INTA, Buenos Aires. United States Department of Agriculture, 1998. Keys to soil taxonomy. USDA, Washington DC.
- Sfeir, A. 2015. Provincia de Buenos Aires. En: Casas, R. y Albarracín, F.A. (Compiladores). El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina.. Tomo 2, Parte 7: Erosión y degradación de suelos, 31-48.
- Sobrino, J. A. 2000. Teledetección. Universitat de Valencia.
- Tortorelli, M. C. 2009. Ríos de vida. Ministerio de Educación. INET. Bs. As. Colección Las ciencias naturales y la matemática. Disponible en <http://www.inet.edu.ar/index.php/material-de-capacitacion/nueva-serie-de-libros/rios-de-la-vida/>
- Turner, M.G.; Gardner, R.H. & O'Neill, R.V. 2001. Landscape Ecology in theory and practice. Pattern and process. Springer, New York.
- Urban, D.L.; O'Neill, R.V. y Shugart, H.H.Jr. 1987. Landscape Ecology: A hierarchical perspective can help scientists understand spacial patterns. *BioScience*, 37 (2): 119-127.
- Usunoff, E., Varni, M., Weinzettel, P. y Rivas, R., 1999. Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda Argentina. *Boletín Geológico y Minero de España*. 110:391–406.

- Usunoff, E.; Varni, M.; Rivas, R. y Weinzettel, P. 2000. Aspectos hidrogeológicos de relevancia de la Llanura Pampeana en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. En: Actas I Joint World Congress on Groundwater. Fortaleza, Brasil. 1-18.
- Varni, M., Comas, R., Weinzettel, P. y Dietrich, S., 2013. Application of the water table fluctuation method to characterize groundwater recharge in the Pampa plain, Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 58: 1445-1455.
- Vervoort, F. B. 1967. La vegetación de la República Argentina. VII. Las comunidades vegetales de la Depresión del Salado. Serie Fitogeográfica N°7. INTA. Buenos Aires.
- Wetzel, Robert G. 1981. *Limnología*. Editorial Omega, Barcelona.
- Zabala, M.E. 2013. El origen de la composición química del acuífero freático en la cuenca del arroyo del Azul. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Córdoba. 478 pp.
- Zabala, M.E., Manzano, M. y Vives, L. 2015. The origin of groundwater composition in the Pampeano Aquifer underlying the Arroyo del Azul basin, Argentina *Science of the Total Environment*. 518-519, 168-188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.065>.
- Zabala, M.E., Manzano, M. y Vives, L. 2016a. Assessment of processes controlling the regional distribution of fluoride and arsenic in groundwater of the Pampeano Aquifer in the Del Azul Creek basin (Argentina). *Journal of Hydrology*. 541 (2016) 1067-1087.

- Zabala, M.E., Martínez, S., Manzano, M. y Vives, L. 2016b. Groundwater chemical baseline values to assess the Recovery Plan in the Matanza-Riachuelo River basin, Argentina. *Science of the Total Environment* 541, 1516-1530. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.006>
- Zárate, M.A. y Mehl, A. 2010. Geología y geomorfología de la cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina. En: Varni, M., Entraigas, I. y Vives, L. (eds.) *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura*. Vol. I: 65-78. Editorial Martín. Mar del Plata.
- Zárate, M.A. y Tripaldi, A. 2012. The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Research* 3: 401-417.



I H L L A