# ESTUDIOS DE PROCESOS HIDROAMBIENTALES EN UNA ZONA DE LLANURA DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

G. Collazos, F. Peluso, I. Entraigas, I. Masson, N. Othax, M. E. Zabala, S. A. Dubny, J. González Castelain, L. Fajardo, N. Briceño*

Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (IHLLA)
gcollazos.ihlla@gmail.com

## Resumen

*El Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) tiene amplia trayectoria en hidrología subterránea y superficial, medio ambiente, calidad del agua y teledetección. Se trabajó en líneas de investigación menos desarrolladas, con el fin de mejorar la comprensión de procesos que afectan el agua y el ambiente, algunos muy relacionados con las actividades humanas. Los trabajos se realizaron en diferentes zonas de la cuenca del arroyo del Azul, representativas de gran parte de la provincia de Buenos Aires. Se pretende que las metodologías desarrolladas puedan ser trasladadas a otras zonas de características hidrológicas similares. Las cinco líneas de trabajo son: (1) relaciones de las características topográficas y geomorfológicas con los procesos de escurrimiento superficial y la dinámica de la conectividad hidrológica en una zona llana; (2) seguimiento del almacenamiento en depresiones mediante vuelos de un dron, y su representación mediante un modelo hidrológico; (3) uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad de los recursos hídricos superficiales; (4) determinación del fondo químico natural del acuífero y evaluación del riesgo para la salud humana y el ganado vacuno; y (5) cuantificación de la exportación de sólidos suspendidos, fósforo y nitrógeno en una cuenca de llanura, mediante los procesos de erosión y lavado del suelo.*

**Palabras clave:** llanura, conectividad hidrológica, almacenamiento superficial, bioindicadores, fondo químico, lavado de nutrientes

* G. Collazos, F. Peluso, I. Entraigas, e I. Masson: Comisión de Investigaciones Científicas de la PBA.
G. Collazos, F. Peluso, I. Entraigas, I. Masson, N. Othax, M. E. Zabala, S. A. Dubny y J. González Castelain: Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (IHLLA). República de Italia n.º 780, Azul, Argentina. Tel.: +54 (02281) 569126

## Introducción

El Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) tiene amplia trayectoria en hidrología subterránea y superficial, medio ambiente, calidad del agua y teledetección.

El proyecto de fortalecimiento busca trabajar en líneas de investigación menos desarrolladas, mejorando la comprensión de procesos que afectan el agua y el ambiente, algunos de ellos muy relacionados con las actividades humanas (no naturales o antrópicos).

Las actividades se llevaron a cabo en diferentes zonas de la cuenca del arroyo del Azul, que se consideran representativas de gran parte de la provincia de Buenos Aires. Así, se pretende que las metodologías y enfoques desarrollados puedan trasladarse a las zonas vecinas de características hidrológicas similares.

Las cinco líneas de trabajo por fortalecer son:

1. Determinación de las relaciones de las características topográficas y geomorfológicas con los procesos de escurrimiento superficial, y de la dinámica de la conectividad hidrológica en la matriz de pastizales naturales del sector llano de una cuenca de llanura.
2. Seguimiento y evolución del almacenamiento en depresiones y de la humedad del suelo mediante vuelos de un dron, estableciendo un balance hídrico del almacenamiento superficial y su vinculación con un modelo hidrológico.
3. Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad de los recursos hídricos superficiales.
4. Determinación del fondo químico natural del acuífero y evaluación del riesgo para la salud humana y el ganado vacuno en los sectores medio y bajo de la cuenca.
5. Cuantificación de la exportación de sólidos suspendidos, fósforo y nitrógeno en una cuenca de llanura, mediante los procesos de erosión y lavado del suelo. Asimismo, identificación de los factores que intervienen en dicha exportación.

El proyecto ha permitido adquirir equipamiento y realizar mediciones, obtener y analizar muestras, y conocer el estado de la vegetación y la biota –de lo que no se disponía anteriormente–, ampliando de esa forma el conocimiento del ciclo hidrológico en la cuenca del arroyo del Azul. Los resultados científicos de la información recogida continuarán más allá de la finalización de este proyecto institucional.

Las áreas de trabajo de cada línea y el perímetro de la cuenca del Azul (en morado), pueden verse en la siguiente figura:

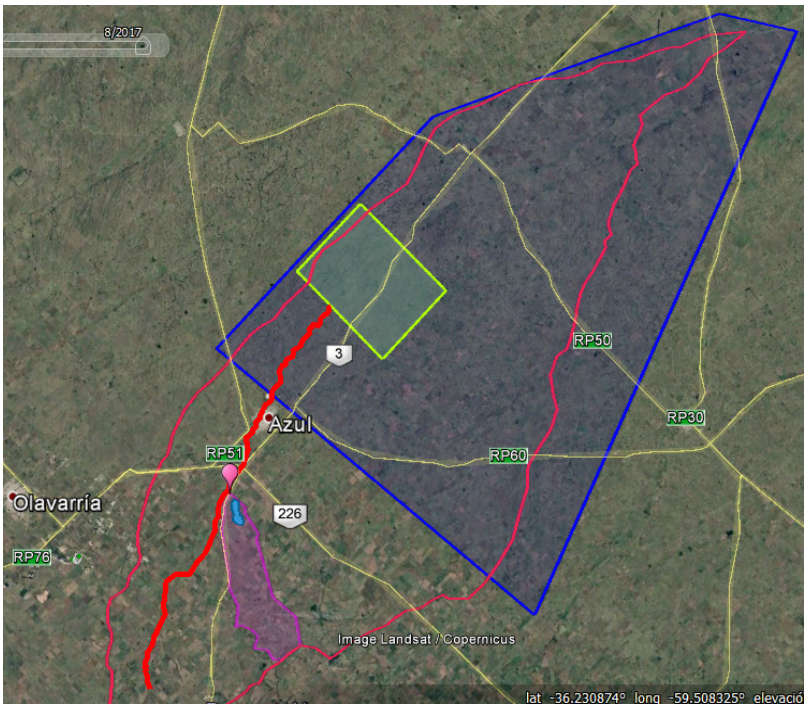


**Figura 1. Área de trabajo de cada línea, dentro de la cuenca del arroyo del Azul**

## Línea 1: dinámica y patrón de la conectividad hidrológica en el ambiente de llanura

A pesar de la acentuada planicie del terreno de la zona analizada, la topografía controla la producción de la escorrentía y los anegamientos, y participa en la conectividad difusa que provoca que la escorrentía superficial llegue al cauce principal a través de vías terrestres temporarias de flujo (Croke, 2005). Por un lado, la conectividad dinámica (que alude al hecho de que las conexiones internas en la cuenca varían a diferentes escalas de tiempo debido a los cambios en la disponibilidad de agua superficial y subsuperficial), puede inferirse a partir de la asunción de que un mayor contenido de humedad del suelo implica un grado mayor de conectividad (Fitzjohn *et al.,* 1998; Leibowitz y Vining, 2003). Esto es, que los patrones de humedad del suelo que surgen luego de eventos de lluvias importantes reflejan cómo el agua se mueve a través de la cuenca, y así expresan la vinculación de los depósitos de agua al colmatarse y producir conexiones hidrológicas (Tezlaff *et al.,* 2011). Por otro lado, algunos autores (Ali *et al.,* 2011, 2012) han sugerido que, probablemente, el monitoreo de la dinámica del nivel freático, a través de piezómetros ubicados en unidades del paisaje con diferentes coberturas, permitiría un acercamiento al entendimiento de cómo aquellos depósitos de agua se colmatan (o vacían) y cómo se vinculan (o se aíslan) para producir (o interrumpir) los flujos conectores.

A partir de estos conceptos planteados, se elaboró un modelo conceptual preliminar de la conectividad hidrológica en un Sistema Hidrológico No Típico como el que aquí se presenta, contemplando variables topográficas, edáficas, hidrológicas y ecológicas.

En cuanto a las variables topográficas, se llevó adelante una campaña de relevamiento de puntos (más de 3000) que incluyó sectores sobre caminos vecinales, rutas nacionales, cunetas y zonas de terreno natural, los que conformarán parte de la matriz de datos (aún restan sumar las batimetrías del arroyo del Azul) a partir de la cual se llevará a cabo la corrección del modelo de elevación de cobertura global ALOS-PALSAR. Una vez que se obtenga la superficie operacional corregida, se determinará la red de drenaje y, a partir de esta, se delimitarán diferentes áreas de aporte, como una manera de identificar áreas hidrológicas que, en ese sentido, funcionen de manera homogénea.

El trabajo con las variables edáficas contempló hasta el momento cuatro campañas (marzo, abril, mayo y julio) de tomas de datos de humedad del suelo a diferentes profundidades (10 y 20 cm) en 32 sitios (figura 2). Se contempla seguir con estos muestreos de frecuencia mensual hasta fin de año, con el objetivo de captar momentos de estados contrastantes de la cuenca, es decir, momentos de estado seco (cuando el patrón de humedad del suelo está desorganizado por la influencia de factores de control locales, como las características del suelo, la vegetación y la pendiente del sitio) y de estado húmedo (cuando el patrón de humedad del suelo está altamente organizado y conectado por la influencia de factores de control no locales y flujos laterales de agua superficial).

**Figura 2. Mediciones en campo: topográficas y de humedad del suelo**

Por otro lado, las variables hidrológicas están contempladas a partir del seguimiento de la dinámica del nivel freático mediante el monitoreo de 20 piezómetros distribuidos en el área de estudio. Las campañas de muestreo fueron coincidentes con las de la humedad del suelo, por lo que también totalizan cuatro hasta el momento. En el área se cuenta también con un limnígrafo y un pluviómetro, por lo que se está llevando adelante el análisis conjunto y continuo de dichos registros.

Los aspectos ecológicos se están contemplando a partir del relevamiento fotográfico de la fisonomía de las distintas comunidades, utilizando los numerosos caminos vecinales existentes en el área de estudio como transectas de muestreo. En el mismo sentido, se comenzará con la elaboración del mapa de uso actual de la tierra, a partir del procesamiento de imágenes satelitales.

Finalmente, se aplicarán diferentes índices de conectividad hidrológica basados especialmente en la topografía y la humedad del suelo, pero se intentará enriquecerlos con interpretaciones provenientes de la caracterización de la dinámica del nivel freático y con las distintas coberturas presentes en el área de estudio.

## Línea 2: seguimiento y modelación del almacenamiento superficial de agua en bajos

Tanto el almacenamiento superficial como el exceso de humedad del suelo condicionan fuertemente la circulación de personas y cargas por el territorio, y casi todas las actividades productivas rurales. Las nuevas herramientas tecnológicas (en particular, los drones) pueden ayudar a la observación de los fenómenos con desarrollo espacial, como el almacenamiento superficial en zonas de llanura, presentando en este caso algunas ventajas operativas con respecto a zonas escarpadas.

Al inicio, se eligió la zona de trabajo con ciertas facilidades de acceso y se comenzó trabajando con un modelo digital de terreno (MDT) SRTM de 90 m de pixel obtenido de la NASA, corregido altitudinalmente. Con este MDT se ha delimitado la subcuenca que incluye la zona de bajos concatenados que se van a estudiar. La zona de estudio se limitó a la parte inferior de la subcuenca por razones de costo del vuelo.

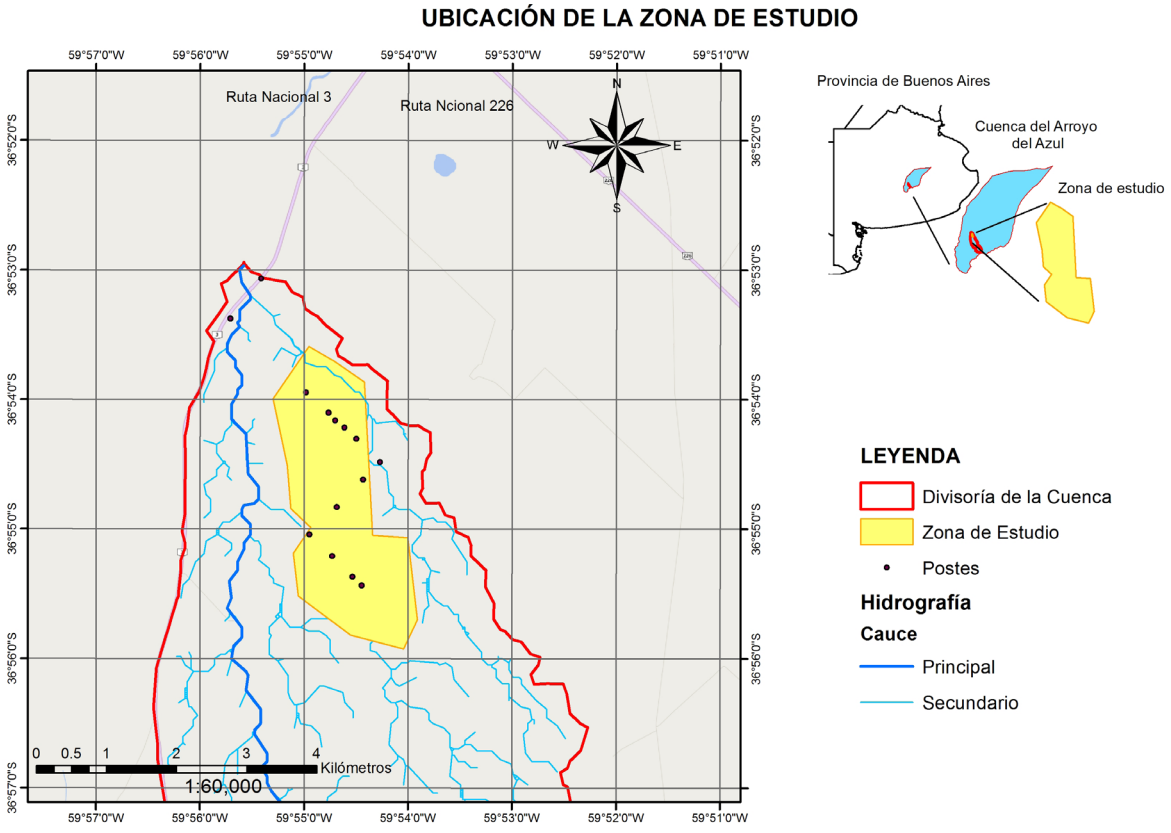


**Figura 3. Área de bajos con almacenamiento superficial temporal**

Para la preparación del vuelo se tuvieron que determinar las coordenadas x, y, z de puntos de apoyo (postes del alambrado, indicados en la figura 3) mediante un GPS diferencial en la zona de cobertura del vuelo del dron. También se ha realizado la capacitación en el procesamiento fotogramétrico de las imágenes capturadas, que se realiza mediante un *software* específico. Una vez realizado el vuelo, la delimitación de la cuenca y el MDT será más precisa.

Las imágenes capturadas con dron, globo de helio o pértiga deberán procesarse para componer un mosaico, y posteriormente se procesarán con un programa GIS para cuantificar las superficies de almacenamiento superficial. El contenido de humedad del suelo podrá ser estimado siempre que se disponga de una cámara capaz de capturar luz en el espectro infrarrojo cercano.

Además de esto, se ha realizado el procesamiento de numerosas imágenes satelitales de reflectividad de la misión AQUA, para detectar agua en superficie y suelo con exceso de agua en un área más amplia que la zona de estudio, pero que la incluye. De esta forma, se podrán comparar los resultados trabajando con diferente resolución espacial sobre el mismo territorio y las mismas condiciones hidrológicas.

El balance hídrico que se realizará en los diferentes bajos se ha planteado mediante el modelo lluvia-escorrentía HEC-HMS, que se trabajará en dos modalidades de forma paralela: a escala diaria y a escala horaria. Para ello, se han obtenido las series climáticas de precipitación y evapotranspiración que se emplearán en función de las estaciones climáticas cercanas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de la red telemétrica del IHLLA. También se considerará la interacción con el agua subterránea siguiendo los lineamientos de trabajos previos en la zona (Verni *et al.,* 2003).

Ya se han adquirido equipos y elementos necesarios para realizar las investigaciones, pero buena parte de ellos son importados, lo que presenta dificultades logísticas: implica que ciertas tareas se retrasen hasta recibir los elementos. Los trabajos de recogida de datos continuarán luego de la finalización formal del proyecto, para poder obtener conclusiones más sólidas.

## Línea 3: uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad de los recursos hídricos superficiales

Dado que el análisis de las variables fisicoquímicas del agua en forma aislada muchas veces no refleja por completo el estado del recurso hídrico, es recomendable incorporar el componente biótico entre las herramientas de monitoreo (Prat y Munné, 2014). Por ello, es importante darle relevancia a esta línea de trabajo que utiliza los bioindicadores para evaluar la calidad ecológica de las aguas (y de la cuenca en general) como otro componente por ser considerado y que puede aportar valiosa información para un mejor monitoreo y gestión del recurso.

Los peces son uno de los grupos biológicos que pueden utilizarse como bioindicadores. Esto se puede hacer mediante el uso de índices que emplean las características de las comunidades de peces para evaluar el estado ecológico del agua.

Se ha avanzado en la aplicación del Índice de Integridad Biótica (IBI) (*sensu* Karr, 1981). Este índice, como se anticipó, está basado en la estructura de las comunidades de peces; y, a partir

ciertas características de estas, que tienen que ver con cuáles especies están presentes y cuáles no, con sus abundancias relativas, etc., permite inferir el grado de perturbación de un curso de agua. El objetivo de esta etapa fue desarrollar un IBI adecuado a la cuenca del arroyo del Azul para evaluar la existencia de posibles perturbaciones ambientales en los distintos tramos del arroyo y así validar su uso como herramienta de monitoreo. Los muestreos consistieron en arrastres con red en seis tramos de arroyo, cubriendo sectores de la parte alta, media y baja de la cuenca y zonas preurbanas, urbanas y posurbanas. La ciudad de Azul se ubica a ambos márgenes del arroyo, entre los km 61 y 69 en la figura 4.

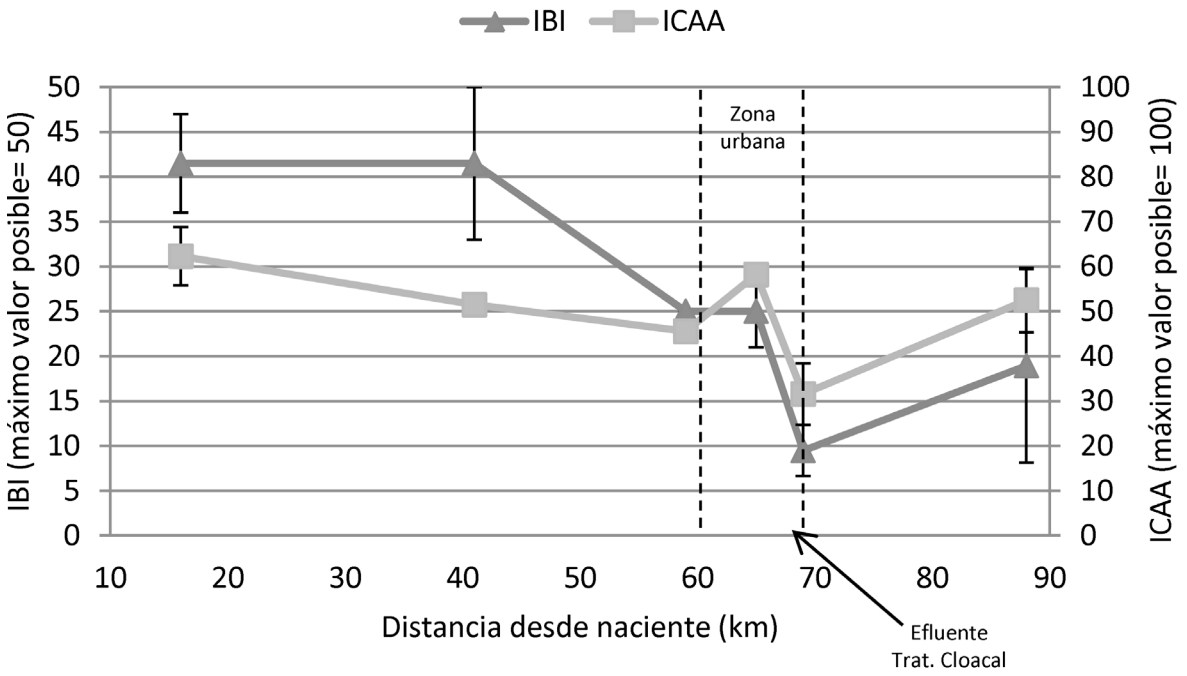


**Figura 4. Valores resultantes de la aplicación del Índice de Integridad Biótica (IBI) e Índice de Calidad de Agua del arroyo del Azul (ICAA) en distintos tramos del arroyo del Azul, organizados de acuerdo a su distancia aproximada a la naciente (km 0). Las barras representan el error estándar para cada tramo estudiado. No existen valores intermedios entre puntos, por lo que las líneas que los unen son meramente referenciales. En la figura también se indica la extensión aproximada de la zona urbana y la ubicación de la descarga puntual del efluente producto del tratamiento de residuos cloacales (km 68)**

También se analizaron las variables fisicoquímicas, para poder aplicarlas en el cálculo del índice de calidad de agua del arroyo del Azul (ICAA), y un índice fisicoquímico desarrollado localmente para el arroyo del Azul (Rodríguez *et al.,* 2010), a fin de comparar los resultados de ambos.

Con los resultados preliminares obtenidos hasta la fecha se ha podido apreciar que el IBI, a través de la composición y características de la comunidad ictiofaunística, permite contrastar los distintos tramos del arroyo del Azul en cuanto a sus niveles de perturbación ambiental. También la aplicación del ICAA muestra tendencias similares. Los valores más altos para el IBI e ICAA se registraron en el sector correspondiente a cuenca alta (km 16 y km 41), mientras que los valores mínimos para ambos índices correspondieron al tramo donde se realiza la descarga del efluente del tratamiento cloacal, casi al final de la zona urbana (km 69), lo que evidencia cierta recuperación de calidad (depuración) aguas abajo, hacia la cuenca baja (km 88).

Si bien los muestreos de peces requieren de un esfuerzo de trabajo de campo considerable (por ejemplo, arrastres con redes, identificación de especies, etc.), estos son menos costosos en cuanto a que no se necesita de insumos de laboratorio o equipamiento tecnológico para las mediciones, ni de personal especializado para realizarlas, y esta es una de las principales ventajas que tiene el empleo del IBI como herramienta de monitoreo periódico de rutina. Se prevé en el futuro incorporar a los macroinvertebrados bentónicos como otro componente de la biota con utilidad en la bioindicación. A tal efecto, ya se han recolectado muestras en todos los tramos antedichos y se avanza en su análisis.

## Línea 4: determinación del fondo químico natural del acuífero y evaluación del riesgo para la salud humana y el ganado vacuno

La salinidad del agua subterránea en la cuenca del arroyo del Azul aumenta de SO (cuenca alta) a NE (cuenca baja) en coincidencia con la dirección general del flujo subterráneo. En el sector llano de la cuenca, la geomorfología condiciona el movimiento del agua superficial y los procesos de recarga y descarga del acuífero; los principales procesos de evacuación del agua son la evaporación y la infiltración. Este sector se caracteriza además por la presencia de suelos salinos-sódicos, por la proximidad del nivel freático a la superficie del terreno y por la elevada salinidad del agua subterránea. Dadas estas características, la principal actividad humana desarrollada en este sector de la cuenca es la ganadería vacuna. El agua utilizada tanto para consumo humano como para bebida animal proviene del acuífero Pampeano.

Muchos elementos químicos son considerados tóxicos para consumo humano y bebida animal, y existen herramientas de Análisis de Riesgo Sanitario (ARS) que permiten estimar el nivel potencial de peligro para un receptor humano o animal, a partir del contacto con una sustancia química presente en el ambiente, caracterizando los efectos adversos potenciales y su probabilidad de ocurrencia. Esto permite identificar, evaluar, seleccionar e implementar acciones para reducirlos de un modo más eficiente (NRC, 1983). Las herramientas de gestión utilizadas en la actualidad presentan ciertas limitaciones, tales como considerar un solo tipo de individuo expuesto, desconsiderar diversas situaciones de exposición y evaluar cada sustancia de forma individual, sin tener en cuenta el riesgo del conjunto de sustancias presentes en el ambiente. Por lo tanto, los ARS se convierten en herramientas idóneas para la evaluación integral de la calidad del agua para consumo humano y bebida animal, principalmente en este último caso, en que las regulaciones existentes no protegen a los bovinos de todas las sustancias que pueden ser encontradas en los cuerpos de agua.

Se busca proponer un modelo hidrogeoquímico conceptual que explique cuáles son los principales procesos naturales que controlan la química del agua subterránea en los sectores medio-bajo de la cuenca del arroyo del Azul; establecer su fondo químico natural e identificar los procesos que lo modifican (actividades humanas); cuantificar el riesgo para la salud humana y el ganado vacuno por consumo de agua subterránea; y proponer directrices para la gestión del agua.

Se realizaron dos muestreos de agua subterránea durante septiembre de 2016 y febrero de 2017. En la primera campaña se muestrearon 47 puntos y en la segunda 48, por lo que se cuenta con un total de 95 análisis químicos. Las muestras proceden de dos redes de piezómetros, una freática (3-10 m de profundidad) y otra de 30 m de profundidad, y de pozos de particulares (molinos y bombas sapo). En campo se midió pH, temperatura y conductividad eléctrica (CE), y en el laboratorio del IHLLA se

analizaron los contenidos de Ca, Mg, Na, K, Cl, $SO_4$, $HCO_3$, $CO_3$, $NO_3$, F, As, $SiO_2$, Fe, Mn y se midieron los parámetros pH y CE.

Se avanzó en el desarrollo de una metodología para la evaluación cuantitativa del riesgo que representa para la salud humana y el ganado vacuno (para producción cárnica) el consumo de agua subterránea con contenidos de nitrato, fluoruro y arsénico, entre otros.

Se trabajó en la caracterización probabilística de los parámetros para el cálculo de las dosis de exposición (ingesta de agua, frecuencia y duración de la exposición, y peso corporal) según el modelo básico de Análisis de Riesgo para la Salud probabilístico (NRC, 1983, 1994; USEPA, 1992) con Crystal Ball 11.1 (Decisioneering, 2007) para efectos no carcinogenéticos crónicos. En el caso del ganado, la tasa de ingesta varía con la temperatura ambiente. Por lo tanto, se utilizaron los datos provenientes de estaciones meteorológicas de la zona de estudio.

Dado que la base metodológica de un análisis de riesgo es la confrontación de la dosis de exposición de la sustancia con un referencial, que en el caso de los bovinos está ausente, se aplicó la metodología de extrapolación interespecífica (USEPA, 2011, 2014) para obtener valores umbrales de toxicidad (a partir de información de animales de laboratorio) y poder así evaluar el riesgo, debido a la ausencia de información de toxicidad crónica en el ganado vacuno.

Se definió un escenario de exposición residencial al riesgo y se consideraron cuatro tipos de individuos expuestos a diferentes edades (5, 10, 15 años y adultos). En el caso de los bovinos, se consideraron terneros y vacas adultas. El riesgo se calculará siguiendo la metodología propuesta por USEPA (1999, 2001, 2003).

A partir del estudio hidroquímico, se calculará el fondo químico natural del acuífero Pampeano en los sectores medio y bajo de la cuenca. Estos valores de referencia serán utilizados en el monitoreo de la calidad química del agua subterránea. El riesgo para la salud humana y animal se calculará con herramientas de ARS.

La aplicación de la herramienta de riesgo para la salud humana y el ganado bovino a partir del consumo de agua permitirá conocer el valor de riesgo de las distintas sustancias en diferentes edades de la población (humana rural y de los bovinos), y conocer la contribución de cada sustancia al riesgo conjunto, en cada grupo considerado. Se obtendrán valores puntuales del riesgo y se evaluará la posibilidad de realizar una distribución espacial de él.

Este estudio puede ser un aporte interesante para la gestión ambiental, sobre todo en relación con los productores ganaderos. Esta información podría ser útil para la toma de decisiones, tanto preventivas como reparadoras. Además, implementar el análisis de riesgo amplía la base informativa para la toma de decisiones.

## Línea 5: exportación de sólidos suspendidos, fósforo y nitrógeno en una cuenca agrícola

El estudio de la exportación de sedimentos y nutrientes de una cuenca agrícola y de los procesos intervinientes permite evaluar la pérdida de suelos y su importancia, y estimar la relevancia de adoptar prácticas

de manejo del suelo para conservar su potencial productivo y para reducir la afectación del ambiente en general (Álvarez-Cobelas y Angeler, 2007). La producción o exportación de una cuenca es la cantidad total de materia que fluye hacia fuera, medida en un punto de referencia y en un período de tiempo específico (Vanoni, 1975). Si se piensa en la cuenca como unidad funcional del paisaje, su producción de sedimentos y nutrientes refleja sus características, historia, desarrollo, uso y manejo.

En Argentina, la exportación de sedimentos y nutrientes fue cuantificada mayormente para los grandes ríos de la cuenca del Plata, mientras que en la región pampeana, los trabajos de cuantificación de la exportación en cuencas son escasos, y mayormente basados en estimaciones indirectas por medio de modelos como la ecuación universal de pérdida de suelo –USLE– (Gaspari *et al.,* 2009), aunque los resultados no están validados con datos de campo sobre la exportación real. La falta de mediciones en sistemas fluviales no permite predecir valores realistas de la exportación de las cuencas, por lo que el papel de los ríos en el sistema de denudación global sigue siendo solo parcialmente entendido. Los trabajos basados en datos medidos son insuficientes, y están relacionados con eventos de lluvia-escorrentía (Ares *et al.,* 2014) o apoyados en datos de monitoreos realizados con una frecuencia escasa (Geraldi, 2011).

La relación entre la concentración de materiales transportados y el caudal de salida de una cuenca de drenaje puede ser representada y analizada mediante los ciclos de histéresis (véase figura 5). Esta relación brinda información acerca de los procesos de erosión y transporte; permite estimar los aportes debidos al caudal base y de la escorrentía superficial directa, y proponer relaciones con los factores condicionantes mencionados con anterioridad.

El objetivo general de este proyecto es analizar la salida de sedimentos y nutrientes en una cuenca agrícola ganadera del centro de la provincia de Buenos Aires, con el fin de evaluar la pérdida de suelos y generar modelos explicativos de este proceso.

El área de trabajo es la cuenca del arroyo Santa Catalina (con una superficie total de 143,1 $km^2$ y una longitud aproximada de 25 km), ubicada en la cabecera del arroyo del Azul.

Como parte de las tareas se tomaron muestras en tres eventos de lluvia-escorrentía, cuyos resultados aún se están procesando. La toma de muestras de agua se realiza manualmente durante los eventos de crecida, de forma diaria a subdiaria, y en laboratorio se determinan la concentración de los sólidos suspendidos, nitrato, fósforo total y soluble, conductividad eléctrica y cloruro. Además, se realizan muestreos esporádicos, quincenales a mensuales, para evaluar las mismas variables en condiciones de caudal base. Se cuenta con información de lluvias y de caudal, a partir del registro continuo de una estación meteorológica en el sector de cuenca alta y de una estación limnigráfica cercana al punto de salida de la cuenca.

La cuantificación de la exportación de sólidos suspendidos se realizó por diferentes métodos (Guyot *et al.*, 1999), estimándose la pérdida anual en 2185 toneladas (153 kg/ha/año). Las pérdidas anuales de P y N rondarían las 37 y 325 toneladas anuales respectivamente (estimaciones provisorias), equivalentes a 2,58 y 22,7 kg/ha/año.

La tendencia general observada es que la concentración de sólidos suspendidos y de las formas de P es mayor en la fase de crecida del hidrograma, lo que genera una relación concentración

*vs*. caudal con formas de ciclo con sentido horario. Se interpreta que esto se debe a que los aportes de estos materiales están vinculados al lavado de suelo superficial, influenciados por la energía erosiva y de trasporte del evento de lluvia.

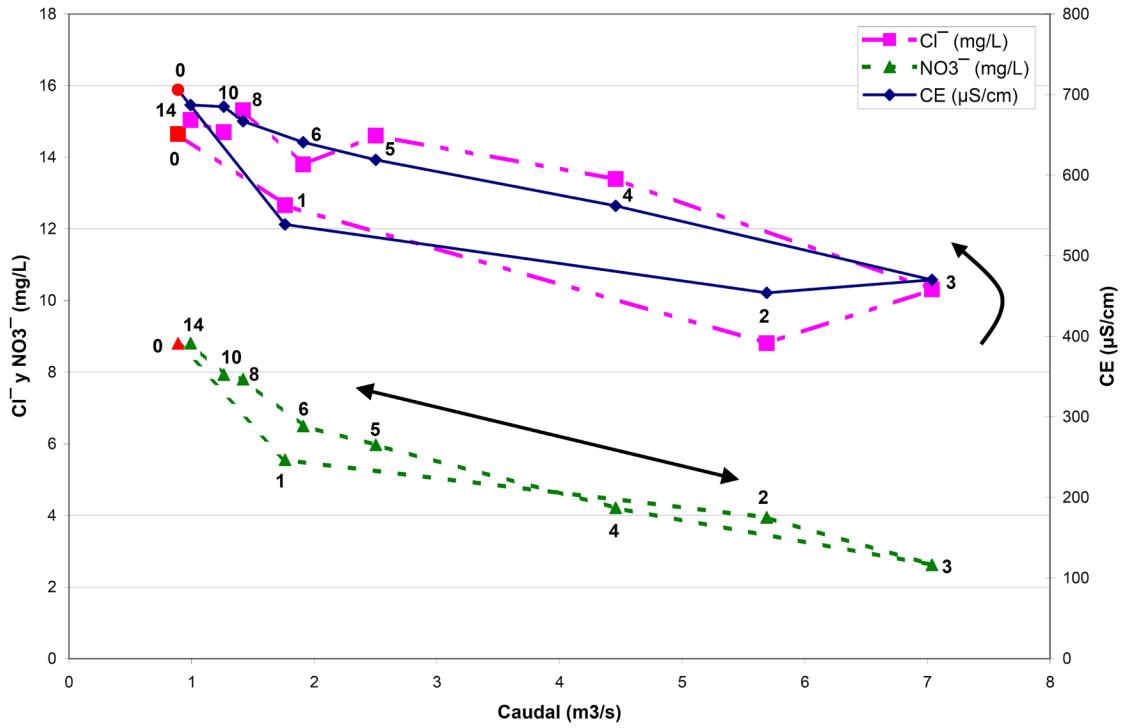


**Figura 5. Relación concentración *vs.* caudal para un evento de lluvia escorrentía. Con la flecha se indica el sentido de los ciclos de histéresis, y con números los días transcurridos desde la lluvia**

En cambio, la relación entre la conductividad eléctrica y las concentraciones de $Cl^-$ y N en función del caudal formarían ciclos antihorarios, provocados por un efecto de dilución en la fase de crecida, por el ingreso de la escorrentía directa, y un posterior aporte de estos elementos al incrementarse los aportes de agua subterránea y del suelo subsuperficial. Estos últimos estarían asociados a la infiltración del agua de lluvia en el suelo y posterior descarga hacia el cauce.

Se están aplicando descriptores matemáticos (Butturini *et al.*, 2006) que permiten comparar los ciclos de histéresis y buscar asociaciones estadísticas con los potenciales factores (climáticos, hidrológicos, fenológicos) que intervienen en los procesos de erosión y trasporte hídricos, a fin de postular un modelo conceptual explicativo.

## Comentarios finales

Este proyecto permitió que líneas de trabajo secundarias, que no disponían de financiación de forma autónoma, tuvieran la posibilidad de crecer y desarrollar sus trabajos, ampliando las miradas y el enfoque sobre el ciclo hidrológico para hacerlo más multidisciplinar, al tiempo que se desarrollaron técnicas de trabajo y metodologías nuevas.

También permitió mejorar la integración entre personas que trabajan en temas diferentes, lo cual potencia las sinergias y las capacidades de la institución. Estos beneficios trascienden el período formal de este proyecto, y continuarán en el futuro.

## Bibliografía


Ali, G. A.; L'Heureux, C.; Roy, A. G.; Turmel, M. C. y Courchesne, F. (2011). "Linking Spatial Patterns of Perched Groundwater Storage and Stormflow Generation Processes in a Headwater Forested Catchment". *Hydrological Processes*, vol. 25, n.º 25, pp. 3843-3857.

Ali, G. A.; Tetzlaff, D.; Soulsby, C. y McDonnell, J. J. (2012). "Topographic, Pedalogic and Climatic Interactions Influencing Streamflow Generation at Multiple Catchment Scales". *Hydrological Processes*, vol. 26, n.º 25, pp. 3858-3874. doi: http: //dx.doi.org /10.1002 /hyp.8416

Álvarez-Cobelas, M. y Angeler, D. G. (2007). "Exportación de nutrientes en las cuencas hidrográficas de Latinoamérica: una recopilación". *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 3, n.º 1, pp. 31-43.

Ares, M. G.; Varna M. y Chagas, C. (2014). "Erosión hídrica en una microcuenca agrícola bajo siembra directa del centro de la Provincia de Buenos Aires". *Ciencia del Suelo*, vol. 32, n.º 2, pp. 259-270.

Butturini, A.; Gallart, F.; Latron, J.; Vázquez, E. y Sabater, F. (2006). "Cross-Site Comparison of Variability of DOC and Nitrate c–q Hysteresis During the Autumn–Winter Period in Three Mediterranean Headwater Streams: a Synthetic Approach". *Biogeochemistry*, vol. 77, pp. 327-349.

Croke, J. (2005). "Sediment Concentration Changes in Runoff Pathways from a Forest Road Network and the Resultant Spatial Pattern of Catchment Connectivity". *Geomorphology*, vol. 68, n.º 3-4, pp. 257-268.

Decisioneering (2007). Crystal Ball. Version 11.1 software.

Fertonani, M. E. y Prendes, H. (1983). "Hidrología en área de llanura. Aspectos conceptuales, teóricos y metodológicos". En Fuschini Mejía M. C. (Ed.). *Hidrología de las Grandes Llanuras. Coloquio de Olavarría.* Vol. 3. Buenos Aires: UNESCO/Secretaría Nacional de Recursos Hídricos, pp. 787-864.

Fitzjohn, C. Ternan, J. L. y Williams, A. G. (1998). "Soil Moisturevariability in a Semi-Arid Gully Catchment: Implications for Runoff and Erosion Control". *Catena*, vol. 32, n.º 1, pp. 55-70.

Fuschini Mejía, M. C. (1994). *El agua en las llanuras*. Montevideo: UNESCO/ORCYT.

Gasparri, F. J.; Delgado, M. I. y Denegri, G. A. (2009). "Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial". *Terra Latinoamericana*, vol. 27, n.º 1, pp. 43-51.

Geraldi, A. (2011). “Determinación de cargas de nitrógeno y fósforo en cuencas hidrográficas pampeanas”. *Contribuciones Científicas*, vol. 23, pp. 121-130.

Geraldi, A. y Piccolo, M. C. (2012). “Evaluación de las cargas de contaminantes en la cuenca del arroyo Pigüé mediante la aplicación de modelos”. En *Actas de las IX Jornadas Nacionales de Geografía Física*. Bahía Blanca: UNS, pp. 40-49.

Guevara O. C. (2015). *Una metodología para el manejo integral de extremos hídricos en una cuenca rural en zona de llanura. Caso de Estudio: Cuenca Arroyo Santa Catalina, Provincia de Buenos Aires*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Ciencias Naturales y Museo (UNLP).

Guyot, J. L.; Jouanneau J. M. y Wasson, J. G. (1999). “Characterisation of River Bed and Suspended Sediments in the Rio Madeira Drainage Basin (Bolivian Amazonia)”. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 12, pp. 401-410.

Karr, J. (1981). “Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities”. *Fisheries*, vol. 6, pp. 21-27.

Lane, S. N. (2003). *Land Management, Flooding and Environmental Risk: New Approaches to a Very Old Question*. Actas de la “CIWEM Conference”, Harrogate, Reino Unido.

Leibowitz, S. G. y Vining, K. C. (2003). “Temporal Connectivity in a Prairie Pothole Complex”. *Wetlands*, vol. 23, n.º 1, pp. 13-25.

National Research Council (1983). *Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process.* Washington DC: The National Academies Press.

National Research Council (1994). *Science and Judgement in Risk Assessment.* Washington DC: The National Academies Press.

Prat, N. y Munné, A. (2014). “Biomonitoreo de la calidad del agua en los ríos ibéricos: lecciones aprendidas”, *Limnetica*, vol. 33, pp. 47-64.

Pringle, C. (2003). “What is Hydrologic Connectivity and Why Is It Ecologically Important?”. *Hydrological Processes*, vol. 17, n.º 13, pp. 2685-2689.

Rodríguez, L.; González Castelain, J.; Peluso, F. y Othax, N. (2010). “Desarrollo de un índice de calidad de agua para la cuenca del arroyo del Azul, Buenos Aires, Argentina”. En Varni, M.; Entraigas, I. y Vives, L. (Eds.). *Libro de Actas del I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras.* Mar del Plata: Editorial Martin, pp. 713- 720.

Scioli, C.; Pedraza, R.; Burgos, G. y Zimermann, E. (2013). “Identificación y evaluación de áreas fuente variables en sistemas hidrológicos de llanura”. Presentado en el XXIV Congreso Nacional del Agua 2013, San Juan, Argentina.

Tetzlaff, D.; McNamara, J. P. y Carey, S. K. (2011). “Measurements and Modelling of Storage Dynamics Across Scales”. *Hydrological Processes*, vol. 25, pp. 3831-3835.

United States Environmental Protection Agency (1992). "Guidelines for Exposure Assessment". *Federal Register*, vol. 57, n.º 104, pp. 22888-22938.

United States Environmental Protection Agency (1999). "Guidance for Conducting Health Risk Assessment of Chemicals Mixtures". Risk Assessment Forum. Washington DC.

United States Environmental Protection Agency (2001). *General Principles for Performing Aggregate Exposure and Risk Assessments*. Washington DC: USEPA, Office of Pesticide Programs. Recuperado de <http://www.epa.gov/pesticides/trac/science/aggregate.pdf>.

United States Environmental Protection Agency (2003). *Framework for Cumulative Risk Assessment*. Washington DC: USEPA, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, EPA/630/P-02/001F.

United States Environmental Protection Agency (2011). *Recommended Use of Body Weight3/4 as the Default Method in Derivation of the Oral Reference Dose*. Washington DC: USEPA, Office of the Science Advisor Risk Assessment Forum, EPA/100/R11/0001.

United States Environmental Protection Agency (2014). *Guidance for Applying Quantitative Data to Develop Data-Derived Extrapolation Factors for Interspecies and intraspecies Extrapolation*. Washington DC: USEPA, Office of the Science Advisor Risk Assessment Forum, EPA/100/R-14/002F.

Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation Engineering*. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices. Vol. 54*. Reston: ASCE.

Varni, M. y Rivas, R. (1999). "Relación entre aguas superficiales y subterráneas en un cuerpo de agua en la llanura bonaerense". *Actas de las VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales*, La Pampa, 1 al 3 de diciembre de 1999, pp. 337-344. Recuperado de <http://www.azul.bdh.org.ar/bdh3/archivos/publications/71814/Relacion_entre_aguas_superficiales.pdf>.

Varni, M. *et. al.* (2003). "Interacción de un cuerpo de agua superficial con el agua subterránea en la llanura pampeana", *Información Tecnológica*, vol. 14, n.º 6, pp. 97-104.