

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-05-07

Artículos

**Caracterización hidroambiental de cuencas en la
Reserva Parque Costero del Sur, Argentina**
**Hydro-environmental characterization of watersheds
within the Parque Costero Sur Reserve, Argentina**

Jazmín Glustein¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3548-5154>

Tatiana Arturi², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1977-0526>

Eliana Berardozzi³, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4210-9853>

María Isabel Delgado⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5493-7462>

¹Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina, jazminglustein@gmail.com

²Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, arturitatiana@gmail.com

³Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, eliana.berardozzi@gmail.com

⁴División Ficología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina, isabeldelgado@agro.unlp.edu.ar

Autora para correspondencia: Jazmín Glustein,
jazminglustein@gmail.com

Resumen

A pesar de existir una relativa homogeneidad en diferentes características de la región pampeana, el tipo de suelo podría determinar los usos posibles en cada zona, con impactos variables en la hidrología, la química del agua, la morfología de los cursos y la biodiversidad. En las reservas de biosfera resulta fundamental generar conocimiento que ayude a comprender la relación entre las actividades productivas desarrolladas y el estado de los ecosistemas. El objetivo de este trabajo es caracterizar las cuencas hidrográficas dentro de la reserva Parque Costero del Sur, a fin de aportar al desarrollo de una interpretación conceptual del funcionamiento hidrológico en este territorio. Se estudiaron tres arroyos —Buñirigo, Juan Blanco y Villoldo— con diferentes grados de intervención antrópica. Para ello se caracterizaron morfométricamente sus cuencas, se generaron mapas de uso del suelo y se realizaron balances hídricos. Se llevaron a cabo dos campañas de muestreo de agua superficial, y análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. La diferencia en la concentración de estos parámetros entre campañas resultó significativa. En todos los casos, los valores de conductividad eléctrica (CE), turbidez y demanda química de oxígeno (DQO) fueron mayores durante el periodo de déficit y los de fósforo reactivo soluble (PRS) durante el periodo de exceso hídrico. En cambio, la asociación con la distribución espacial de los sitios de muestreo no reveló tendencias

claras. Esta investigación podría resultar útil para la toma de decisiones relacionadas con la gestión del recurso hídrico, ya que ciertos parámetros exceden los límites establecidos localmente.

Palabras clave: arroyos pampeanos, uso del suelo, calidad del agua, reserva de biosfera.

Abstract

Despite the relative homogeneity in different characteristics of the Pampas region, the soil type might determine the possible land uses in each area, with variable impacts on hydrology, water chemistry, watercourse morphology, and biodiversity. In biosphere reserves, it is crucial to generate knowledge that helps to understand the relationship between productive activities and the state of the supporting ecosystems. The objective of this study is to characterize the watersheds within the Parque Costero del Sur reserve to contribute to the development of a conceptual interpretation of the hydrological functioning in this territory. Three streams —Buñirigo, Juan Blanco, and Villoldo— with different degrees of anthropic intervention were studied. To achieve this, their watersheds were morphometrically characterized, land-use maps were generated, and water balances were conducted. Two surface water sampling campaigns were carried out, analyzing physicochemical and microbiological parameters. The difference between campaigns for the concentration of these parameters was significant. In every case, the values of electrical conductivity (EC), turbidity, and chemical oxygen demand (COD) were higher during the deficit water period and soluble reactive phosphorus (SRP) values during the excess water period.

Instead, no clear trends were found regarding the association with the spatial distribution of the sampling sites along the watersheds. This research might be useful for decision-making related to water resource management, as certain parameters exceed locally established thresholds.

Keywords: Pampean streams, land use, water quality, biosphere reserve.

Recibido: 30/04/2024

Aceptado: 05/09/2024

Publicado *ahead of print*: 17/09/2024

Versión final: 01/09/2025

Introducción

Los arroyos pampeanos se encuentran en la región central de Argentina y se caracterizan por tener pendientes menores al 0.1 %, lo cual está asociado con bajas velocidades de corriente (Graziano, Giorgi, & Feijoó, 2021); esto genera que las redes de drenaje y los límites de cuencas usualmente no estén bien definidos (Zabala *et al.*, 2021). En esta región es frecuente la ocurrencia de largos periodos de sequía y de inundaciones, lo que afecta la disponibilidad del recurso hídrico (Aliaga, Piccolo, & Perillo, 2021). A su vez, la intensidad de estos eventos hidrológicos menoscaba la composición y distribución de las sustancias químicas disueltas, así como la calidad del agua (Placencia, Torres-Ramírez, Ortiz-Riquero, & Jerez-Ruiz, 2021). A pesar de existir una relativa homogeneidad en

diversas características, el tipo de suelo podría determinar los usos posibles en cada subregión, los cuales tienen impactos variables en las cuencas en relación con aspectos tales como la hidrología, la química del agua y la morfología de los cursos, así como las poblaciones de invertebrados, peces y algas, entre otros (Feijoó & Lombardo, 2007). Por ejemplo, los residuos generados por los sistemas de producción animal están relacionados principalmente con sus excretas y pueden contener elevados contenidos de materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes, entre otros (Delgado, Mac Donagh, Casco, Tanjal, & Carol, 2023b). La agricultura, a su vez, a partir de la aplicación de fertilizantes y pesticidas, puede favorecer la introducción de nutrientes y diversos agroquímicos en los cuerpos de agua adyacentes, para producir, entre otros efectos, una alteración de la diversidad de especies que los habitan (Solís *et al.*, 2016; Marrochi *et al.*, 2021).

El Programa MAB (*Man and Biosphere*) de la UNESCO promueve el establecimiento de un tipo particular de áreas protegidas: las reservas de biosfera. Estas son, por definición, territorios destinados a llevar adelante propuestas que conjuguen la protección ambiental con el desarrollo socioeconómico y el respeto a la diversidad cultural (Toribio & Soruco-de-Madrado, 2005). Para conservar esta categoría de protección, los territorios se comprometen a cumplir con las funciones de conservación, desarrollo y logística (investigación, monitoreo y educación ambiental) establecidas en la Estrategia de Sevilla (UNESCO, 1995). En este sentido, resulta fundamental la generación de conocimientos que ayuden a interpretar la relación entre las actividades productivas desarrolladas y el estado de los ecosistemas que las sostienen. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es caracterizar las cuencas hidrográficas dentro de la

Reserva de Biosfera Parque Costero del Sur (en adelante, RBPCS), a fin de aportar al desarrollo de una interpretación conceptual del funcionamiento hidrológico en este territorio. Para ello se realizó un estudio de características morfométricas, usos del suelo, condiciones hidrológicas y parámetros representativos de la calidad del agua. Los principales arroyos identificados en el área pertenecen a la Vertiente Inferior del Río de la Plata (ADA, s.f.). Si bien se han hallado referencias bibliográficas para algunas características de estos arroyos, en algunos casos la información requiere actualización y, en otros es escasa. Por lo tanto, resulta necesario generar un conjunto de datos actualizados sobre las cuencas de la RBPCS que puedan ser utilizados para el desarrollo de investigaciones en la zona, así como para el diseño de políticas públicas de gestión y conservación de los recursos naturales a escala local.

Actualmente se considera a la cuenca hidrográfica como la unidad espacial básica indispensable para estudiar la función ambiental de los recursos naturales y su dinámica (Traba, 2023), con fines de conservación y manejo; se define como el territorio delimitado por los escurrimientos superficiales que convergen a un mismo cauce (Medina, 2008). A su vez, se considera que brinda escenarios multidimensionales y multifuncionales, ideales para promover la investigación transdisciplinar (Jujnovsky *et al.*, 2017). Comprender los posibles efectos de los procesos de cambio de uso del suelo y cobertura vegetal sobre la hidrología es esencial para la gestión a escala de cuenca (Woldesenbet, Elagib, Ribbe, & Heinrich, 2017). Si bien en los últimos años se han publicado numerosos trabajos científicos caracterizando cuerpos de agua afectados por actividades agrícolas y/o urbanizaciones, el estado de conservación de cuencas que aún no han sido alcanzados por estos usos no está

suficientemente documentado (Mac Donagh, Delgado, Merodio, & Carol, 2019).

Materiales y métodos

En la Figura 1 se describen los pasos seguidos para el desarrollo de la presente investigación mediante un diagrama de flujo. En las siguientes subsecciones se detalla el procedimiento realizado en cada uno de ellos.

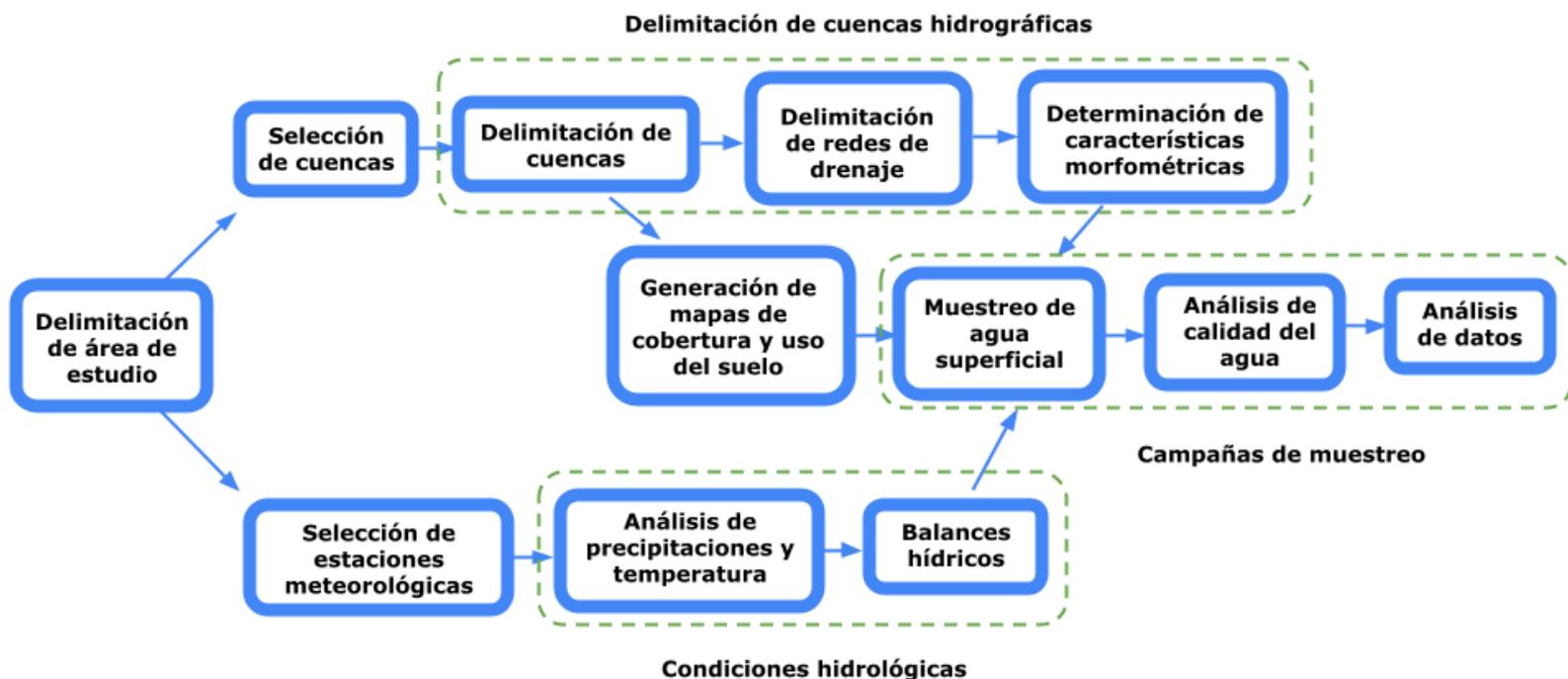


Figura 1. Diagrama de flujo de los pasos seguidos en la investigación.

Delimitación del área de estudio

El estudio se centra en la RBPCS (Figura 2), área protegida que abarca el sector costero de los partidos de Magdalena y Punta Indio, provincia de Buenos Aires (Argentina), que limita hacia el oeste por la Ruta Provincial N° 36. Constituye una muestra representativa de un paisaje de la costa de la provincia de Buenos Aires, y es relevante como patrimonio arqueológico y por su potencial educativo, turístico y recreativo (Matteucci, 2009). De acuerdo con el Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas del año 2022, Magdalena y Punta Indio cuentan con 26 734 y 12 419 habitantes, respectivamente (INDEC, 2023).

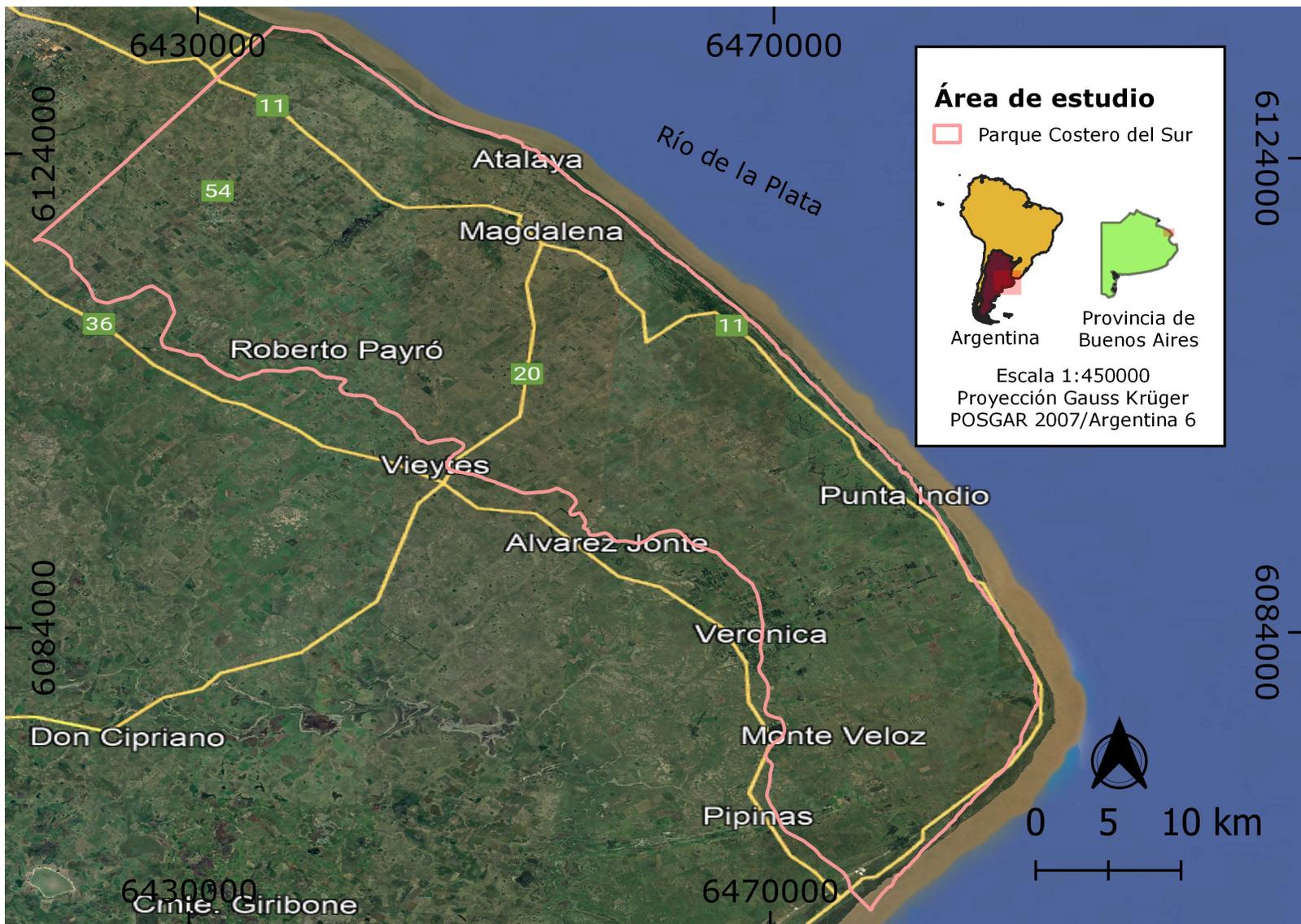


Figura 2. Delimitación del área de estudio.

Este territorio se ubica en la Pampa Ondulada y se puede diferenciar en unidades de planicie continental y costera (esta última formada por tres unidades geomorfológicas principales: llanura de marea relicta, planicie con cordones litorales y marisma), entre las que se reconoce un área de transición caracterizada como una antigua franja costera. La

planicie continental abarca las cuencas altas y medias de los arroyos que drenan hacia la planicie costera (Cellone, 2019). El diseño de los cursos es de tipo dendrítico, y se trata de pequeñas cuencas que drenan en dirección al Río de la Plata y la bahía de Samborombón. En la planicie costera se evidencian modificaciones del comportamiento hidrológico natural, principalmente a partir de la actividad minera y el desarrollo de obras como canalizaciones, rutas y terraplenes. En esta área, los arroyos poseen carácter efluente respecto a las aguas subterráneas; la descarga del escurrimiento subterráneo local es la que posibilita el mantenimiento del caudal (Melo, 2019).

Los suelos de la región pampeana correspondientes a los partidos de La Plata, Magdalena y Punta Indio se encuentran representados por vertisoles con horizonte Bt (hapludertes), argiudoles vérticos y típicos, y paleudoles (Imbellone, Giménez, & Panigatti, 2010). En la llanura continental, la presencia de perfiles arcillo-limosos dificulta la infiltración del agua de lluvia (Cellone, Deluchi, Melo, & Carol, 2014). En la llanura de marea relictas hay suelos pobremente drenados de elevada alcalinidad (Melo, 2019), mientras que en los cordones de conchilla los suelos son poco profundos, con incipiente desarrollo, alta permeabilidad y bien drenados (Cavallotto, 2009). Las características físicas de los suelos en el área de estudio, las frecuentes inundaciones y la erosión hídrica determinan que la misma posea baja capacidad de uso agrícola, que se destina fundamentalmente a ganadería (Viglizzo, Pordomingo, Castro, & Lertora, 2003). Otras actividades relevantes en la zona son la minería de conchilla y el turismo. Además existen tambos, *feedlots*, frigoríficos, criaderos de cerdos y aves (Cellone, 2019), y campos destinados a la agricultura en pequeña escala.

Dentro del conjunto de arroyos que atraviesan la RBPCS se seleccionaron tres casos de estudio —Buñirigo, Juan Blanco y Villoldo— con la intención de comparar cuencas con diferente grado de alteración antrópica. El arroyo Buñirigo recibe influencias de distintos usos del suelo a lo largo de su recorrido: la cuenca alta se caracteriza por un uso ganadero extensivo, sumado al desarrollo de algunas actividades agrícolas. En cambio, en la cuenca media, este curso recibe el aporte de desagües pluviales de la ciudad de Magdalena, y en la cuenca baja los de una pequeña zona industrial (Mac Donagh *et al.*, 2019), en la cual se hallan plantas de los rubros curtiembre, alimenticio y metalúrgico. La mayor parte de la cuenca del arroyo Juan Blanco presenta ganadería extensiva (Paracampo, 2012), junto a algunos sectores de agricultura y establecimientos tipo *feedlot*, aunque se lo considera esencialmente un ambiente prístino (Ocón & Rodrigues-Capítulo, 2012; Melo, 2019). El arroyo Villoldo representa un grado de alteración intermedio por atravesar una zona poblada de baja densidad. En la cabecera de esta cuenca se encuentra la Base Aeronaval de Punta Indio (BAPI) y en la cuenca baja (cerca de la RP11) canteras para la extracción de conchilla.

Delimitación de cuencas hidrográficas

Para la elaboración de la cartografía se utilizó el sistema POSGAR 2007/Argentina 6 y el *software* QGIS. La delimitación de las cuencas se realizó automáticamente a partir de un modelo digital de elevación (MDE) Alos Palsar, de resolución espacial de 12.5 m. Se descargó una capa vectorial de límites de cuencas del portal de Infraestructura de Datos Espaciales de la provincia de Buenos Aires (IDEBA), y se utilizó para

comparar y corregir los polígonos generados automáticamente. La delimitación de la red de drenaje se hizo integrando capas vectoriales de cursos de agua disponibles en IDEBA y en el Instituto Geográfico Nacional (IGN); imágenes satelitales (*Google Satellite*), y cartas topográficas del IGN (1:50000). Se determinaron características morfométricas de medición directa, como área de ocupación (A), perímetro (P) y longitud del cauce (L), que a su vez se utilizaron para calcular el factor de forma, el coeficiente de circularidad y la pendiente (ecuaciones (1) a (3)).

Factor de forma de Horton (Kf):

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

Coeficiente de circularidad de Miller (Cc):

$$Cc = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2)$$

Pendiente (S%):

$$S\% = \frac{(H_M - H_m) * 100}{L} \quad (3)$$

Donde:

H_M = altitud mayor en metros.

H_m = altitud menor en metros.

Dado que los tres arroyos desembocan en el Río de la Plata, se estableció un valor de H_m igual a 0 en todos los casos. Para determinar los valores de H_M se utilizaron las cartas topográficas del IGN. Se buscó incluir al menos un parámetro morfométrico perteneciente a cada una de las siguientes categorías: parámetros de forma (factor de forma y coeficiente de circularidad); parámetros de relieve (pendiente), y parámetros de la red de drenaje (número de orden). El orden de la cuenca se determinó mediante el método de Horton (1945).

Mapas de cobertura y uso del suelo

Para elaborar los mapas de cobertura y uso del suelo para cada cuenca se utilizaron imágenes satelitales disponibles en el explorador Google Earth Pro, capturadas en diferentes fechas de 2023. Se realizó un análisis visual, utilizando como referencia una capa ráster de usos del suelo generada a partir del satélite Sentinel 2 (ESRI, 2022) y un mapa de elaboración propia, generado previamente a partir de imágenes del satélite Landsat 8 (OLI). Se definieron siete tipos de cobertura y uso del suelo: pasturas (incluye a la producción ganadera extensiva, o sin uso reconocible); cultivos (suelos destinados a la agricultura); forestal (predominio de cobertura arbórea); canteras de conchilla (sectores destinados a la extracción de minerales); industrial (incluye diferentes rubros); producción intensiva (abarca tambos, criaderos de aves y *feedlots*), y urbano (asentamientos poblacionales no dispersos). Con base en la información satelital, utilizada en conjunto con la mencionada cartografía disponible, y con el apoyo de información recabada en las

campañas de muestreo, se generó una capa clasificada de acuerdo con los tipos de cobertura y uso del suelo previamente descritos.

Condiciones hidrológicas

El análisis de las precipitaciones para el periodo 1963-2023 se realizó a partir de datos registrados en dos estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN): Punta Indio ($35^{\circ} 20' 53''$ S, $57^{\circ} 17' 40''$ O) y La Plata Aero ($34^{\circ} 57' 56''$ S, $57^{\circ} 53' 50''$ O), las cuales se encuentran a una distancia aproximada de 70 km entre sí. Para determinar la viabilidad del uso de los datos disponibles se calculó el porcentaje de datos faltantes para el periodo temporal de interés en cada estación meteorológica, el cual luego se comparó con los estándares establecidos en la Guía de Prácticas Climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (OMM, 2018). Además se realizó un análisis de doble masa a fin de evaluar la consistencia de los datos provistos por estas estaciones meteorológicas y analizar la necesidad de aplicar algún factor de corrección (OMM, 2018). Se graficaron las precipitaciones anuales acumuladas en la estación Punta Indio en función de aquellas registradas en La Plata Aero, se hizo un ajuste lineal, y se evaluó el valor de la pendiente obtenida y el grado de ajuste a una recta de estos datos. A partir de datos diarios de precipitación se calculó la media mensual para cada estación, a fin de determinar el tipo de régimen que caracteriza a esta zona. Se llevaron a cabo balances hídricos mensuales basados en la metodología de Thornthwaite y Mather (1957), utilizando como capacidad máxima de almacenamiento el valor de 100 mm de acuerdo con Cellone (2019) y Melo (2019). Asimismo, se realizó un balance diario para el

periodo septiembre 2022-septiembre 2023, con el propósito de interpretar la relación entre la variación de las condiciones climáticas y la calidad del agua durante los muestreos.

Campañas de muestreo

Para evaluar escenarios hidrológicos contrastantes (Delgado *et al.*, 2023b) se realizaron dos campañas de muestreo de agua superficial incluyendo un periodo de déficit hídrico en verano (febrero 2023) y un periodo de exceso hídrico en invierno (agosto 2023). Los sitios de muestreo (Figura 3) incluyeron sectores en la cuenca alta, media y baja, cuya elección estuvo sujeta a la accesibilidad y a la presencia de agua en el cauce al momento de realizar las campañas. En el verano solo fue posible muestrear en la cuenca baja (y en el caso del arroyo Buñirigo, también en la cuenca media) debido a que la mayor parte de los cursos se encontraba seco aguas arriba. La recolección, preservación y análisis de las muestras (Tabla 1) se efectuó de acuerdo con los métodos estándar para análisis de aguas y efluentes (APHA, 2012). Las determinaciones de temperatura, pH y conductividad eléctrica fueron *in situ*, con una sonda multiparamétrica Hanna HI9828. Para la cuantificación de los restantes parámetros fisicoquímicos se tomaron muestras en botellas de polietileno y se midieron por duplicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, con excepción del cromo total, que se midió en un laboratorio privado. Para los métodos colorimétricos se utilizaron espectrofotómetros Hach DR1900 y Chrom Tech UV-1800 (en función del paso óptico requerido). La turbidez se determinó mediante un turbidímetro Hanna HI93703. Para la determinación de los parámetros

microbiológicos (enterococos y *Escherichia coli*) se tomaron muestras en envases estériles, las cuales se analizaron en el Laboratorio de Microbiología del Instituto de Limnología "Dr. Raúl A. Ringuelet" (ILPLA). El cromo total se cuantificó únicamente en la cuenca del arroyo Buñirigo durante el muestreo de invierno; resultó de interés por tratarse de un elemento utilizado en los procesos de curtido del cuero (Leather Working Group, s.f.).

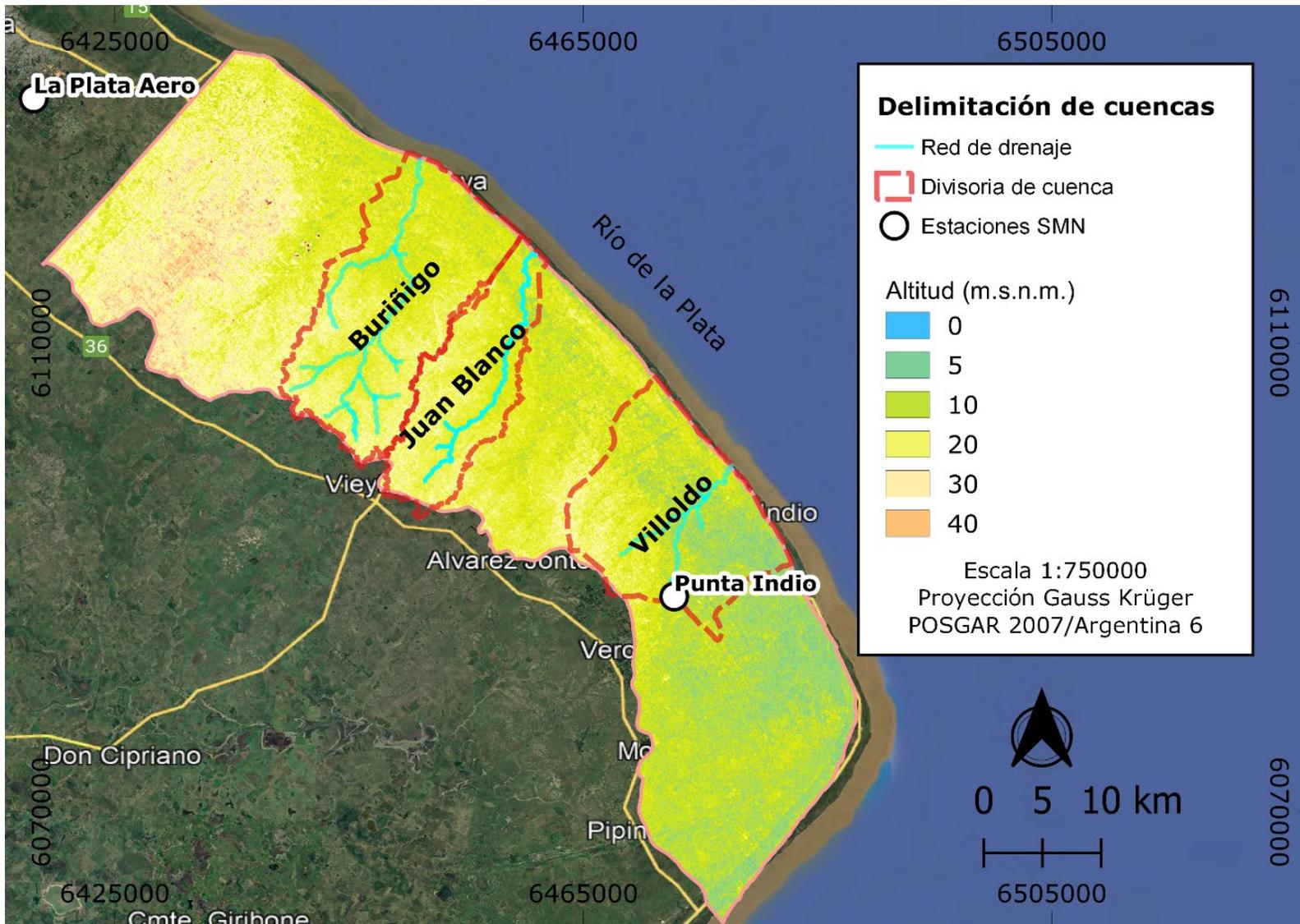


Figura 3. Delimitación de las cuencas y redes de drenaje de los arroyos estudiados sobre un modelo digital de elevación (MDE).

Tabla 1. Métodos seleccionados para el análisis de calidad de agua.

Parámetro	Método
<i>E. coli</i>	Cultivo en medio CHROMAgar™ ECC
Enterococos	Cultivo en medio Slanetz & Bartley y Agar Bilis Esculina
Temperatura (T)	Sonda multiparamétrica Hanna HI9828
pH	
Conductividad eléctrica (CE)	
Turbidez	Turbidímetro Hanna HI93703
Fósforo reactivo soluble (PRS)	Colorimétrico/ 4500 P E
Nitrato (NO ₃ ⁻)	Electrodo selectivo Hanna HI 4113/ Tiras reactivas Hach
Sólidos suspendidos totales (SST)	Método por pesada / 2540-D
Demanda química de oxígeno (DQO)	Oxidación con K ₂ Cr ₂ O ₇ / 5220-DQO D
Cromo total (Cr)	EAA- EPA SW 846 M 7190

Análisis de datos

El análisis estadístico de los datos generados se realizó con el lenguaje R. Para estudiar la relación entre los diferentes parámetros de calidad de agua se calcularon los coeficientes de correlación entre los mismos, y se analizó su signo y magnitud. Se interpretó su significancia estadística a partir de los *p*-valores correspondientes; se consideraron significativos aquellos menores a 0.05. Para comparar los resultados de las campañas de muestreo se hizo un test binomial: partiendo de la hipótesis de que

para un mismo sitio las concentraciones de todos los parámetros serían mayores en el muestreo de verano (debido al efecto de concentración ocasionado por la sequía extraordinaria), se consideraron como casos de “éxito” aquellos parámetros cuya media en verano resultó mayor que la correspondiente en invierno. Se calculó la proporción de casos exitosos y luego la probabilidad de obtener dicha proporción bajo la hipótesis nula de que la estación no produciría cambios en las concentraciones, por lo cual las medias serían mayores o menores en verano con respecto al invierno de manera azarosa. Se excluyó del análisis a las variables temperatura y cromo; en el primer caso, esto se debe a que su valor mayor en verano no puede relacionarse con diferencias en las condiciones hidrológicas y, en el segundo caso, a que solo se midió en invierno en el arroyo Buñirigo. En forma análoga, para analizar la existencia de diferencias entre los arroyos se realizaron test binomiales, comparándolos de a pares: teniendo en cuenta los diferentes grados de antropización de las cuencas, se partió de la hipótesis de que las concentraciones de los parámetros siguen el orden Buñirigo > Villoldo > Juan Blanco. Por lo tanto, se consideraron casos exitosos aquellos en los cuales la concentración siguió esta tendencia, y se repitió el procedimiento mencionado para la comparación entre campañas de muestreo. Dado que durante las jornadas de muestreo se observaron personas pescando y bañándose en los arroyos, se compararon los resultados de los análisis con los valores guía establecidos por la Resolución 42/06 para uso recreativo de la Autoridad del Agua de la provincia (ADA, 2006). En el caso del cromo, se tomó el límite establecido por el Decreto 831/93 de la Ley Nacional de Residuos Peligrosos para protección de la vida acuática (PEN, 1993).

Resultados

Delimitación de cuencas hidrográficas

La demarcación del límite de cuenca (Figura 3) permitió determinar las características morfométricas indicadas en la Tabla 2. En el caso del arroyo Villoldo, se consideró que el resultado obtenido a partir del MDE no se ajustaba a la realidad, por lo que se utilizó el polígono de IDEBA. Para los arroyos Juan Blanco y Buñirigo, se observó un buen grado de concordancia entre la cuenca delimitada a partir del MDE y la obtenida de IDEBA en la zona alta y media, mientras que en la cuenca baja fue necesario aplicar correcciones. Las cotas donde comienzan a hacerse permanentes los cursos de agua fueron de 16, 13 y 12 msnm para los arroyos Buñirigo, Juan Blanco y Villoldo, respectivamente.

Tabla 2. Características morfométricas de las cuencas estudiadas.

Cuenca	Área (km ²)	Longitud (km)	Perímetro (km)	Kf	Cc	S%	Orden
Buñirigo	228.2	28.7	113.2	0.23	0.22	0.057	3
Juan Blanco	149.0	24.2	102.8	0.28	0.18	0.054	2
Villoldo	226.0	13.5	65.4	1.24	0.66	0.089	2

Kf = factor de forma de Horton.

Cc = coeficiente de circularidad de Miller.

S% = pendiente de la cuenca (porcentual).

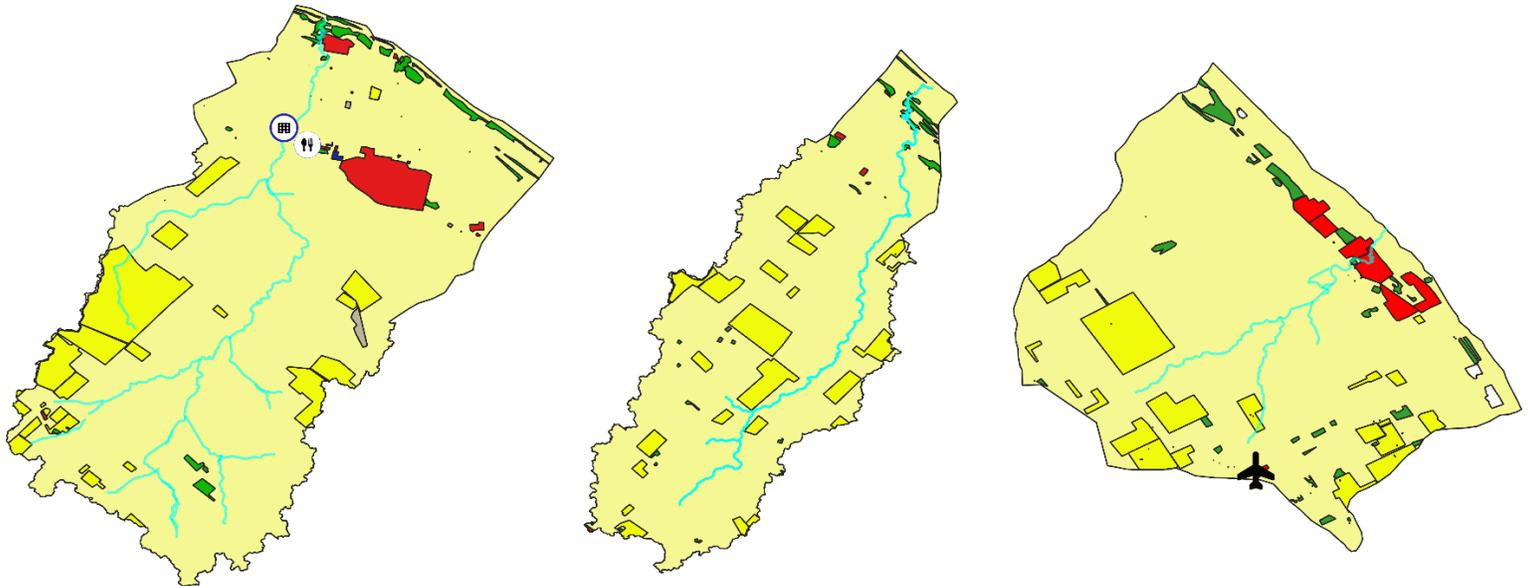
Mapas de cobertura y uso del suelo

La determinación de la cobertura y el uso del suelo a nivel de cuenca (Figura 4) permitió establecer, a partir del porcentaje de ocupación de cada categoría, la predominancia de las pasturas en las tres cuencas (promedio 86.4 %), secundadas por los cultivos (promedio 9.9 %), con un mínimo porcentaje en las categorías de uso forestal y urbano (valores menores al 3 %). Estas dos últimas se encuentran fundamentalmente en la cuenca media/baja. Los usos industrial, producción intensiva y canteras se identificaron en sitios puntuales, con porcentajes menores al 0.3 % del área en todos los casos.

Buñirigo

Juan Blanco

Villoldo



Mapa de usos del suelo

- Base Aeronaval
- Curtiembre
- Industria alimentaria
- Cantera
- Cultivos
- Forestal
- Industrial
- Pasturas
- Producción intensiva
- Urbano
- Red de drenaje

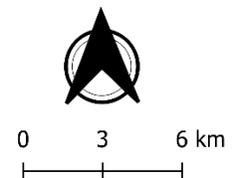


Figura 4. Mapa de usos del suelo por cuenca, 2023.

Condiciones hidrológicas

En la estación La Plata Aero hubo 22 meses sin registro de datos, lo cual equivale a un 2.9 % de información faltante. En cambio, en la estación Punta Indio hubo 16 meses sin registros, lo que representa un 2.1 % de

los datos. Teniendo en cuenta la Guía de prácticas climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2018), se considera que estos porcentajes son lo suficientemente bajos como para que el análisis de las condiciones climáticas en el periodo estudiado sea confiable. El análisis de doble masa arrojó una pendiente de 0.88 y un coeficiente de determinación R^2 de 0.9993. No se visualizaron puntos de quiebre en la recta, por lo tanto los datos provistos por el SMN se consideraron válidos y se utilizaron sin aplicar correcciones.

En las Figuras 5a y 5b se muestran los balances hídricos mensuales para el periodo 1963-2023. Las precipitaciones se distribuyen a lo largo de todo el año en ambos casos. Se trata de un régimen bimodal, con máximos a fines del verano (febrero/marzo) y en primavera (octubre/noviembre), y mínimos en junio. Las reservas en La Plata Aero se mantuvieron en su valor máximo entre mayo y noviembre, y disminuyeron en el verano. En Punta Indio, en cambio, estas se mantuvieron entre junio y noviembre, con un descenso más marcado para los meses de enero a marzo. En las Figuras 5c y 5d se muestran los balances hídricos diarios para el periodo septiembre 2022-septiembre 2023. Se puede observar que los eventos de precipitación registrados para ambas estaciones fueron escasos y de baja magnitud entre septiembre de 2022 y abril de 2023 (con excepción de algunas jornadas), y un posterior aumento a partir de finales de este último mes, que se traduce en el incremento en las reservas para el periodo junio-septiembre.

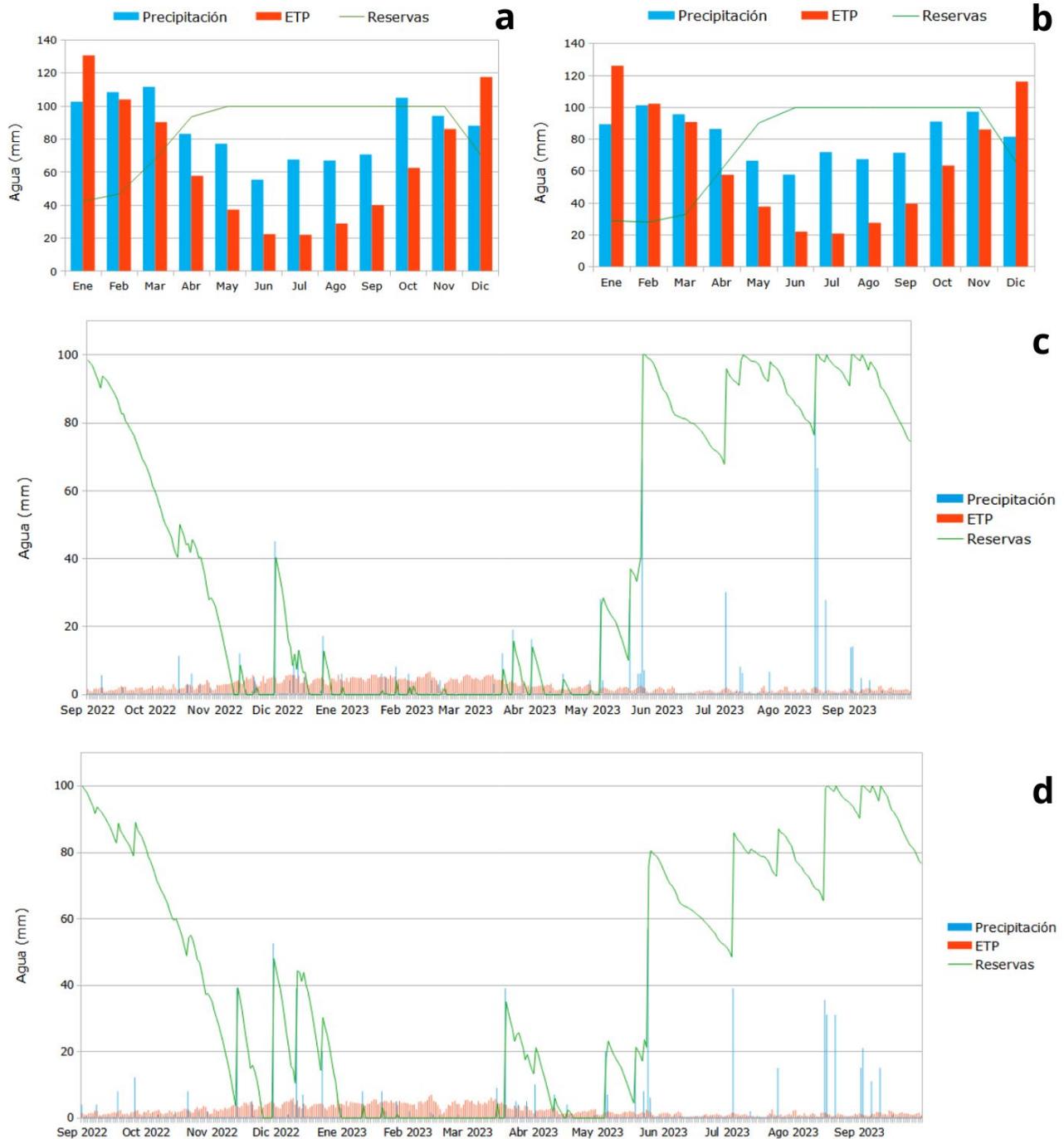


Figura 5. Balances hídricos mensuales para el periodo 1963-2023: a) La Plata Aero; b) Punta Indio. Balances hídricos diarios para el periodo septiembre 2022-septiembre 2023: c) La Plata Aero; d) Punta Indio.

Campañas de muestreo

En la Figura 6 se muestra el mapa con la ubicación de los sitios de muestreo. En la Tabla 3 se exponen los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos correspondientes a cada sitio, los valores medios con su desvío estándar para cada campaña y los límites locales establecidos para los diferentes parámetros.

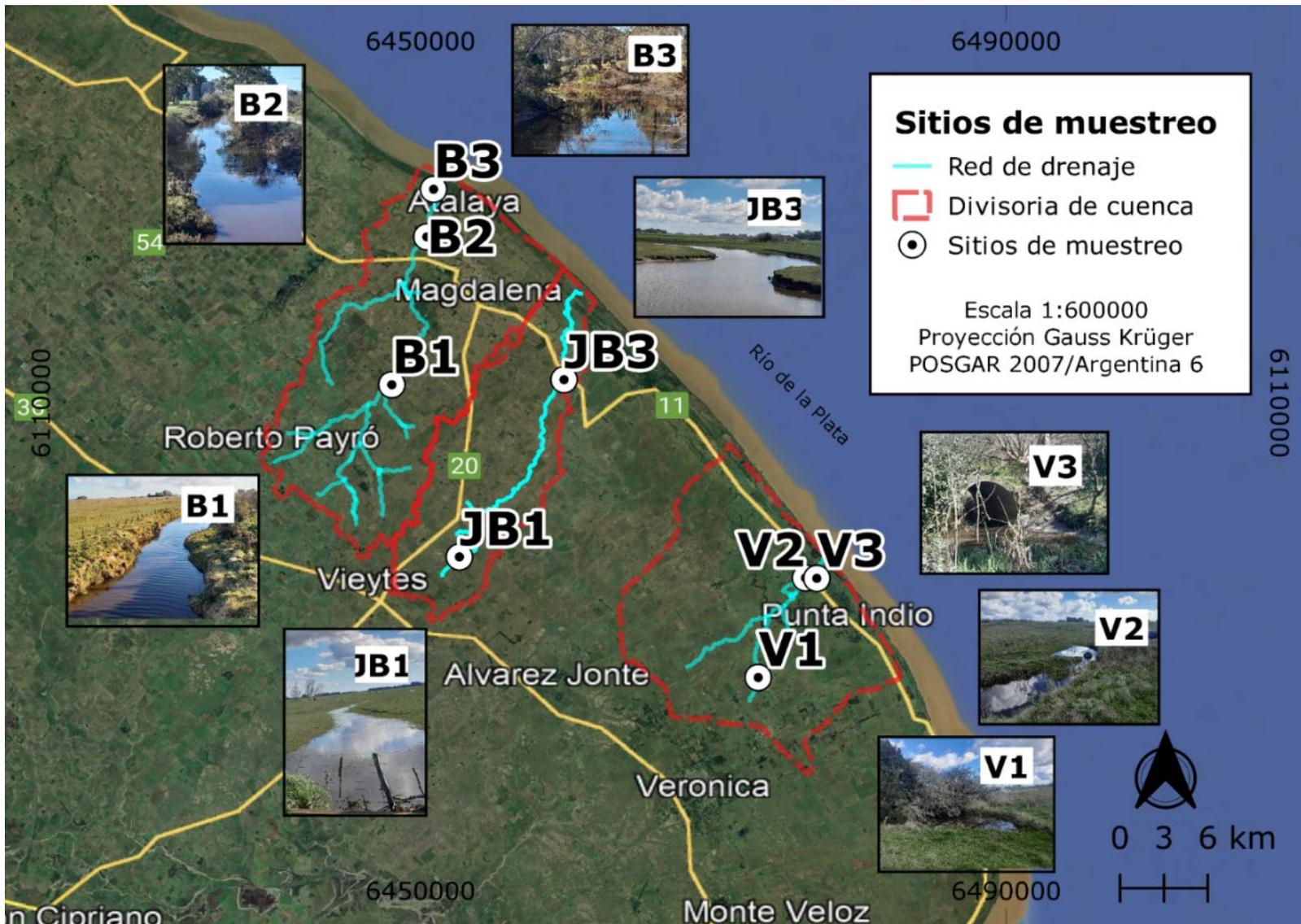


Figura 6. Ubicación de los sitios de muestreo de agua superficial.

Referencias: B: Buñirigo; V: Villoldo; JB: Juan Blanco.

Tabla 3. Valores de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en los sitios de estudio.

Parámetro	Campaña	V1	V2	V3	JB1	JB3	B1	B2	B3	Media	Límite
<i>E. coli</i> (UFC/100 ml)	Verano	-	-	690	-	150	-	3300	560	1175 ± 1435	126 ^a
	Invierno	10	40	10	39	900	540	70	70	210 ± 330	
Enteroc. (UFC/100 ml)	Verano	-	-	60	-	10	-	490	130	173 ± 217	33 ^a
	Invierno	0	130	130	10	490	230	50	90	141 ± 159	
T (°C)	Verano	-	-	23.3	-	27.5	-	31.9	29.1	27.9 ± 3.6	-
	Invierno	11.9	13.8	10.3	17.7	12.6	14.9	13.3	12.6	13.4 ± 2.2	
pH	Verano	-	-	7.31	-	8.62	-	8.06	8.01	8.00 ± 0.54	6.5-8.5 ^a
	Invierno	7.43	7.61	7.74	8.06	7.80	7.98	7.39	7.52	7.69 ± 0.25	
CE (µS/cm)	Verano	-	-	5454	-	440	-	14980	6583	6 864 ± 6 033	-
	Invierno	164	171	140	116	80	206	406	721	251 ± 214	
Turbidez (NTU)	Verano	-	-	170.00	-	71.00	-	26.26	76.00	85.82 ± 60.41	100 ^a
	Invierno	4.73	16.00	11.50	3.25	8.49	8.12	7.53	7.46	8.39 ± 3.96	
PRS (mg/l)	Verano	-	-	0.06	-	0.02	-	0.04	0.03	0.04 ± 0.02	0.025 ^{*a}
	Invierno	0.06	0.09	0.14	0.16	0.15	0.09	0.44	0.45	0.20 ± 0.16	
NO ₃ ⁻ (mg/l)	Verano**	-	-	2-5	-	>50	-	2-5	>50	-	125 ^a
	Invierno	4.29	2.60	13.20	2.94	2.57	2.23	2.44	16.40	5.83 ± 5.64	
SST (mg/l)	Verano	-	-	167	-	300	-	83	53	151 ± 111	-
	Invierno	15	117	75	6	30	32	42	53	46 ± 36	
DQO (mg/l)	Verano	-	-	116	-	106	-	159	470	213 ± 173	-
	Invierno	41	57	48	38	29	71	54	25	45 ± 15	
Cr (mg/l)	Verano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.002 ^b
	Invierno	-	-	-	-	-	DNC	0.006	0.016	-	

*Fósforo total; **Medido con tiras reactivas Hach, rango 0-50 mg/l; DNC: detectado no cuantificable; ^a: Res. 42/06 ADA (ADA, 2006); ^b: Decreto 831/93 (PEN, 1993).

Se observa que los valores de pH son similares entre sí, y tuvieron baja variabilidad tanto entre cuencas como entre condiciones hidrológicas. Para el caso de la conductividad eléctrica (CE), la turbidez, los sólidos suspendidos totales (SST) y la demanda química de oxígeno (DQO) la situación es muy contrastante entre ambos muestreos, y se presenta para un mismo sitio (cuando se dispuso de muestra en verano y en invierno) siempre un valor mayor en verano. En cuanto al contenido de nutrientes, se encuentran diferencias entre el comportamiento del fósforo y del nitrógeno. En todos los casos en que se pudieron tomar muestras en las dos campañas, la concentración de fósforo reactivo soluble (PRS) fue mayor en invierno. Respecto del nitrato (NO_3^-), los resultados indican un valor mínimo en la cuenca baja del Buñirigo en invierno, y un máximo superior a los 50 mg/l en la cuenca baja de los arroyos Juan Blanco y Buñirigo en el verano. Por último, los parámetros microbiológicos variaron ampliamente entre los sitios de muestreo y, para cada sitio, entre ambas campañas. Respecto de *E. coli*, se observa el mínimo en invierno en la cuenca alta del Villoldo y el máximo en la cuenca media del Buñirigo en verano; mientras que los enterococos presentan el mínimo en el invierno en la cuenca baja del Villoldo y el valor máximo tanto en la cuenca media del Buñirigo en verano como en la cuenca baja del Juan Blanco en invierno.

Análisis de datos

En la Tabla 4 se muestran los coeficientes de correlación entre las variables medidas. En color verde se indican las correlaciones significativas positivas (p -valor menor a 0.05); en color celeste, aquellas

con tendencia no significativa positiva; y en color rosa, las de tendencia no significativa negativa (p -valor entre 0.05 y 0.1). Los coeficientes que se asocian con correlaciones significativas son, en su totalidad, de signo positivo y corresponden a los pares: *E. coli*-enterococos, *E. coli*-T, *E. coli*-CE, T-CE, T-DQO, pH-NO₃⁻, turbidez-SST y NO₃⁻-DQO.

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre las variables medidas.

	<i>E. coli</i>	Enter.	T	pH	CE	Turbidez	PRS	NO ₃ ⁻	SST	DQO
<i>E. coli</i>	1									
Enter.	0.77	1								
T	0.62	0.18	1							
pH	0.22	0.16	0.56	1						
CE	0.90	0.50	0.78	0.15	1					
Turbidez	0.11	-0.19	0.57	-0.04	0.35	1				
PRS	-0.31	-0.17	-0.52	-0.46	-0.34	-0.39	1			
NO ₃ ⁻	-0.15	-0.26	0.53	0.60	0.07	0.33	-0.25	1		
SST	0.00	-0.21	0.48	0.43	0.08	0.59	-0.35	0.53	1	
DQO	0.25	0.05	0.69	0.28	0.53	0.43	-0.40	0.66	0.08	1

Enter.: enterococos; verde: correlación significativa positiva; celeste: correlación con tendencia positiva; rosa: correlación con tendencia negativa.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los test binomiales para comparar los resultados de los análisis de calidad de agua entre campañas de muestreo, así como entre los diferentes arroyos estudiados. La media de todos los parámetros, con excepción del PRS, resultó mayor en verano que en invierno. Considerando 8 de 9 casos exitosos, se obtuvo un p -

valor de 0.0195, por lo que se puede afirmar que existen diferencias significativas en las concentraciones de los parámetros entre las campañas. La comparación de estas concentraciones entre arroyos no mostró diferencias significativas en ningún caso, con p -valores por encima de 0.05 (aunque sí se identifica una tendencia en la comparación entre los arroyos Buñirigo y Villoldo).

Tabla 5. Resultados de los test binomiales.

Hipótesis	Proporción de casos exitosos	Intervalo de confianza	p -valor
Verano > invierno	0.89	(0.5709-1.0000)	0.0195
B > V	0.78	(0.4504-1.0000)	0.0898
B > JB	0.56	(0.2514-1.0000)	0.5000
V > JB	0.33	(0.0977-1.0000)	0.9102

B: Buñirigo; V: Villoldo; JB: Juan Blanco.

El análisis del comportamiento dentro de una misma cuenca permitió visualizar ciertos patrones en forma preliminar, pues debe tenerse en cuenta que durante la campaña de verano no pudieron tomarse muestras en la cuenca alta de los arroyos bajo estudio. En el muestreo de invierno, el arroyo Villoldo presenta valores de pH que se incrementan levemente hacia la desembocadura. Por su parte, en el caso de la CE, turbidez, SST y DQO, los valores aumentan en la cuenca media, para luego disminuir hacia la desembocadura. En cuanto a los nutrientes, sus valores presentan un incremento en la desembocadura tanto el NO_3^- como el PRS. En el único sitio con que se cuenta en el muestreo de verano para este arroyo, los valores encontrados de CE, turbidez, SST y DQO

fueron muy superiores a los valores de invierno, invirtiéndose la tendencia notoriamente en el caso de los nutrientes.

Respecto de la cuenca del arroyo Juan Blanco, solo se pudo contar con dos sitios de muestreo: uno en la cuenca alta (muestreo de invierno) y uno en la cuenca baja (ambos muestreos). Al analizar el muestreo de invierno, se observa que tanto el pH, la CE y la DQO, así como los nutrientes, disminuyeron hacia la cuenca baja, mientras que la turbidez y los SST aumentaron en esa dirección. Al comparar los resultados entre verano e invierno (cuenca baja), se observa que en todos los casos los valores disminuyeron al pasar a la condición de exceso hídrico, a excepción del PRS, el cual se incrementa de 0.02 a 0.15 mg/l. En cuanto a las determinaciones microbiológicas, en esta cuenca se observa un incremento notorio en la cantidad de colonias de *E. coli* y enterococos desde la cuenca alta hasta la baja y, a su vez, desde el muestreo de verano hasta el de invierno.

Por último, al analizar la cuenca del arroyo Buñirigo respecto del muestreo de invierno, el pH disminuyó hacia la cuenca media para luego incrementarse levemente hacia la desembocadura. A su vez, se observa una marcada disminución hacia la desembocadura en la DQO, mientras que la CE y los SST aumentaron aguas abajo. La misma tendencia se aprecia en el comportamiento de los nutrientes, con un notable incremento desde la cuenca alta hasta la media para el PRS, mientras que para el NO_3^- el salto se da entre la cuenca media y la baja. Comparando ambos muestreos, se observa que los niveles de los parámetros fisicoquímicos fueron mayores en el muestreo de verano que en el de invierno, en tanto que el PRS fue mucho mayor en los sitios medidos en invierno. Microbiológicamente se destaca un notorio incremento en la

cantidad de colonias, tanto de *E. coli* como de enterococos, en el muestreo de verano, principalmente en la cuenca media. La concentración de cromo total aumentó hacia la desembocadura; en B1 es detectado no cuantificable (límite de detección: 1 $\mu\text{g/l}$, límite de cuantificación: 4 $\mu\text{g/l}$); en B2, 6 $\mu\text{g/l}$; y en B3, 16 $\mu\text{g/l}$.

En relación con el cumplimiento de la normativa establecida para uso recreativo, los valores de PRS en todos los puntos se hallaron por encima del valor límite, excepto por JB3 en verano. Aquí se consideró el valor de 0.025 mg/l (expresado como fósforo total), ya que para PRS no hay un límite establecido en la legislación local. Por su parte, los parámetros microbiológicos exceden los límites en todos los casos, excepto V1 y JB1 durante el muestreo de invierno. En cambio, la mayoría de los valores de pH, turbidez y nitrato se encontraron dentro de sus respectivos rangos permitidos. En el caso del cromo, las muestras B2 y B3 estaban por encima del límite establecido para la protección de la vida acuática en agua dulce (0.002 mg/l).

Discusión

La delimitación de cuencas basada en la topografía permite una buena aproximación en las zonas más elevadas (cuenca alta), pero no resulta apropiada para las cercanías a las desembocaduras, donde la pendiente es prácticamente nula. Esto puede deberse a dos motivos: la resolución del MDE utilizado no es suficiente para un área de llanura como la estudiada (Moges *et al.*, 2023), o bien la existencia de canalizaciones u otras intervenciones antrópicas que modifican los cursos naturales generan que la red de drenaje actual no siga el patrón esperado para un

sistema no intervenido (Lima, Da Silva, Rocha, & Silveira, 2022; Ferreira, Zacharias, Silva-Cardozo, & Magalhães-Fonseca, 2023). Como ejemplos, en el caso del arroyo Buñirigo, un tramo de la cuenca media está rectificadado (Melo, 2019), y existen canalizaciones del curso principal en la cuenca baja de los arroyos Juan Blanco y Villoldo (IGN, s.f.).

La respuesta de una cuenca frente a determinado evento de precipitación está estrechamente ligada con sus características morfométricas. Por ejemplo, conocer el área de una cuenca resulta de gran relevancia para su caracterización, pues es uno de los parámetros utilizados como *input* en numerosos modelos hidrológicos (Cañibano, Sastre-Vázquez & D'Andrea, 2016). A su vez, la correcta delimitación del área de una cuenca se torna fundamental a la hora de diseñar estrategias de manejo de dicho territorio. Las áreas reportadas para las cuencas de los arroyos Buñirigo y Juan Blanco son 223 y 126 km², respectivamente (Melo, 2019). En el primer caso se obtuvo un valor similar en este estudio, mientras que para el arroyo Juan Blanco se obtuvo una diferencia por exceso. Para el arroyo Villoldo no se encontraron referencias en la bibliografía. Por su parte, el perímetro resulta de utilidad para, en conjunto con el área, determinar parámetros de forma de las cuencas. El factor de forma permite tener una noción de cuán alargada es una cuenca. Un valor de K_f superior a la unidad indica una tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa, formando fácilmente grandes crecidas (Horton, 1945). En este caso, los valores de K_f menores a 0.3 para las cuencas del Buñirigo y Juan Blanco se pueden asociar con una forma alargada; en cambio, la cuenca del Villoldo, con un valor de 1.24, puede caracterizarse como ensanchada, con una tendencia a la ocurrencia de inundaciones. El coeficiente de circularidad toma valores menores o

iguales a 1, acercándose al máximo cuando la forma de la cuenca es redonda, y disminuyendo cuando es más alargada o irregular. Su valor es similar para el Buñirigo y el Juan Blanco (0.22 y 0.18, respectivamente), indicando una forma alargada; mientras que para el Villoldo el valor obtenido de 0.66 sugiere una forma más redondeada. Este parámetro aporta información sobre la eficiencia del drenaje: cuencas más circulares tienden a drenar más eficientemente que cuencas alargadas, lo que puede influir en la rapidez con que se evacua el agua. La pendiente calculada es baja en las tres cuencas, siendo menor al metro por kilómetro, lo cual justificaría las dificultades halladas para establecer el límite de cuenca en cercanía de la desembocadura. Este resultado es razonable para arroyos de llanura como los estudiados. El orden de la cuenca permite alcanzar un mejor conocimiento de la complejidad y el desarrollo del sistema de drenaje. En el caso del arroyo Buñirigo, el valor calculado coincide con lo reportado por Cellone *et al.* (2014); no se encontró un valor de referencia para los otros dos casos.

Se localizaron antecedentes de estudios de usos del suelo realizados en la zona a distintas escalas espaciales. Según la encuesta agropecuaria de 1970/71, en las cuencas de la franja costera del Río de la Plata, el 82 % de la superficie correspondía a pastoreo natural y el 10 % a cultivos (Mugni, 2009). Ocón y Rodrigues-Capítulo (2012) se centran en el Partido de Magdalena, donde las actividades predominantes son la ganadería (70 % del área) y la agricultura extensiva (22 % del área). Mugni (2009) estudió la cuenca del arroyo Juan Blanco, la cual presenta principalmente ganadería extensiva, con un porcentaje de superficie cultivada del 14 %. Estos valores son coherentes con los porcentajes hallados en este trabajo. Si bien en términos de superficie las actividades urbano/industriales son

relativamente pequeñas, su influencia en sectores rurales sobre la calidad de los cuerpos de agua superficiales puede ser importante (Peluso *et al.*, 2023).

En cuanto al análisis de los registros pluviométricos, la precipitación media anual para el periodo 1963-2023 fue 1 028.4 mm para La Plata Aero y 974.8 mm para Punta Indio, valores esperables para una zona húmeda como la estudiada (Coriale, Casado, Casarino, & Flores, 2013). Estos resultados hacen suponer un incremento en las precipitaciones en las últimas décadas, ya que en estudios previos (Sala, 1972) se expone para el periodo 1921-1950 un valor anual medio de 902 mm. Por otro lado, en cuanto a la precipitación media mensual, la ocurrencia de los mínimos (junio) y máximos (marzo) para dicho periodo es coincidente con lo expresado en el presente trabajo para la estación La Plata Aero (Figura 5a), mientras que difiere parcialmente con la estación Punta Indio (Figura 5b), donde el máximo ocurre en febrero.

La campaña de muestreo en verano se realizó en el contexto de una sequía extrema (la más severa desde 1944) asociada con el fenómeno climático conocido como “La Niña”, que afectó a la cuenca Paraná/del Plata en general, y a esta región en particular (Naumann *et al.*, 2023). Tal situación se produjo entre noviembre de 2020 y mayo de 2023, cuando se dio un punto de quiebre, que contribuyó a recuperar parte de la recarga de agua. Ello se evidenció en la falta de agua en los sectores altos y medios de las cuencas, y se puede observar en el balance hidrológico para el periodo septiembre 2022-septiembre 2023 (Figuras 5c y 5d). Este efecto ha sido documentado también en cuencas vecinas, como la del arroyo El Pescado (Delgado *et al.*, 2023a).

Los valores de pH medidos en ambas campañas coinciden con los reportados en distintos estudios realizados en estos arroyos (Tangorra, Ocón, & Rodrigues-Capítulo, 2000; Feijoó, Giorgi, García, & Momo, 1999; Ocón & Rodrigues Capítulo, 2012; Solís *et al.*, 2016). Para diferentes arroyos de esta región se encontraron niveles elevados de nutrientes, incluso en sitios con actividad agrícola ganadera moderada o baja (Feijoó *et al.*, 1999; Bauer *et al.*, 2002). La escasa pendiente de los arroyos incrementa la probabilidad de eutrofización en ecosistemas lóticos, así como la interacción entre el agua superficial y subterránea, por lo que los nutrientes podrían ingresar a los cuerpos de agua por escorrentía superficial o por descarga desde el acuífero (Delgado *et al.*, 2023b).

Algunas de las correlaciones significativas entre los parámetros de calidad de agua halladas en este trabajo han sido reportadas en bibliografía, como los casos turbidez-SST (Solís, 2016), pH-NO₃⁻ (Heredia *et al.*, s.f.), *E. coli*-enterococos y NO₃⁻-DQO (El Najjar *et al.*, 2019). La temperatura presenta correlaciones significativas o con tendencia con la mayoría de los parámetros, lo cual se puede asociar con las diferencias entre las campañas de muestreo, que se discuten a continuación.

El test realizado para comparar la calidad del agua entre campañas —bajo la hipótesis de que los niveles de todos los parámetros fueron mayores en verano que en invierno— resultó significativo (Tabla 5, *p*-valor = 0.0195). El cambio en las condiciones hidrológicas tuvo distintos efectos sobre la calidad del agua superficial. La CE medida en algunos sitios en el muestreo de verano estuvo muy por encima de los valores reportados, lo cual se podría vincular con la extrema sequía que caracterizó el periodo estival. Paracampo (2012) realizó campañas de muestreo en tres sectores del arroyo Buñirigo, en forma análoga al

presente trabajo. En esa experiencia se registró una tendencia al aumento de la CE, el contenido de sólidos suspendidos, la turbidez y la concentración de nutrientes durante el descenso del nivel de agua. Por el contrario, en el presente estudio los niveles de PRS disminuyeron en todos los sitios en verano, para lo cual se encontraron dos posibles explicaciones. Una, de acuerdo con Feijoó y Lombardo (2007), podría ser por el aumento de la biomasa de macrófitas en verano y el consecuente consumo de nutrientes. Alternativamente, podría deberse a una mayor escorrentía superficial producida por el aumento de las precipitaciones en invierno, la cual representaría una fuente adicional de ingreso de nutrientes a los cuerpos de agua (Feijoó *et al.*, 2023). Esto contribuiría a justificar el incremento de los valores de PRS, especialmente en la cuenca del arroyo Buñirigo, respecto de los otros dos arroyos, dada su ubicación geográfica más próxima a la estación La Plata (Figura 3), considerando que entre el 16 y 17 de agosto, 11 días antes del muestreo de invierno, se registró una precipitación de 155.1 mm en La Plata y 66.5 mm en Punta Indio.

Los test realizados para comparar la calidad del agua entre arroyos no resultaron significativos en ningún caso (Tabla 5, *p*-valores de 0.0898, 0.5000 y 0.9102), lo cual se traduce en una dificultad para identificar tendencias en las concentraciones en relación con la ubicación de los sitios de muestreo, así como para comparar los resultados obtenidos con otros reportados en bibliografía. Esto podría deberse a que, como es sabido, los constituyentes químicos en los cuerpos de agua reaccionan de una manera mucho más compleja que si estuvieran aislados, y es justamente esa múltiple interacción la que define la calidad de agua de un determinado sistema (Saalidong, Aram, Otu, & Lartey, 2022).

Tangorra, Ocón y Rodrigues-Capítulo (2000) reportan valores de DQO por encima de 130 mg/l para el sector medio del arroyo Buñirigo, que puede relacionarse con las industrias cercanas a dichos puntos, lo cual coincide con nuestro muestreo de verano. En cambio, en el invierno, los valores de este parámetro fueron menores (con el valor más alto en la cuenca alta) y coincidentes con los rangos reportados en Ocón y Rodrigues-Capítulo (2012). En Mugni (2009) y Solís *et al.* (2016) se llevaron a cabo muestreos en un punto coincidente con JB3. Mientras que los valores de CE, SST y PRS coinciden dentro de sus respectivos rangos, los valores de NO_3^- medidos en este trabajo superan ampliamente lo reportado allí. Ocón y Rodrigues-Capítulo (2012) midieron la DQO para este punto, coincidiendo el rango con el valor medido en invierno y estando por debajo del valor hallado en nuestro muestreo de verano. Resulta relevante destacar que a unos 1.2 km de este punto se encuentra un pequeño *feedlot*, ya que el ingreso de NO_3^- por descomposición de excretas en áreas de cría intensiva de ganado representa uno de los mayores impactos negativos en la calidad del agua de cuencas rurales y periurbanas (Delgado *et al.*, 2023b). Los mayores valores de NO_3^- del muestreo de invierno se hallaron en las cuencas bajas de los arroyos Buñirigo y Villoldo (16.4 y 13.2 mg/l, respectivamente). Este hecho podría asociarse con la ausencia de cloacas en las localidades que atraviesan (Punta del Indio y Atalaya, respectivamente), o al vuelco de efluentes industriales en el caso del arroyo Buñirigo, pues en el resto de los puntos los valores resultaron menores, y en su mayoría no se trata de zonas con actividad agrícola o ganadera intensiva. Otra posible explicación podría ser el aporte de aguas subterráneas al arroyo, que se da en las cuencas bajas de estos arroyos (Delgado *et al.*, 2023b). A su vez, se destaca el

elevado valor de este nutriente en el muestreo de verano (mayor a 50 mg/l) en la cuenca baja de los arroyos Buñirigo y Juan Blanco, lo cual podría corresponderse con lo expresado por Sadayappan, Kerins, Shen y Li (2022) en relación con que el aumento de la temperatura y la reducción del flujo pueden contribuir a incrementar el contenido de nitrato, incluso sin aportes humanos adicionales de nutrientes.

Al considerar las características microbiológicas en ambos muestreos, se evidencia que en la mayoría de los tramos el agua de los arroyos no sería apta para uso recreativo. En el caso de JB3, en invierno se observaron valores particularmente altos, lo cual podría asociarse con su cercanía al *feedlot* ya mencionado. En cuanto al contenido de cromo en el arroyo Buñirigo, los puntos B2 y B3 no cumplen con la normativa para la protección de la vida acuática. Si bien se observó la presencia de fauna en el arroyo durante la jornada de muestreo, se desconocen los impactos ecosistémicos actuales y futuros que podría ocasionar la exposición crónica a este elemento tóxico en concentraciones por encima de los niveles recomendados, así como el posible efecto en la salud de la población humana expuesta. Por tal motivo, estos resultados fueron presentados ante la autoridad competente, a fin de aplicar los protocolos establecidos para el control de la contaminación en cuerpos de agua en la provincia. No se hallaron estudios previos en los cuales se haya determinado la concentración de cromo en agua en el arroyo Buñirigo.

Conclusiones

En este trabajo se realizó una caracterización hidroambiental de las cuencas de los arroyos Buñirigo, Juan Blanco y Villoldo, ubicadas dentro del territorio de la RBPCS (Buenos Aires, Argentina). Esto incluyó el estudio de características morfométricas, usos del suelo, condiciones hidrológicas y calidad de agua. Se determinó para cada cuenca su área, perímetro, longitud, factor de forma de Horton, coeficiente de circularidad de Miller y pendiente, y se compararon con valores de referencia hallados en bibliografía (en los casos en que estos se encontraban disponibles). Se realizó un mapeo de los usos del suelo y destacó la predominancia de las pasturas en las tres cuencas, seguidas por los cultivos. El análisis de las precipitaciones mensuales de los últimos 60 años (periodo 1963-2023) permitió reconocer un régimen bimodal, con máximos a fines del verano y en primavera, y mínimos en invierno. En tanto que el análisis de las precipitaciones diarias (septiembre 2022-septiembre 2023) evidenció el escaso volumen registrado entre septiembre de 2022 y abril de 2023, en consonancia con la sequía ocasionada por el fenómeno La Niña en la región. Las dos campañas de muestreo realizadas en condiciones de déficit y exceso hídrico permitieron analizar las relaciones existentes entre los parámetros de calidad medidos y la ubicación espacial de los sitios de muestreo, y entre los parámetros de calidad y las condiciones hidrológicas existentes. En el primer caso no se encontraron asociaciones claras, mientras que sí se hallaron diferencias significativas en las concentraciones de los parámetros entre campañas de muestreo. En particular, en todos los sitios donde se pudo tomar muestra en ambas condiciones hidrológicas se midieron mayores valores de CE, turbidez y

DQO durante el periodo de déficit, y de PRS durante el periodo de exceso hídrico. Resulta relevante mencionar la imposibilidad de tomar muestras en las cuencas media y alta durante la campaña de verano debido a la ausencia de agua en el cauce, lo cual constituye una limitación del presente trabajo. Se plantea a futuro realizar nuevas campañas de muestreo, que permitan analizar diferencias estacionales en un año menos atípico en relación con las precipitaciones. Por otra parte, en este estudio se tomaron muestras en tres áreas por cuenca (alta, media y baja), con la intención de generar información representativa de cada una de ellas. En próximas investigaciones se plantea estudiar cada cuenca con mayor grado de detalle (escala de subcuenca), e intensificar la red de muestreo con la incorporación de nuevos sitios. A su vez, si bien se considera que los diferentes aspectos estudiados contribuyen a la interpretación del funcionamiento hidrológico de las cuencas seleccionadas, para poder conocerlo en profundidad es necesario realizar un análisis hidrológico, a fin de considerar el impacto del uso de suelo, las características edáficas y las condiciones climatológicas, entre otras variables.

Los resultados de los análisis de calidad de agua evidencian que los límites establecidos en la normativa local para uso recreativo y protección de la vida acuática han sido sobrepasados en varias ocasiones, sobre todo en lo concerniente a parámetros microbiológicos, contenido de PRS y cromo. Este aspecto resulta no menor, considerando que los arroyos estudiados se encuentran dentro de un área protegida, donde son utilizados con diferentes fines.

Si bien se encontró una amplia bibliografía respecto de los arroyos Buñirigo y Juan Blanco, para el arroyo Villoldo fue escasa la información

disponible. Por ello, se considera que los datos reportados en este trabajo representan un aporte valioso para investigaciones futuras en esta última cuenca, y a su vez brindan datos actuales sobre las otras dos. Estos resultados podrían ser utilizados en estudios que aborden el desarrollo de modelizaciones hidrológicas, incluyendo áreas clave como el transporte de sedimentos, nutrientes y contaminantes, así como la investigación de los posibles servicios hidrológico-ambientales brindados por dichas cuencas. Asimismo, los resultados alcanzados servirán como referencia para realizar estudios en otras cuencas bonaerenses con características similares a las seleccionadas en este artículo.

Dada la importancia de la conservación de los ecosistemas en una zona protegida como la estudiada, se torna necesario implementar estrategias de monitoreo sistemático de variables hidroambientales, a fin de poder hacer un seguimiento del estado de los cuerpos de agua a lo largo del año, y puntualmente frente a eventos extremos. Si bien este tipo de acciones no se están implementando en la actualidad, se considera que el desarrollo de investigaciones como la presentada en estas páginas podría ser útil para las autoridades locales involucradas en la gestión del recurso, pues contribuiría a la generación de información actualizada y a la posterior elaboración de proyecciones en relación con la respuesta del sistema frente a determinados eventos hidrológicos, o bien modificaciones antrópicas vinculadas con el cambio de uso del suelo. A su vez, el monitoreo de variables ambientales resulta necesario para cumplir con las exigencias inherentes a la categoría de protección de este territorio como reserva de biosfera.

Agradecimientos

Al ILPLA por su acompañamiento y seguimiento en los muestreos. Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet) y al Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (Foncyt), por financiar la beca doctoral de la primera autora, y los diferentes proyectos en los que se enmarca el presente trabajo. Al doctor Federico Barrera Lemarchand por su asesoramiento para el análisis estadístico de los datos de calidad de agua.

Referencias

- ADA, Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires. (27 de enero, 2006). *Resolución 42/2006. Valores de referencia de calidad del agua*. Recuperado de <https://normas.gba.gob.ar/documentos/xk2zYAIA.html>
- ADA, Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires. (s.f.). *Atlas cuencas y regiones hídricas-ambientales de la provincia de Buenos Aires*. Recuperado de https://www.ada.gba.gov.ar/web_doc/gis/Atlas%20Cuencas%20-%20Etapa%20I.pdf
- Aliaga, V. S., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2021). Surface water extent dynamics from three periods of continuous Landsat time series; subregional differences across Argentine plains. *Revista de Teledetección*, 58, 131-145. DOI: 10.4995/raet.2021.14263
- APHA, American Public Health Association. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22nd ed.). Washington, DC, USA: American Public Health Association.

- Bauer, D. E., Donadelli, J., Gómez, N., Licursi, M., Ocón, C. S., Paggi, A. C., Rodríguez, A., & Tangorra, M. (2002). Ecological status of the Pampean plain streams and rivers (Argentina). *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 28, 259-262. DOI: 10.1080/03680770.2001.11902584
- Cañibano, A., Sastre-Vázquez, P., & D'Andrea, R. (2016). Área y perímetro para la caracterización de formas. *Revista Suma*, 83, 25-32. Recuperado de https://revistasuma.fespm.es/sites/revistasuma.fespm.es/IMG/pdf/s83-25-area_y_perimetro.pdf
- Cavallotto, J. L. (2009). Caracterización e historia evolutiva del sustrato sobre el que se desarrollan los talares del nordeste bonaerense. En: J. Athor (ed.). *Parque Costero del Sur. Naturaleza, conservación y patrimonio cultural* (pp. 66-81). Buenos Aires, Argentina: Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Cellone, F., Deluchi, M., Melo, M., & Carol, E. (2014). *Interacción entre los usos de la tierra y los recursos hídricos en la cuenca del arroyo Buñirigo, Argentina*. II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Argentina.
- Cellone, F. (2019). *Evaluación de los recursos hídricos en un sector de la planicie costera del Río de La Plata* (tesis doctoral). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/73330>

- Coriale, O., Casado, J., Casarino, G., & Flores, S. (2013). *Disponibilidades hídricas en la República Argentina como fuente de aprovisionamiento de agua potable*. XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje, Buenos Aires, Argentina.
- Delgado, M. I., Besteiro, S. I., Mac Donagh, M. E., Casco, M. A., Gorbarán, R. S., Di Lello, C. V., Lacunza, E., Consoli, P., Angheben, E., & Carol, E. S. (2023a). *Impacto del déficit hídrico en un arroyo efluente de la región pampeana*. XXVII Congreso Nacional del Agua. Buenos Aires, Argentina.
- Delgado, M. I., Mac Donagh, M. E., Casco, M. A., Tanjal, C., & Carol, E. S. (2023b). Nutrient dynamics in water resources of productive flatland territories in the Pampean region of Argentina: Evaluation at a watershed scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 236. DOI: 10.1007/s10661-022-10838-7
- El Najjar, P., Kassouf, A., Probst, A., Probst, J., Ouaini, N., Daou, C., & El Azzi, D. (2019). High-frequency monitoring of surface water quality at the outlet of the Ibrahim River (Lebanon): A multivariate assessment. *Ecological Indicators*, 104, 13-23. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.061
- ESRI. (2022). *Sentinel-2 10 m land use/land cover timeseries downloader*. Recuperado de <https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2>

- Feijoó, C., Giorgi, A., García, M. E., & Momo, F. (1999). Temporal and spatial variability in streams of a Pampean basin. *Hydrobiologia*, 394, 41-52. DOI: 10.1023/A:1003583418401
- Feijoó, C., & Lombardo, R. (2007). Baseline water quality and macrophyte assemblages in Pampean streams: A regional approach. *Water Research*, 41, 1399-1410. DOI: 10.1016/j.watres.2006.08.026
- Feijoó, C., Hegoburu, C., Messetta, M. L., Guerra-López, J. R., Rigacci, L. N., Anselmo, J., Di Franco, L. A., & Marcé, R. (2023). Acidification and increase of phosphorus levels in Pampean streams after 12 years of agricultural intensification. *Aquatic Sciences*, 85:85. DOI: 10.1007/s00027-023-00983-7
- Ferreira, A., Zacharias, A., Silva-Cardozo, F., & Magalhães-Fonseca, B. (2023). Anthropogenic changes to the fluvial landscape of São João Del-Rei, Minas Gerais, Brazil. *Sociedade & Natureza*, 35, 66435. DOI: 10.14393/SN-v35-2023-66435x
- Graziano, M., Giorgi, A., & Feijoó, C. (2021). Multiple stressors and social-ecological traps in Pampean streams (Argentina): A conceptual model. *Science of the Total Environment*, 765, 142785. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142785
- Heredia, O. S., Comese, R. V., Zubillaga, M. S., Chirckes, J. D., Graziano, A. L., & Pagano, D. (s.f.). *Caracterización físico química de las aguas superficial y subterránea de Pergamino (Bs. As.)*. Recuperado de <https://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje2/2.17.pdf>

- Horton, R. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2
- IGN, Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). *Capas SIG-hidrografía y oceanografía-canales*. Recuperado de <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- Imbellone, P., Gimenez, J., & Panigatti, J. (2010). *Suelos de la región Pampeana: procesos de formación*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- INDEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2023). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Resultados provisionales*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Recuperado de https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/poblacion/cnphv2022_resultados_provisionales.pdf
- Jujnovsky, J., Ramos, A., Caro-Borrero, A., Mazari-Hiriart, M., Maass, M., & Almeida-Leñero, L. (2017). Water assessment in a peri-urban watershed in Mexico City: A focus on an ecosystem services approach. *Ecosystem Services*, 24, 91-100. DOI: 10.1016/j.ecoser.2017.02.005
- Leather Working Group. (s.f.). *JBS Leather Argentina, S.A.* Recuperado de <https://www.leatherworkinggroup.com/get-involved/our-community/certified-suppliers/jbs-leather-argentina-s-a-jbs120/>

- Lima, C., Da Silva, M. V., Rocha, S., & Silveira, C. (2022). Anthropogenic changes in land use and land cover and their impacts on the hydrological variables of the São Francisco River Basin, Brazil. *Sustainability*, 14, 12176. DOI: 10.3390/su141912176
- Mac Donagh, M. E., Delgado, M. I., Merodio, C., & Carol, E. (2019). *Variación espacial de la biomasa fitoplanctónica y parámetros de la calidad del agua en un arroyo pampeano con distintos impactos antrópicos*. X Congreso de Ecología y Manejo de Ecosistemas Acuáticos Pampeanos, Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Marrochi, M. N., Hunt, L., Solís, M., Scalise, A. M., Fanelli, S. L., Bonetto, C., & Mugni, H. (2021). Land-use impacts on benthic macroinvertebrate assemblages in Pampean streams (Argentina). *Journal of Environmental Management*, 279, 111608. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111608
- Matteucci, S. (2009). Cambios del uso de la tierra en el entorno de la Reserva de la Biosfera Parque Costero del Sur, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Fronteras*, 8, 51-56. Recuperado de https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/150883/CONICE_T_Digital_Nro.47a3a9b5-f520-4abf-8b67-5d12b3d13553_A.pdf
- Medina, M. (2008). Las cuencas hidrográficas internacionales: sistemas reservorio de agua dulce para la cooperación o el conflicto. *Sapiens. Revista Universitaria de Investigación*, 9(2), 153-165. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41011837009>

- Melo, M. (2019). *Geohidrología de la planicie costera del Río de la Plata medio, Partido de Magdalena* (tesis doctoral). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/73324>
- Moges, D. M., Virro, H., Kmoch, A., Cibin, R., Rohith, A. N., Martínez-Salvador, A., Conesa-García, C., & Uuemaa, E. (2023). How does the choice of DEMs affect catchment hydrological modeling? *Science of the Total Environment*, 892, 164627. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164627
- Mugni, H. (2009). *Concentración de nutrientes y toxicidad de pesticidas en aguas superficiales de cuencas rurales* (tesis doctoral). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Naumann, G., Podestá, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Acosta-Navarro, J., Arias-Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Cuartas, L. A., De Estrada, M., De Felice, M., De Jager, A., Escobar, C., Fioravanti, G., Giordano, L., Hraast-Essenfelder, A., Hidalgo, C., Leal-De-Moraes, O. L., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Osman, M., Rossi, L., Seluchi, M., De-Los-Milagros-Skansi, M., Spennemann, P., Spinoni, J., Toreti, A., & Vera, C. (2023). *Extreme and long-term drought in the La Plata Basin: Event evolution and impact assessment until September 2022*. Luxembourg, Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: 10.2760/62557

- Ocón, C., & Rodrigues-Capítulo, A. (2012). Assessment of water quality in temperate-plain streams (Argentina, South America) using a multiple approach. *Ecología Austral*, 22, 81-91. Recuperado de https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1251
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2018). *Guía de prácticas climatológicas*. Recuperado de https://library.wmo.int/viewer/28514/download?file=100-2018_es.pdf&type=pdf&navigator=1
- Paracampo, A. (2012). *Toxicidad de pesticidas, ensambles de peces y su relación con las características limnológicas en arroyos pampeanos* (tesis doctoral). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/31476>
- Peluso, M. L., Demetrio, P. M., Bernasconi, C., Aprigliano, N., Riviello-López, G., Abelando, M., & Rimoldi, F. (2023). ¿Existe una relación entre la calidad de los cursos de aguas superficiales asociadas a los paisajes rurales y el nivel y el tipo de antropización en la zona de influencia? *Ecología Austral*, 33, 821-838. DOI: 10.25260/EA.23.33.3.0.2023
- PEN, Poder Ejecutivo Nacional. (23 de abril, 1993). *Decreto 831/1993. Residuos peligrosos. Reglamentación de La ley 24.051*. Recuperado de <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/10000-14999/12830/norma.html>

- Placencia, J. A., Torres-Ramírez, P., Ortiz-Riquero, J., & Jerez-Ruiz, R. (2021). Temporal and spatial changes in surface water chemistry in a Mediterranean river of central Chile: The case of the Mataquito river ($\sim 35^{\circ}\text{S}$). *Tecnología y ciencias del agua*, 14(2), 300-336. DOI: 10.24850/j-tyca-14-02-08
- Saalidong, B. M., Aram, S. A., Otu, S., & Lartey, P. O. (2022). Examining the dynamics of the relationship between water pH and other water quality parameters in ground and surface water systems. *PLOS ONE*, 17(1), e0262117. DOI: 10.1371/journal.pone.0262117
- Sadayappan, K., Kerins, D., Shen, C., & Li, L. (2022). Nitrate concentrations predominantly driven by human, climate, and soil properties in US rivers. *Water Research*, 226, 119295. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119295
- Sala, J. M. (1972). *Contribución al estudio geohidrológico del noreste de la provincia de Buenos Aires*. Buenos Aires, Argentina: Comité de Estudios de Aguas Subterráneas del Noreste de la provincia de Buenos Aires (EASNE), Consejo Federal de Inversiones (CFI).
- Solís, M. (2016). *Impacto de agroquímicos en arroyos de cuencas rurales* (tesis doctoral). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/58758>
- Solís, M., Mugni, H., Hunt, L., Marrochi, N., Fanelli, S., & Bonetto, C. (2016). Land use effect on invertebrate assemblages in Pampasic streams (Buenos Aires, Argentina). *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(9), 539. DOI: 10.1007/s10661-016-5545-3

Tangorra, M., Ocón, C., & Rodrigues-Capítulo, A. (2000). *Aplicación de índices bióticos en cuerpos lóticos pampásicos*. XVIII Congreso Nacional del Agua, Santiago del Estero, Argentina.

Thornthwaite, C., & Mather, J. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. New Jersey, USA: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology.

Traba, L. A. (2023). Humedales y gobernanza ambiental como enfoque para su planificación-gestión. Estado de situación en la Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 14(5), 01-53. DOI: 10.24850/j-tyca-14-05-01

Toribio, A., & Soruco-de-Madrado, C. (2005). *Las instituciones académicas y su contribución al desarrollo sustentable*. Buenos Aires, Argentina: Theomai, Red Internacional de Estudios sobre Sociedad, Naturaleza y Desarrollo. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12420824011>

UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (1995). *Aplicación de la Resolución 27 C/2.3, Estrategia de Sevilla para las reservas de biosfera y Marco estatutario de la red mundial de reservas de biosfera*. París, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Recuperado de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000101325_spa

- Viglizzo, E., Pordomingo, A., Castro, M., & Lertora, F. (2003). Environmental assessment of agriculture at a regional scale in the pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 87, 169-195. DOI: 10.1023/A:1024654316879
- Woldesenbet, T. A., Elagib, N. A., Ribbe, L., & Heinrich, J. (2017). Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 575, 724-741. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.124
- Zabala, M. E., Gorocito, M., Dietrich, S., Varni, M., Sánchez-Murillo, R., Manzano, M., & Cebollas, E. (2021). Key hydrological processes in the Del Azul Creek basin, sub-humid Pampean Plain. *Science of the Total Environment*, 754, 142258. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142258