

## Distribucion espacial de isótopos estables (18O y 2H): vínculos entre precipitaciones, aguas superficiales y subterráneas e incidencia geomorfológica en una planicie mal drenada, Córdoba (Argentina)

*Spatial distribution of stable isotopes (18O and 2H): links between precipitation, surface and groundwater and geomorphological impact in a poorly drained plain, Cordoba, Argentina*

Miguel Pascuini<sup>1</sup>; Adriana Cabrera<sup>2</sup>; Monica Blarasin<sup>3</sup>; Becher Quinodóz Fatima<sup>4</sup>; Lutri Veronica<sup>5</sup>; Matteoda Edel<sup>6</sup>; Giacobone Daniela<sup>7</sup>; Pramparo Santiago<sup>8</sup>; Schroeter German<sup>9</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba – Argentina, mpascuini@exa.unrc.edu.ar

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba – Argentina, acabrera@exa.unrc.edu.ar

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba – Argentina, mblarasin@exa.unrc.edu.ar

<sup>4</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba – Argentina, fbecher@exa.unrc.edu.ar

<sup>5</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba – Argentina, vlutri@exa.unrc.edu.ar

<sup>6</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba – Argentina, ematteoda@exa.unrc.edu.ar

<sup>7</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba – Argentina, dgJacobone@exa.unrc.edu.ar

<sup>8</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba – Argentina, spramparo@exa.unrc.edu.ar

<sup>9</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba – Argentina, pschroeter@exa.unrc.edu.ar

### Recibido:

02 de octubre de 2024

### Recibido en formato de revisión:

18 de marzo de 2025

### Aceptado:

28 de marzo de 2025

### Disponible en línea:

27 de mayo de 2025

### Sección:

Artículos

### Palabras-claves:

Aquífero.

Isótopos.

Planicie.

Isoscape.

Geomorfología.

### Keywords:

Aquifer.

Isotopes.

Plain.

Isoscape.

Geomorphology.

<https://doi.org/10.14295/ras.v39i1.30291>



### RESUMEN

El objetivo de este estudio es establecer las relaciones entre la distribución espacial de la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas con los factores geomorfológicos y las precipitaciones, utilizando técnicas isotópicas, en la zona urbana y rural de Canals, ubicada en un sector de la Llanura Pampeana, en la provincia de Córdoba, Argentina. El drenaje en la región es moderadamente impedido, destacándose la presencia de dunas y cubetas de deflación con lagunas. El acuífero libre presente está compuesto por arenas finas y muy finas. Las interconexiones hidráulicas fueron evaluadas mediante metodología hidrogeológica convencional y análisis de isótopos estables del agua ( $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ). La hidrodinámica y la geoquímica indican que el acuífero presenta flujos de diferentes jerarquías, tanto locales como intermedios procedentes de aguas arriba. Las relaciones hidráulicas, geoquímicas e isotópicas están influenciadas por factores morfolitológicos, la profundidad del nivel freático y la actividad antrópica (sistemas de saneamiento in situ, agricultura y ganadería intensiva, entre otras). Los resultados isotópicos sugieren agua de origen local, con recarga principalmente durante las estaciones de verano y otoño y en menor medida en primavera, además de llegada de flujos de mayor jerarquía procedente de tierras más altas ubicadas al Oeste de la localidad fuera del área de estudio.

### ABSTRACT

The aim of this study is to establish the relationships between the spatial distribution of the isotopic composition of surface and groundwater with geomorphological factors and precipitation, using isotopic techniques, in the urban and rural area of Canals, located in a sector of the Pampean Plain, in the province of Córdoba, Argentina. Drainage in the region is moderately impeded, with the presence of dunes and deflation basins with lagoons. The free aquifer present is composed of fine and very fine sands. The hydraulic interconnections were evaluated by conventional hydrogeological methodology and stable water isotope analysis ( $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ). Hydrodynamics and geochemistry indicate that the aquifer has flows of different hierarchies, both local and intermediate from upstream. The hydraulic, geochemical and isotopic relationships are influenced by morpholithological factors, the depth of the water table and anthropogenic activity (on-site sanitation systems, intensive agriculture and livestock farming, among others).

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En muchos lugares del mundo, el agua subterránea es el único recurso disponible para el sostén de las diversas actividades humanas (Nations, 2016; Rohde *et al.* 2017; van der Gun, 2021; Mishra, 2023). Desde climas áridos a hiperáridos (Gamboa *et al.* 2019; Taucare *et al.* 2020), donde se aprovechan flujos que vienen circulando desde zonas de recarga alóctona, hasta sectores de climas húmedos, donde no existen fuentes de aguas superficiales que puedan suplir la demanda de agua para consumo (Blarasin *et al.*, 2020; Maldonado *et al.*, 2018).

La hidrogeología en regiones de planicies mal drenadas es compleja y está influenciado por factores geológicos, climáticos y antrópicos (Kruse; Ainchil, 2017). Las aguas subterráneas poco profundas o aflorantes, así como aquellas con altos niveles de salinidad, plantean desafíos para las estrategias de gestión de recursos hídricos (Huang *et al.*, 2017; Akter *et al.*, 2021). En estas regiones, el nivel freático puede estar casi aflorante. Por un lado, este hecho provoca un exceso de humedad en el suelo, que puede dificultar el crecimiento de plantaciones o causar daños a infraestructuras, mientras que, por otro, vuelve a los acuíferos vulnerables a la contaminación (Foster *et al.*, 2003; 2009).

En áreas planas a muy suavemente onduladas, donde los suelos presentan alto contenido de sedimentos pelíticos o depósitos de calcretas (zonas de baja permeabilidad), se produce estancamiento de agua debido a la restricción del drenaje descendente (Callow *et al.*, 2020). Además, en regiones sujetas a precipitaciones estacionales, las inundaciones prolongadas son frecuentes. Los humedales, como lagunas y pantanos, a menudo se forman en áreas donde el agua permanece estancada durante períodos prolongados o de modo permanente, siendo típicamente el agua subterránea la fuente principal (Balwan; Kour, 2021; Jódar *et al.*, 2020), como ocurre en el área de estudio. Estas áreas pueden estudiarse desde diversas perspectivas, de las cuales una de ellas es obtener información hidráulica crucial para entender cómo se relaciona el agua superficial (SW) con el agua subterránea (GW). Aunque esta tarea no es fácil, vale la pena investigar las jerarquías de flujo que existen en la interfaz entre SW y GW, así como la interacción de estos dos componentes. Los sólidos disueltos pueden transferirse entre los sistemas de agua superficial y subterránea. Además, la evaluación de isótopos estables en las aguas subterráneas y superficiales es útil para explorar sus relaciones y distribución espacial para mejorar los modelos hidrogeológicos y, si bien éstos últimos se suelen realizar en áreas grandes, también hay ejemplos en cuencas pequeñas (Scheliga *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2021).

Los isótopos estables y radiactivos de la molécula de agua, como  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  y  $^3\text{H}$ , se han vuelto esenciales para este tipo de investigaciones. Considerando que circulan dentro del sistema hidrológico, lo que permite la comprensión e interpretación del modelo conceptual de un área respecto a las fuentes de recarga, el tiempo de residencia y las mezclas de agua (Vreča; Kern, 2020; Clark, 2015; Kazemi *et al.*, 2006; Blarasin *et al.*, 2020; Hagagg *et al.*, 2023). Desde la década de 1960, se han creado mapas de la distribución espacio-temporal de isótopos estables del agua, como  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  (Sheppard *et al.*, 1969). Sin embargo, con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se ofrecen múltiples herramientas que facilitan el análisis espacio-temporal de datos composicionales, permitiendo identificar tendencias y anomalías, así como también los factores de control.

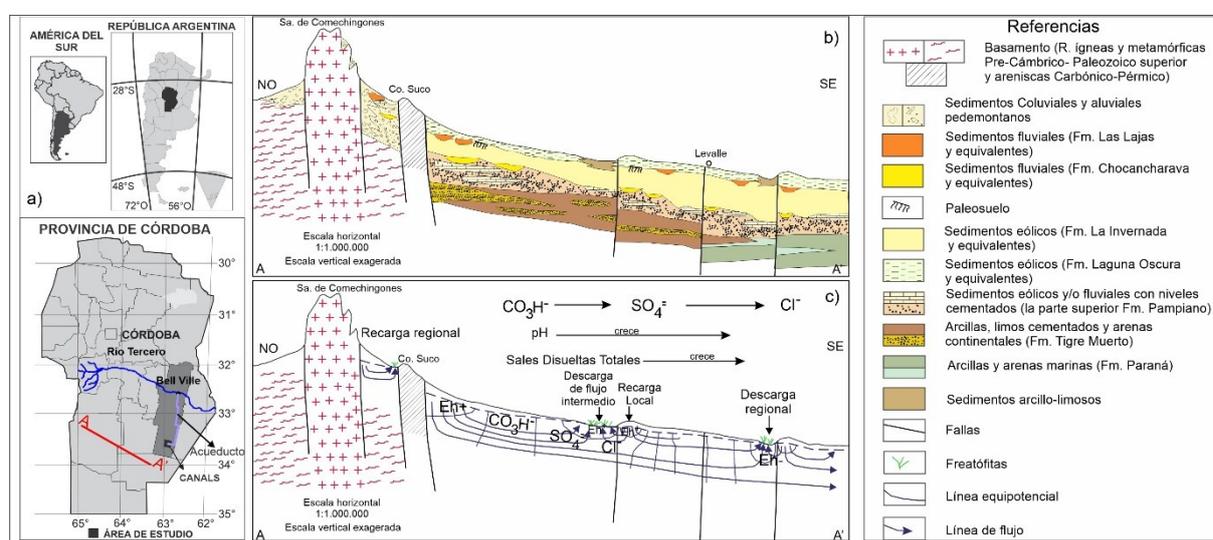
La Provincia de Córdoba (Argentina), se caracteriza por un relieve en el que se distingue un cordón montañoso ubicado al Oeste (Sierras Pampeanas de Córdoba), y una llanura ondulada que se nace al pie de la misma, y que es cada vez más tendida hacia el Este.

Respecto a los aspectos hidrogeológicos regionales, las sierras de Córdoba constituyen un foco emisor general de agua y alimentan parcialmente el sistema subterráneo de la llanura. En ésta, la sucesión sedimentaria del Paleógeno superior-Cuaternario ha condicionado el ensamble hidroestratigráfico de las formaciones acuíferas, acuitardas y acuícludas. Dada la variable profundidad de yacencia, espesor, granulometría y cementación de las capas sedimentarias, varían también la conductividad hidráulica (K), transmisividad (T) y almacenamiento (S) y, por lo tanto, la dinámica y potencialidad acuífera (Blarasin *et al.*, 2014). El acuífero libre, de espesor variable, desarrollado en sedimentos fluviales y eólicos cuaternarios, posee la mayor potencialidad en fajas fluviales y abanicos periserranos, donde se explotan altos caudales (hasta 500 m<sup>3</sup>/h). Los sedimentos eólicos constituyen los acuíferos más pobres. En la llanura, la recarga del acuífero libre varía entre 8 y 20 % de las precipitaciones anuales, siendo las reservas totales muy altas. Los depósitos que contienen los sistemas acuíferos confinados (SAC) son del Paleógeno superior-Pleistoceno inferior, de origen continental y/o marino. Los SAC son multicapa, yacen entre 100-450 m

de profundidad y poseen diferentes K, T y S. Las mayores reservas corresponden a los SAC formados por depósitos fluviales (paleocanales). Los niveles piezométricos de las diferentes capas son variables, en algunos casos en la parte distal de la llanura las perforaciones presentan surgencia de agua y los caudales de explotación variables (hasta 350 m<sup>3</sup>/h). El análisis de más de 500 perforaciones permitió definir un sistema jerárquico de flujos de aguas subterráneas con aquellos más profundos, de acuerdo a los datos hidráulicos e isotópicos, con recarga principal en el pedemonte serrano. Por su parte, hay sectores en la llanura con lomas de origen estructural o médanos, que constituyen zonas de recarga de flujos intermedios o locales (Blarasin, 2003; Blarasin *et al.*, 2020).

En el ámbito oriental de la provincia, donde se encuentra el área de estudio, el suministro de agua suele provenir de la explotación de sistemas de acuíferos confinados (profundidades mayores a 100 metros), ya que el acuífero libre y somero se caracteriza por agua salina o salobre. Si la calidad del agua no es adecuada, se transporta agua potable desde otros lugares a través de acueductos, como se ve en muchas localidades del sureste de Córdoba, incluida la localidad de Canals en el área de estudio.

En el marco presentado, el objetivo de este trabajo, es establecer las relaciones entre la distribución espacial de la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas con los factores geomorfológicos y las precipitaciones, utilizando técnicas isotópicas, en la zona urbana y rural de Canals, ubicada en un sector de la Llanura Pampeana, en la provincia de Córdoba, Argentina (Fig. 1).



**Figura 1.** a) Ubicación del área de estudio. b) Modelo geológico esquemático perfil A-A'. c) Sistema de flujo regional y locales y sus manifestaciones – Acuífero libre. Modificado de Blarasin, 2003.

## CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

### Aspectos geológicos-geomorfológicos locales

La zona se caracteriza por un relieve casi plano a muy suavemente ondulado, de bajas pendientes y drenaje moderadamente impedido. La alternancia entre periodos áridos y húmedos durante el Cuaternario, ha generado un paisaje de interferencia entre una paleored de drenaje muy disipada y discontinua, sobreimpuesta por megadunas parabólicas (pendientes locales de hasta 1,07% y resaltos topográficos de hasta 7 metros), y cubetas asociadas de origen eólico (pendientes inferiores a 0,4 %) (Fig. 2). Los cuerpos medanosos, en general predominan al oeste-noroeste de la localidad, mientras que hacia el este-sudeste, predominan las áreas deflacionadas.

En las zonas bajas, donde se desarrollan cubetas y paleocauces se alojan lagunas temporarias y en los alrededores se desarrollaron procesos de hidromorfismo (playas salinas), vinculados al afloramiento de agua subterránea salina y procesos de evaporación. Los sedimentos aflorantes son arenosos muy finos-limosos de edad Holocena Superior con diferente grado de edafización, y de forma localizada yacen calcretas de edad Pleistocena (Schiavo *et al.*, 2014).

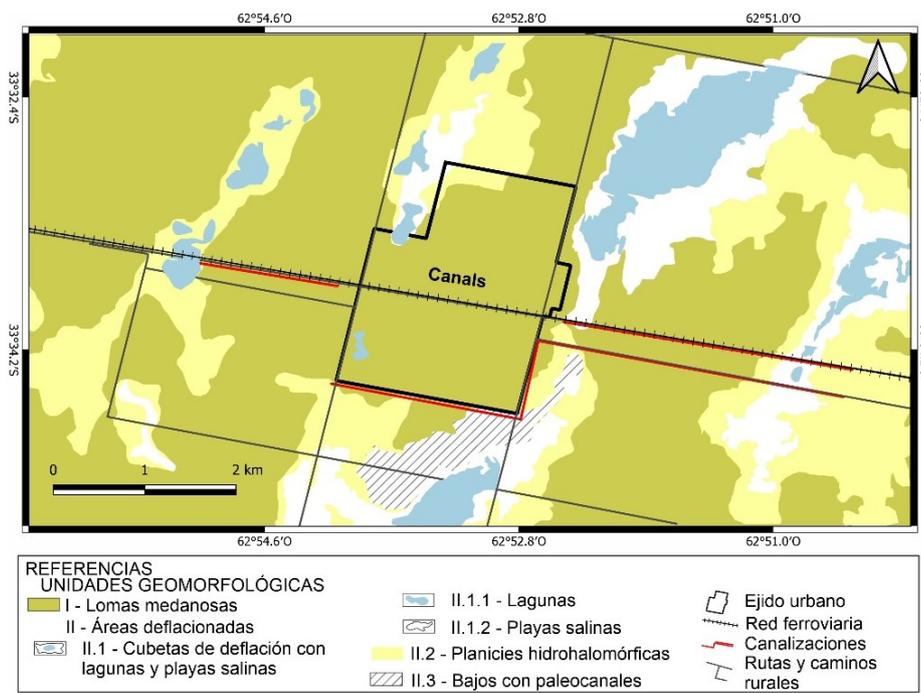


Figura 2. Mapa geomorfológico.

### Caracterización climática

El clima es templado, subhúmedo-húmedo con una estacionalidad bien marcada tanto en las precipitaciones como en la temperatura. La precipitación media anual es de 869 mm, concentradas fundamentalmente a fines de primavera-verano y principios de otoño. La evapotranspiración potencial media anual es de 847 mm, con los mayores valores también en estas estaciones anuales, asociados a las mayores temperaturas. Los excesos hídricos (promedio ~ 14 mm), predominan por sobre los déficits anuales (Fig. 3), generando en años húmedos, el aumento de escurrimientos superficiales y eventualmente el desborde de canales, además del ascenso generalizado del nivel freático por la recarga al acuífero, tal como ocurre en otros lugares de la llanura Pampeana (Blarasin; Cabrera; Matteoda, 2014) (Giacobone *et al.*, 2023).

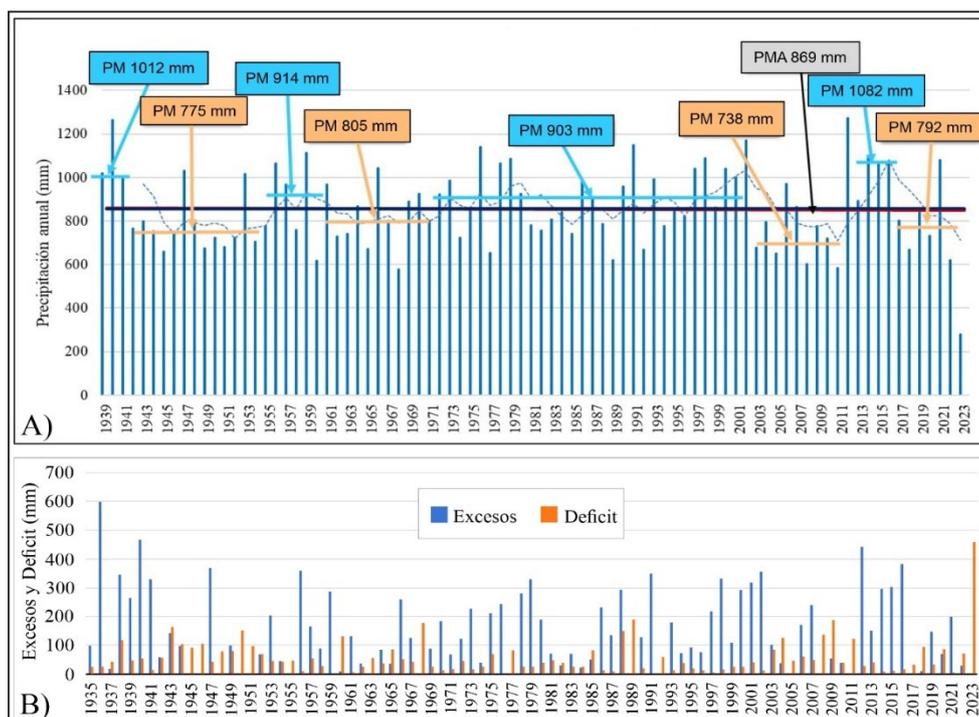
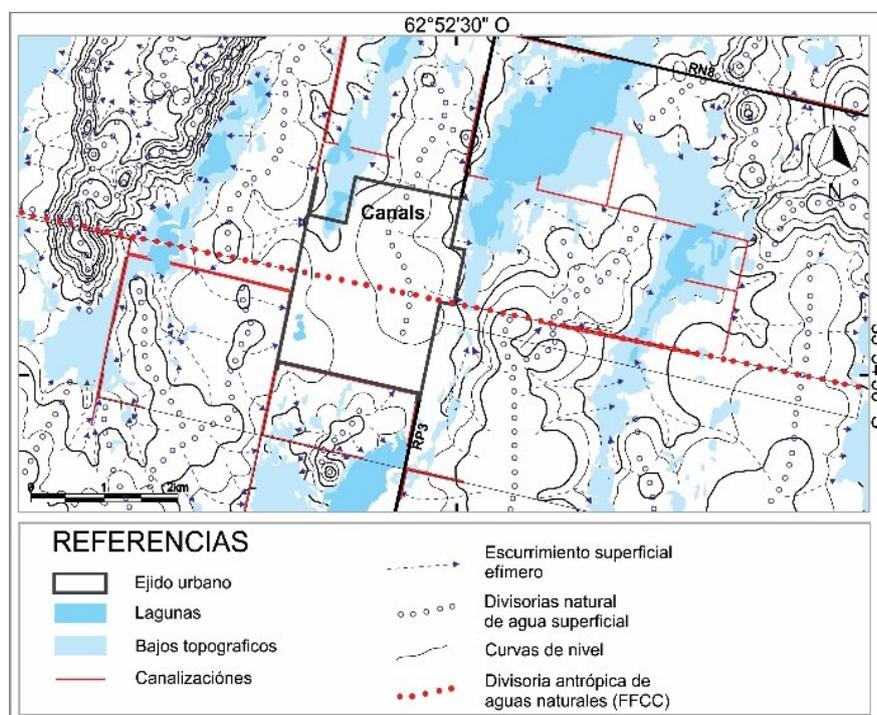


Figura 3. A) Curva cronológica anual de precipitaciones, estación INTA Canals (1936-2023). B) Excesos vs déficit anual, serie INTA Canals. Modificado de Pascuini *et al.*, 2020.

## Hidrología superficial

La geomorfología y las condiciones climáticas de la zona conforman un sistema hidrográfico multicubeta distintivo, caracterizado por áreas bajas de diversas orientaciones (cubetas ocupadas por lagunas) que actúan como colectores naturales de agua durante las tormentas. El agua superficial fluye de manera radial hacia estas lagunas, que a menudo están interconectadas por canales. Estos canales intersectan el acuífero libre, facilitando su drenaje. Las lagunas tienen áreas muy variadas, desde ~1200 m<sup>2</sup> hasta ~280 m<sup>2</sup> (Fig. 4).



**Figura 4.** A) Curva cronológica anual de precipitaciones, estación INTA Canals (1936-2023). B) Excesos vs déficit anual, serie INTA Canals. Modificado de Autor, 2020.

## Hidroestratigrafía

El acuífero libre está constituido por sedimentos eólicos, arenosos finos a muy finos con bajos porcentajes de limos y arcillas, de edad cuaternaria. En su espesor, de aproximadamente 60-80 m, se observan algunos niveles cementados con carbonatos que se comportan, muy localmente, como acuitardos. Los parámetros obtenidos por medio de ensayos hidráulicos (Felizzia, 2012) fueron calculados en valores de transmisividad (T) del orden de 26 m<sup>2</sup>/día, conductividad hidráulica (K) del orden de 2-3 m/día y un coeficiente de almacenamiento (S) de 12%. La base del acuífero la conforman sedimentos muy finos con abundante yeso (Pascuini *et al.*, 2022).

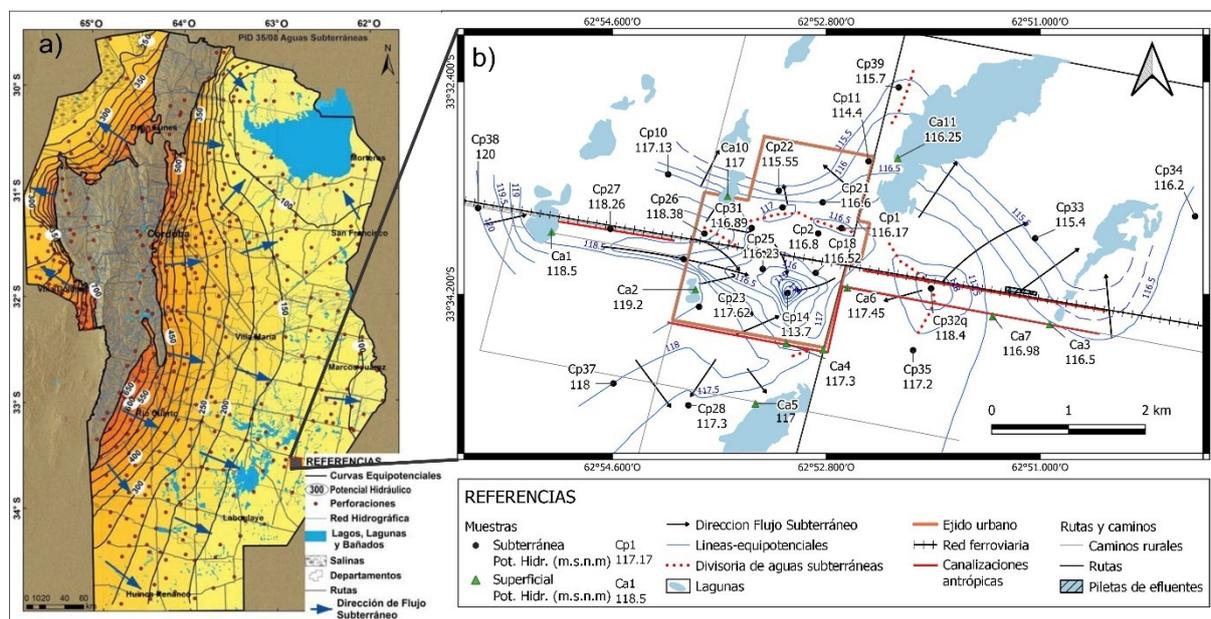
Las captaciones de agua, son poco profundas entre 10 y 20 metros, tomando de los primeros metros del acuífero. En general, las perforaciones son de 2" con ranuras en la parte inferior que actúan como zona filtrante. El agua se extrae a través de molinos de viento, y los caudales son pobres (100-1000 L/h).

En este sector de la provincia, se pueden encontrar los Sistemas Acuíferos Confinados (SAC), SAC C y SAC D, de origen marino y continental respectivamente (Fig. 1), en general de aguas salobres sulfatadas sódicas (Blarasin *et al.*, 2014; Maldonado *et al.*, 2018).

## Hidrodinámica

A escala regional, el patrón de flujo general sigue una dirección oeste-este. Las direcciones de los flujos subterráneos (Fig. 5), están condicionadas por la topografía, observándose los mayores valores de potenciales hidráulicos en el sector de dunas ubicado al oeste (zona de recarga preferencial), y los menores en la zona de cubetas ubicadas en el sector este de la localidad (zona de descarga de flujos regionales e intermedios; Pascuini *et al.*, 2022).

Los gradientes hidráulicos son  $\sim 0,2\%$  y las velocidades del agua subterránea  $\sim 0,03$  m/d. El sector urbano presenta modificaciones generadas por la actividad humana. Al norte de la localidad se observan pequeñas zonas de divisorias de agua, aspecto vinculado a que la ciudad recibe recarga de los sistemas de saneamiento *in situ* (pozos negros) y pérdidas por rotura de caños. Al sur de la localidad, se observa un gran cono de depresión causado por la extracción de agua mediante bombeo. Este procedimiento se llevó a cabo para deprimir el nivel freático y crear una barrera hidráulica durante la obra de instalación del sistema cloacal, en el momento del relevamiento.



**Figura 5.** a) Mapa de flujos de agua en la provincia de Córdoba tomado de Blarasin *et al.*, 2014. b) Mapa de potencial hidráulico del acuífero libre del área de estudio y de localización de las muestras de agua superficial (CA) y subterráneas (CP). Modificado de Pascuini *et al.*, 2022.

Las relaciones hidráulicas están condicionadas por aspectos morfolitológicos, la posición del nivel freático y la actividad antrópica. Así, las lagunas en general son alimentadas por el acuífero libre por medio de flujos de distintas jerarquías, aunque, hay sectores en los cuales esta relación se invierte (Pascuini *et al.*, 2022).

Las profundidades del nivel freático, en la zona rural, en general son menores a un metro, con excepción en el sector de dunas donde llega a ser de 8 metros. Dentro de la ciudad, se observan valores someros en el norte, mientras que en el sector sur se observan profundidades mayores a 6 metros, donde se estaba desarrollando el bombeo para la instalación de las cloacas.

## Aspectos generales de la composición físico química del agua

El patrón geoquímico es muy heterogéneo tanto en aguas superficiales como en subterráneas. El acuífero libre posee salinidades que van desde  $846 \mu\text{S}/\text{cm}$  hasta  $18.260 \mu\text{S}/\text{cm}$ , sugiriendo diferentes factores o procesos hidrogeoquímicos. Por un lado, los flujos de mayor jerarquía o más regionales (alóctonos), constituidos por las aguas de mayor salinidad, tienen un control regional vinculado a características climáticas y geológicas y a la posición del área de estudio en el flujo subterráneo regional, mientras que los flujos locales (autóctonos), de menores salinidades, están controlados por las geoformas del relieve y la actividad antrópica en la propia zona (Fig. 6).

En los médanos de la zona rural y en la localidad de Canals hay aguas subterráneas dulces de tipo bicarbonatadas sódicas mientras que en la planicie rural y cercanías de cubetas de deflación las aguas son salobres y saladas de tipo cloruradas sódicas (Figs. 6 y 7). Por su parte, las cubetas mayores son los sitios que poseen el agua superficial más salada, algunas con más de  $20 \text{ g}/\text{L}$  porque reciben agua subterránea no sólo de la parte superior del acuífero libre sino también de flujos regionales. El hecho de que la ciudad muestre aguas subterráneas más dulces (bicarbonatadas sódicas o sulfatadas sódicas) que el entorno, está vinculado a la recarga desde sistemas de saneamiento *in situ* que, aunque pueden aportar contaminantes, descargan al acuífero agua dulce (CE alrededor de  $535 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) procedente del agua corriente del acueducto que abastece a la ciudad. En la ciudad, los valores más altos de sales

y los tipos geoquímicos más evolucionados (sulfatadas sódicas o cloruradas sódicas), aparecen en la zona del drenaje por bombeo, aspecto evidente si se considera que al bajar el nivel hasta los 6-7 m, ya se extrajo el agua menos salada de la parte superior del acuífero y comienzan a extraer el agua más salada de flujos más profundos (flujos regionales) (Figs. 6 y 7).

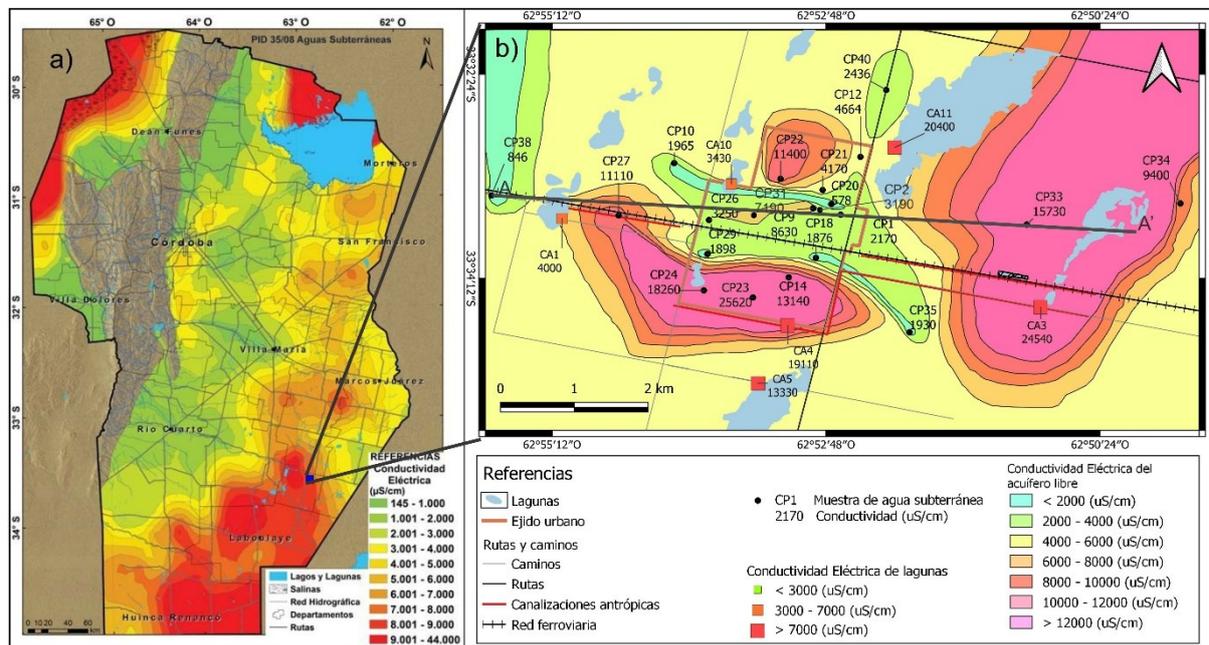


Figura 6. a) Mapa de Conductividad Eléctrica (CE) del agua en la provincia de Córdoba tomado de Blarasin *et al.*, 2014. b) Mapa de CE del acuífero libre y de cuerpos de agua superficiales del área de estudio. Modificado de Pascuini *et al.*, 2022.

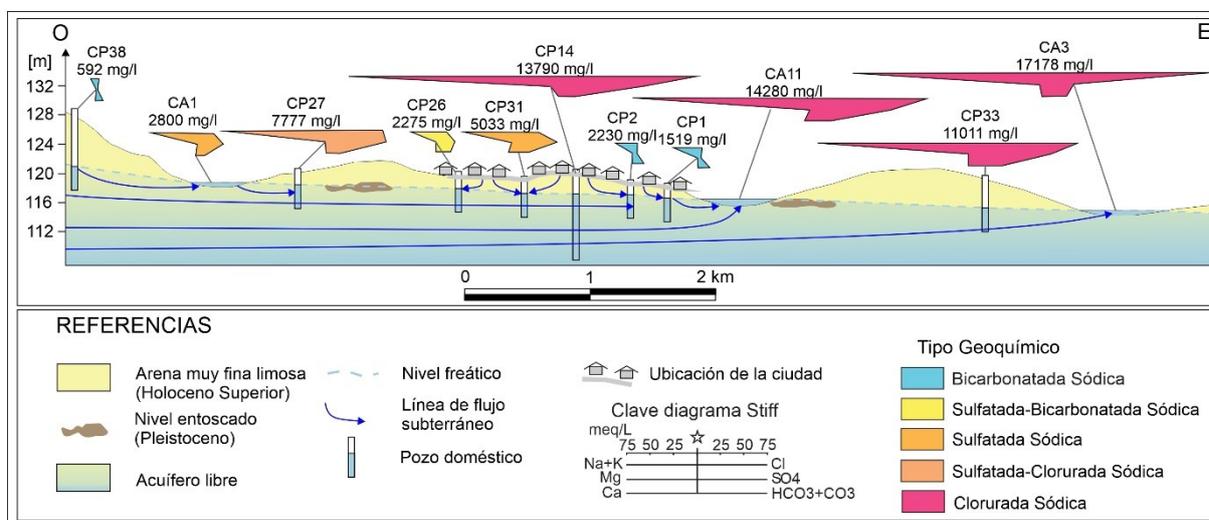


Figura 7. Perfil geológico con las distintas jerarquías de flujo, y distintos tipos de aguas identificadas.

## METODOLOGIA

Sobre la base del análisis de antecedentes de la zona (Pascuini *et al.*, 2020; Pascuini *et al.*, 2022), se seleccionaron 20 muestras de agua (5 superficiales y 14 subterráneas) para la determinación de isótopos estables del agua ( $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ). Previo a la toma de muestra se purgó la perforación para descartar el agua estancada en la tubería y la botella PET transparente de 50 mL, fue enjuagada 3 veces con el agua a analizar. Una vez realizado, se procedió a muestrear asegurando que no queden burbujas en su interior, sellando finalmente las botellas con parafilm para evitar el fraccionamiento isotópico dentro del recipiente. Posteriormente, fueron enviadas al Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario - Universidad Nacional de Mar del Plata para el análisis de los isótopos estables ( $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ). El equipo utilizado fue Los Gatos Research inc. (OA-ICOS: Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy). Los límites de incertidumbre son de  $\pm 0,15\%$  para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\pm 1\%$  para  $\delta^2\text{H}$ . Los resultados fueron expresados como:

$$\delta = 1000 * \left( \frac{R_s - R_{st}}{R_{st}} \right) \quad (1)$$

Donde  $R$  = es la relación isotópica  $^2\text{H}/^1\text{H}$  o  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ;  $\delta$ , la desviación isotópica en ‰, del  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  respectivamente,  $s$  representa a la muestra y  $st$  el material estándar de referencia (V-SMOW; Gonfiantini, 1978).

Para la interpretación de los datos isotópicos, se contó con datos de la composición isotópica de precipitaciones recolectadas con frecuencia mensual desde 2012 a 2020 en la propia localidad de Canals (la ubicación del colector, se encuentra en la figura de composición isotópica interpolada del acuífero libre) lo que permitió construir la recta meteórica local con la cual confrontar los datos isotópicos de aguas superficiales y subterráneas seleccionadas.

Para la elaboración de las *isoscapes*, se realizó la interpolación de la composición isotópica del acuífero libre, mediante la utilización del software QGIS (V. 3.22.15). El método de interpolación utilizado, fue el IDW (Inverse Distance Weighted), que asigna una fuerte influencia a los valores cercanos a un punto conocido, mientras que a medida que la distancia aumenta, la influencia de ese punto disminuye, lo cual lo convierte en un método eficiente e intuitivo para el análisis de datos espaciales (Azpurua; Ramos, 2010).

$$Z = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p} Z_i / \sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p} \quad (2)$$

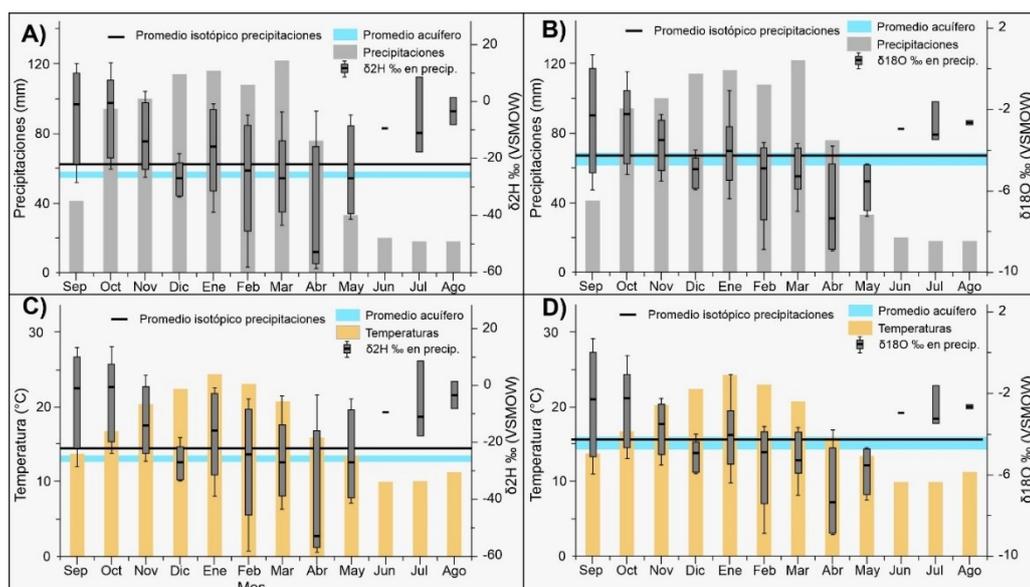
La información resultante fue procesada, obteniéndose los mapas y diagramas correspondientes.

## RESULTADOS

### Aspectos isotópicos

#### Composición isotópica de las precipitaciones

Las figuras 8 y 9 muestran la variabilidad temporal en la composición isotópica de las precipitaciones en el área de estudio. Dicha composición varía en un rango entre 0,7 ‰ y -8,9 ‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  y entre 13,6 ‰ y -58 ‰ para  $\delta^2\text{H}$ , con un promedio de  $\delta^{18}\text{O}$  -4,2 ‰ y  $\delta^2\text{H}$  -18,1 ‰. De manera general, se observa que ambos isótopos  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  presentan valores más livianos entre febrero y abril ( $\delta^{18}\text{O}$  -8,9‰ a -7‰ y  $\delta^2\text{H}$  -59‰ a -44‰) cuando ocurren las mayores precipitaciones y temperaturas (observándose la menor variabilidad estadística en diciembre), y más pesados entre septiembre y octubre ( $\delta^{18}\text{O}$  de 0,7‰ a -0,2‰ y  $\delta^2\text{H}$  13,1‰ a 13,6‰) cuando las precipitaciones y temperaturas son más bajas.



**Figura 8.** Comparación entre la composición isotópica de las lluvias y la composición isotópica del acuífero libre somero. A) Composición isotópica mensual de precipitaciones ( $\delta^2\text{H}\text{‰}$ ) vs. precipitaciones medias mensuales. B) Composición isotópica mensual de precipitaciones ( $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ ) vs. precipitaciones medias mensuales. C) Composición isotópica mensual de precipitaciones ( $\delta^2\text{H}\text{‰}$ ) vs. temperaturas medias mensuales. D) Composición isotópica mensual de precipitaciones ( $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ ) vs. temperaturas medias mensuales.

## Composición isotópica de las aguas superficiales

Por su parte, las composiciones isotópicas de las aguas superficiales se encuentran alineadas respecto a dos rectas de evaporación diferentes (Fig. 9). Por un lado, la recta descrita por la ecuación  $\delta^2\text{H}\text{‰} = 3,4 \delta^{18}\text{O}\text{‰} - 9,9\text{‰}$ , que explica el enriquecimiento selectivo del  $^{18}\text{O}$  respecto al  $^2\text{H}$  observado en lagunas tales como CA1, CA9 y CA10, y por otro, la descrita por la ecuación  $\delta^2\text{H}\text{‰} = 5,5 \delta^{18}\text{O}\text{‰} - 1,2\text{‰}$ , observado en lagunas tales como CA3 y CA5.

La figura 9 muestra diferentes grados de evaporación (distintas rectas) en distintos cuerpos lagunares y el grado de enriquecimiento isotópico y salinización. Así, se observa que las lagunas de origen freático y de mayor tamaño (CA3 y CA5 en la Fig. 5) alimentadas por flujos del acuífero libre más salinos se caracterizan por presentar mayor concentración de iones disueltos y ser isotópicamente más pesadas debido a proceso de evaporación, mientras que las lagunas menores (CA1 y CA10 en la Fig. 5) son menos mineralizadas e isotópicamente más livianas, ya que en general se trata de lagunas que renuevan más sus aguas por aporte de recarga de agua de lluvia de médanos cercanos.

Finalmente, la muestra AR1 que pertenece al agua de red de la localidad, se observa más liviana isotópicamente respecto a las muestras de aguas superficiales y subterráneas de la zona. El agua de red, llega a la localidad a través del acueducto que nace del propio río Tercero en la localidad de Bell Ville, río cuyas nacientes están en la Sierras de Comechingones, al oeste provincial, donde el agua que lo alimenta es isotópicamente más empobrecida (Blarasin *et al.*, 2014).

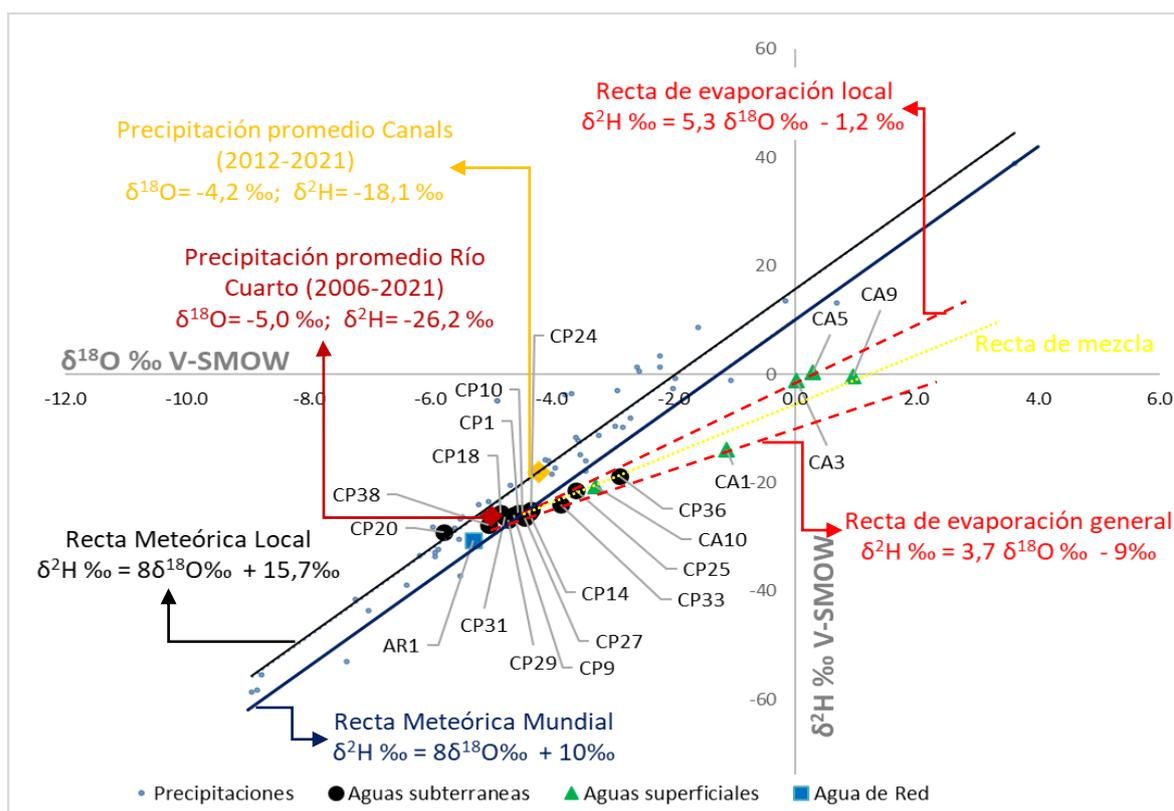


Figura 9. Diagrama isotópico  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  vs.  $\delta^2\text{H}\text{‰}$  V-SMOW estables en agua.

## Composición isotópica del agua subterránea

El agua del acuífero libre posee composiciones isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$  que varían desde  $-2,9\text{‰}$  hasta  $-5,8\text{‰}$  y de  $\delta^2\text{H}$  que van desde  $-18,7\text{‰}$  hasta  $-29,1\text{‰}$ .

De manera general, se observa que el promedio de composición isotópica del acuífero libre (franja celeste en la Fig. 8B) coincide con el valor de la composición isotópica promedio de las precipitaciones para el caso del  $\delta^{18}\text{O}$ .

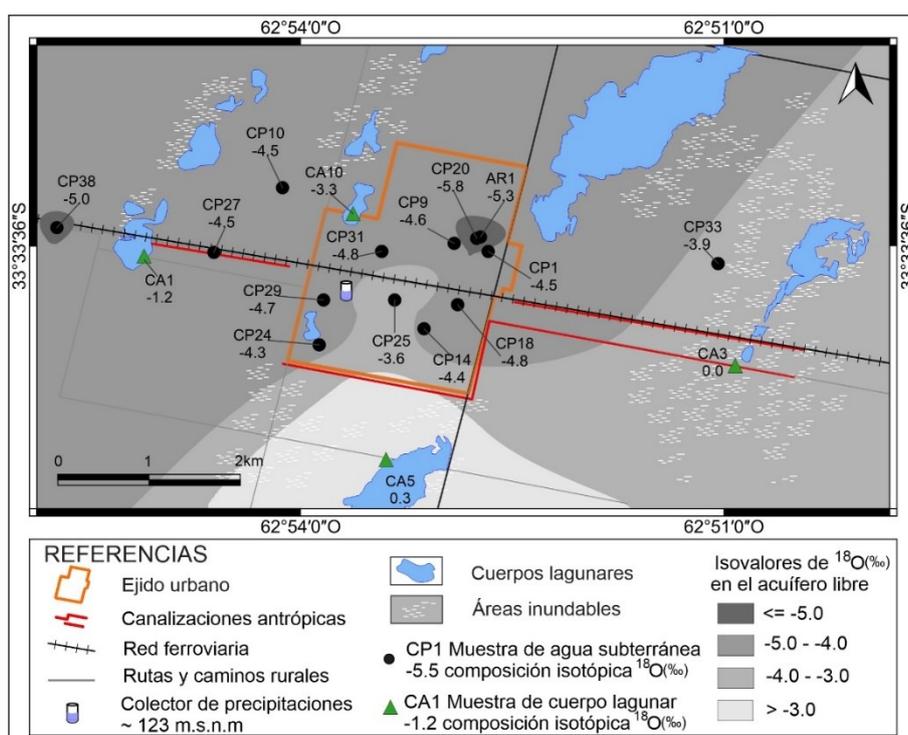
Mientras que, en el caso del  $\delta^2\text{H}$  el promedio de composiciones de isotópicas del acuífero libre (franja celeste en la Fig. 8A), tiene menos variabilidad y se encuentra apenas por debajo de la composición isotópica promedio de las precipitaciones para este isótopo. Además, se observa una coincidencia parcial entre las barras de composición isotópica de las precipitaciones tanto para  $\delta^{18}\text{O}$  como para  $\delta^2\text{H}$  en los meses de abril a septiembre, con el rango de composición isotópica del acuífero libre (aunque la coincidencia es mayor en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril, es decir verano y otoño), mientras que en los meses de junio, julio y agosto (muestras más pesadas), las cajas de las precipitaciones no coinciden en ningún punto con la composición del acuífero.

En el diagrama isotópico de  $^{18}\text{O}$  vs.  $^2\text{H}$  (Fig. 9), se observa que las muestras del acuífero están alineadas respecto a la recta meteórica local para la localidad de Canals ( $\delta^2\text{H}\text{‰} = 8,0 \delta^{18}\text{O}\text{‰} + 15,7\text{‰}$ ), aunque hay un conjunto de 4 muestras que presentan un comportamiento disímil. Por un lado, la muestra CP20 que es isotópicamente la más liviana del acuífero libre, y por el otro las muestras CP25, CP33 y CP36, que presentan más enriquecimiento y se encuentran alineadas en rectas de evaporación.

## Isoscapes

Los isoscapes sirven para plasmar en un mapa la distribución espacial de las relaciones isotópicas (Bowen; West, 2008). Si bien, como se mencionó anteriormente, los isoscapes de relaciones isotópicas son comúnmente utilizadas para estudios regionales, debido a la disponibilidad de información, se decidió implementar esta herramienta, debido al potencial que tiene para ilustrar de manera local, la distribución de las relaciones isotópicas en el acuífero en función de las características del paisaje.

La distribución del  $\delta^2\text{H}$  y del  $\delta^{18}\text{O}$  es similar, por lo tanto se presenta solo el mapa de distribución del  $\delta^{18}\text{O}$  (Fig. 10). En el mapa, se puede observar que la relación isotópica se vuelve más pesada hacia el sur y sureste con valores, en general, mayores a  $-4,0\text{‰}$ . Por su parte, al centro norte y noroeste de la localidad, en general, los valores que predominan son más livianos con valores menores a  $-4,0\text{‰}$ . En el centro de la localidad, se observan dos "anomalías" por un lado la correspondiente a la muestra CP25 en el centro-sur con un valor más pesado que los circundantes y por el otro la correspondiente a las muestras AR1 y CP20 en el centro norte de la localidad, con valores más livianos que los circundantes. Finalmente, al oeste de la localidad se observa una anomalía con un empobrecimiento mayor en la muestra CP38 ubicada en el sector de médanos (Fig. 10).



**Figura 10.** Composición isotópica interpolada del acuífero libre. Ubicación del colector de precipitaciones GNIP ( $-33,56$  Lat. Sur,  $-62,89$  Long. Oeste, Altitud 126 msnm-GNIP-OIEA).

## DISCUSIÓN

Sobre la Si bien existe una amplia dispersión en algunas de las composiciones isotópicas de las precipitaciones, la coincidencia parcial de sus composiciones promedio con el rango de composición del acuífero para los meses comprendidos entre septiembre y marzo con mayor predominancia entre los meses de noviembre y abril, así como el cúmulo de muestras en el diagrama isotópico convencional alineadas a la recta local de precipitaciones indican, por un lado, que la lluvia recarga localmente al acuífero, y por el otro, que esta recarga se da principalmente en los meses de verano-otoño, con baja influencia por parte de las precipitaciones de principios de la primavera y nula en la estación de invierno. Por lo tanto, los datos destacan que el mecanismo dominante en la recarga del acuífero es la directa o difusa (Healy, 2010).

La composición isotópica del acuífero, al igual que en la composición físico-química y los aspectos hidrodinámicos, presentan un fuerte control geomorfológico. De este modo, se observa que los sectores topográficamente bajos, donde se encuentran las áreas anegables y las lagunas de mayor tamaño, se presentan las composiciones isotópicas más pesadas. Este es el caso de las muestras CP25 (NF=2,2 m); y CP33 (NF=3,5 m) que debido al escaso espesor de ZNS, permite la evaporación directa desde el propio acuífero (ecuación de la recta de evaporación:  $\delta 2H\text{‰} = 3,4 \delta 18O\text{‰} - 9,9\text{‰}$ ), generando que el agua en estos sectores sufra un enriquecimiento mayor en el  $\delta 18O\text{‰}$  que en el  $\delta 2H$ .

En el sector norte y noroeste de la localidad, donde están los cuerpos de dunas, se observa una composición más empobrecida del agua del acuífero, que se interpreta corresponde a la recarga local difusa sin influencia de procesos de evaporación, especialmente en verano. Por otra parte, en el sector norte de la ciudad, se observa un sector isotópicamente muy liviano. Se interpreta que este comportamiento está relacionado a un lente dulce de recarga local antrópica, que por medio de los sistemas de saneamiento in situ (Figs. 5 y 6), y de las posibles pérdidas en las cañerías de la red de distribución de agua del acueducto, recarga al acuífero con agua más liviana isotópicamente (AR1, procedente del río Tercero que se alimenta de lluvias serranas empobrecidas isotópicamente) que se mezcla con el agua circundante, dando como resultado los valores determinados (muestra CP20). En general, las características isotópicas del acuífero coinciden con aspectos geomorfológicos, observándose que los valores más empobrecidos se encuentran vinculados a sectores de perforaciones en los médanos occidentales del área estudiada, mientras que los más enriquecidos están relacionados a sectores donde los pozos captan agua en cercanías de las más grandes cubetas de deflación con planicies hidrohalomórficas (ámbito oriental y sudoriental), fundamentalmente debido a procesos de evaporación del agua. Si bien otros autores plantean que hay empobrecimiento isotópico de precipitaciones desde este hacia el oeste provincial (Maldonado et al., 2016; Maldonado et al., 2017; Cabrera et al., 2017), en este trabajo de escala local se puede interpretar que lo más enriquecido en el sector sudoriental está relacionado a la evaporación directa del agua del acuífero, ya que el nivel está casi aflorante.

En cuanto a la composición isotópica de las lagunas, se observa que han sufrido procesos de evaporación en diferentes grados, lo cual se evidencia por sus concentraciones salinas y las playas salinas que las rodean (precipitaciones de sales de  $SO_4Ca$ ; Pascuini *et al.*, 2022). Los procesos de evaporación están muy relacionados a la morfología del cuerpo lagunar (tamaño, profundidad, etc.), al sector geomorfológico en el que se encuentran y su relación con el acuífero. Así, las lagunas de mayor tamaño que se encuentran en los sectores más bajos topográficamente al sur y este de la localidad, como CA3 y CA5, actúan como sectores de descarga hidrológica de flujos intermedios, más salados, y muestran fuertes procesos de enriquecimiento isotópico debido a evaporación que concentra aún más las sales. Por otro lado, las lagunas rodeadas de cuerpos medanosos más preservados, que les aportan estacionalmente aguas de lluvia, presentan en general menor salinización y menor enriquecimiento isotópico.

## CONCLUSION

Los resultados isotópicos permiten definir el origen meteórico local y estacional de la recarga al acuífero. La recarga se da principalmente en los meses de las estaciones verano y otoño, y en menor medida en los meses de primavera, mientras que las lluvias de invierno, no tienen influencia en la composición isotópica del acuífero.

A mayor profundidad los datos evidencian llegada de flujos de agua arriba, más salinos, debido a evolución y salinización en el acuífero como lo demuestra también el marco regional.

Las composiciones isotópicas del acuífero libre, muestran condicionamiento natural por la geomorfología, y antrópica por la incorporación de agua alóctona isotópicamente más liviana transportada desde el Río Tercero cuya cuenca alta se encuentra alimentada por nieves y lluvias isotópicamente livianas. En los sectores rurales del oeste de la localidad, la composición isotópica es más liviana, vinculada a la presencia de zonas medanosas más preservadas que permiten la infiltración y alojamiento de agua de lluvia en la estación lluviosa, mientras que en las zonas bajas de cubetas de deflación muy grandes y más profundas, las composiciones son más pesadas, debido a la evaporación directa desde el propio acuífero dado el nivel freático casi aflorante.

Los valores isotópicos en las aguas superficiales muestran, en diferente grado, enriquecimiento dado por los procesos de evaporación, lo cual depende de la morfología de la laguna y de la posición de la misma en el marco geomorfológico descripto.

Finalmente se menciona el potencial de la herramienta de isoscapes para el estudio del comportamiento isotópico local ya que, si bien en general se utilizan de manera regional, al utilizarlas para observar la distribución espacial, pueden indagarse posibles controles locales.

## BIBLIOGRAFÍA

AHMED, M.; KHALIL, M. M. Isotopic and chemical composition of Egypt's groundwater resources. In: *GROUNDWATER quality and geochemistry in arid and semi-arid regions*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 237-265. [https://doi.org/10.1007/698\\_2023\\_1046](https://doi.org/10.1007/698_2023_1046)

AKTER, F.; BISHOP, T.; VERVOORT, R. Space-time modelling of groundwater level and salinity. *The Science of the Total Environment*, v. 776, 145865, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145865>

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). *Standard methods for examination of water and wastewater*. 23 ed. Washington: APHA, AWWA, WPCF, 2017.

AZPURUA, M. A.; RAMOS, K. D. A comparison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude. *Progress in Electromagnetics Research M*, v. 14, p. 135-145, 2010. <https://doi.org/10.2528/pierm10083103>

BALWAN, W. K.; KOUR, S. Wetland-an ecological boon for the environment. *East African Scholars Journal of Agriculture and Life Sciences*, v. 4, n. 3, p. 38-48, 2021. <https://doi.org/10.36349/easjals.2021.v04i03.001>

BARBIERI, M. Isotopes in hydrology and hydrogeology. *Water*, v. 11, n. 2, p. 291, 2019.

BIRKEL, C. et al. Characterization of surface water isotope spatial patterns of Scotland. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 194, p. 71-80, 2018.

BLARASIN, M. et al. Application of isotope techniques to enhance the conceptual hydrogeological model and to assess groundwater sustainability in the Pampean Plain in Córdoba, Argentina. *Isotopes in Environmental & Health Studies*, v. 56, n. 5-6, p. 402-417, 2020. <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1796658>

BLARASIN, M.; CABRERA, A.; MATTEODA, E. *Aguas subterráneas de la prov. de Córdoba*. Río Cuarto: UniRío Editora, 2014.

BOWEN, G. J.; WEST, J. B. Isotope landscapes for terrestrial migration research. In: *TRACKING animal migration with stable isotopes*. New York: Academic Press, 2008. p. 79-106. [https://doi.org/10.1016/s1936-7961\(07\)00004-8](https://doi.org/10.1016/s1936-7961(07)00004-8)

CABRERA, A.; BLARASIN, M.; MALDONADO, L. Groundwater age and hydrothermalism of confined aquifers in the Argentine Pampean plain. *Geothermal Energy*, v. 5, p. 1-19, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0064-1>

CALLOW, J. N.; HIPSEY, M. R.; VOGWILL, R. I. Surface water as a cause of land degradation from dryland salinity. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 2, p. 717-734, 2020. <https://doi.org/10.5194/hess-24-717-2020>

CLARK, I. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. Boca Raton: CRC Press, 2015. 456 p.

FELIZZIA, J. *Informe técnico privado realizado para la Planta Láctea de La Serenísima en Canals*. 2012.

- FOSTER, S. et al. *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. Washington: The World Bank, 2003.
- FOSTER, S. et al. *Protecting the quality of public water-supply sources: a guide for water utilities, municipal authorities, and environmental agencies*. 2 ed. Washington: The World Bank, 2009.
- GAMBOA, C. et al. The origin of solutes in groundwater in a hyper-arid environment: a chemical and multi-isotope approach in the Atacama Desert, Chile. *Science of the Total Environment*, v. 690, p. 329-351, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.356>
- GIACOBONE, D. B. et al. Contexto regional y local de recarga de acuíferos en la planicie fluvio-eólica de Marcos Juárez. 2023.
- GONFIANTINI, R. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, v. 271, n. 5645, p. 534-536, 1978. <https://doi.org/10.1038/271534a0>
- HAGAGG, K.; HUSSIEN, R. A.; SADEK, M. A. H. Numerical modeling constrained by environmental isotopes for sustainable development of partially renewable aquifers in desert area. *Carbonates and Evaporites*, v. 38, n. 2, p. 30, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13146-023-00850-4>
- HEALY, R. W. *Estimating groundwater recharge*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- HUANG, T. et al. Groundwater recharge in an arid grassland as indicated by soil chloride profile and multiple tracers. *Hydrological Processes*, v. 31, n. 5, p. 1047-1057, 2017. <https://doi.org/10.1002/hyp.11089>
- JÓDAR, J. et al. Hydrogeochemical, isotopic and geophysical characterization of saline lake systems in semiarid regions: The Salada de Chiprana Lake, Northeastern Spain. *Science of the Total Environment*, v. 728, 138848, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138848>
- KAZEMI, G. A.; LEHR, J. H.; PERROCHET, P. *Groundwater age*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- KRUSE, E.; AINCHIL, J. Comportamiento hidrológico en grandes llanuras: caso de estudio Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Augum Domuns*, v. 5, 2017. <https://doi.org/10.59069/tsvs0p56>
- MALDONADO, L. et al. Hydrogeochemical features and groundwater renewal rate estimates from deep aquifers in the Pampean plain, Córdoba province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 85, p. 126-134, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.05.006>
- MALDONADO, M. L. et al. Assessing groundwater age in confined aquifers from the central Pampean plain of Córdoba, Argentina. *Radiocarbon*, v. 58, n. 4, p. 833-849, 2016. <https://doi.org/10.1017/rdc.2016.35>
- MISHRA, R. K. Fresh water availability and its global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, v. 4, n. 3, p. 1-78, 2023. <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0208>
- NATIONS, U. *The sustainable development goals 2016*. ESocialSciences, 2016.
- QUINODOZ, F. B. et al. Assessing interactions between groundwater and surface water in a Pampean stream. *Hydrology Research*, v. 48, n. 4, p. 1045-1057, 2017. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.100>
- ROHDE, M. M.; FROEND, R.; HOWARD, J. A global synthesis of managing groundwater dependent ecosystems under sustainable groundwater policy. *Groundwater*, v. 55, n. 3, p. 293-301, 2017. <https://doi.org/10.1111/gwat.12511>
- SCHELIGA, B. et al. Groundwater isoscapes in a montane headwater catchment show dominance of well-mixed storage. *Hydrological Processes*, v. 31, n. 20, p. 3504-3519, 2017. <https://doi.org/10.1002/hyp.11271>
- SCHIAVO, H. et al. Calcretas del suroeste de Córdoba. In: IMBELLONE, P. (ed.). *Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas de Argentina*. Buenos Aires: FAV-UNRC, 2014.
- SHEPPARD, S. M.; NIELSEN, R. L.; TAYLOR, H. P. Oxygen and hydrogen isotope ratios of clay minerals from porphyry copper deposits. *Economic Geology*, v. 64, n. 7, p. 755, 1969. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.64.7.755>
- SOMERS, L. D.; MCKENZIE, J. M. A review of groundwater in high mountain environments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 7, n. 6, e1475, 2020.
- TAUCARE, M. et al. Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of the Total Environment*, v. 722, 137824, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>

TÓTH, J. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, v. 7, n. 1, p. 1-14, 1999. <https://doi.org/10.1007/s100400050176>

USUNOFF, E. et al. Hidrogeología de grandes llanuras: La Pampa húmeda argentina. *Boletín Geológico y Minero*, v. 110, n. 4, p. 391-406, 1999.

VAN DER GUN, J. Groundwater resources sustainability. In: GLOBAL groundwater. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 331-345. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818172-0.00024-4>

VREČA, P.; KERN, Z. Use of water isotopes in hydrological processes. *Water*, v. 12, n. 8, 2227, 2020.

WASSENAAR, L. I. et al. A groundwater isoscape ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) for Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 102, n. 3, p. 123-136, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.01.001>

XU, Q. et al. The spatial patterns and impact factors of stable oxygen and hydrogen isoscapes in pond water: A case study on the water-source forests of the Hani terraced fields in Yunnan, China. *Journal of Hydrology*, v. 603, 127097, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127097>