

Evaluación de relaciones acuífero libre - lagunas mediante modelación hidrogeoquímica e isotópica en la planicie medanosa del sur de Córdoba - Argentina

Fátima Noelia BÉCHER QUINODÓZ^{1,2} y Mónica BLARASIN²

Resumen: *EVALUACIÓN DE RELACIONES ACUÍFERO LIBRE – LAGUNAS MEDIANTE MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA EN LA PLANICIE MEDANOSA DEL SUR DE CÓRDOBA – ARGENTINA.* La zona, caracterizada por dunas parabólicas con lagunas temporarias y permanentes de variado tamaño, presenta un patrón espacial geoquímico complejo. El objetivo es la caracterización hidrodinámica e hidrogeoquímica (general e isotópica) de las relaciones agua superficial – subterránea en la planicie arenosa del sur de Córdoba. Se realizó además la simulación de posibles mezclas y evolución geoquímica del agua, mediante modelación numérica inversa para validar el modelo hidrogeológico conceptual. El modelo conceptual y la modelación numérica explican que las lagunas saladas y salobres son producto de una mezcla de aguas subterráneas locales dulces, con aguas subterráneas más saladas procedentes de flujos intermedios y regionales. Los valores indican que la composición salada y salobre del agua de las lagunas evaluadas, se alcanzan mediante la mezcla de las soluciones iniciales, en un porcentaje aproximado de 41/59 (dulce/salada) y 88/12 (dulce/salada) respectivamente. Los procesos dominantes son disolución de sales, intercambio catiónico Ca/Na y procesos de evaporación en alto porcentaje en las lagunas.

Abstract: *ASSESSING UNCONFINED AQUIFER – LAGOONS RELATIONSHIPS WITH HYDROGEOCHEMICAL AND ISOTOPICAL MODELING IN THE SANDY PLAIN OF THE SOUTH OF CORDOBA – ARGENTINA.* The area is characterized by parabolic dunes with temporary and permanent lagoons of different dimensions. They present a complex geochemical spatial pattern. The objective is to characterize the dynamics and geochemistry (general and isotopic) of the unconfined aquifer – surface water relationships in the sandy plain of the South of Cordoba. Furthermore, to explain possible water mixtures and geochemical evolution, the simulation was performed using inverse numerical modeling to validate the conceptual model. The conceptual and numerical models explain that salt and brackish lagoons are the result of a mixture of local fresh groundwater and regional salty groundwater (from western areas). The obtained values indicate that the composition of the salt and brackish water of the studied lagoons is achieved by mixing the initial solutions at a proportion of approximately 41/59 (fresh/salty) and 88/12 (fresh/salty) respectively. The dominant processes are dissolution of salts, cation exchange Ca/Na and high evaporation processes in the lagoons.

Palabras clave: Médanos. Geoquímica. Procesos de mezcla. Modelación numérica.

Key words: Dunes. Geochemical. Mixing processes. Numerical modeling.

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Córdoba-Argentina.

² Dpto. de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto. Río Cuarto – Córdoba – Argentina.

Dirección Postal: Ruta 36 km 601. X5804BYA Río Cuarto, Argentina. E-mail: fbecher@exa.unrc.edu.ar / fatinoe27becher@gmail.com; mblarasin@exa.unrc.edu.ar.

Introducción, objetivo y ubicación del área estudiada

La zona de estudio, que abarca una superficie de 1.000 km², comprende parte de la planicie medanosa ubicada al norte del río Quinto en la provincia de Córdoba (figura 1A). Desde finales del siglo XIX esta región se caracteriza por el desarrollo de actividades agropecuarias, con incremento en la presión de uso del territorio desde 1950, debido al aumento de la mecanización e implementación de uso de agroquímicos. A pesar de tratarse de una región con desarrollo edáfico pobre, fundamentalmente suelos del orden de los Entisoles (Jarsún *et al.*, 2003), en las últimas décadas han ido avanzando los cultivos por sobre la actividad ganadera. Se registran además procesos de concentración de tierras, aumento de tamaño de las parcelas de cultivos, desplazamiento de cereales por oleaginosas (soja) y despoblamiento rural (Blarasin *et al.*, 2005). En relación al agua, se emplea fundamentalmente la subterránea correspondiente al acuífero libre o freático, cuyo destino es el consumo humano, ganadero y riego. Los problemas ambientales más significativos y reconocidos por la población, relacionados al sistema hidrológico subterráneo, son aquellos vinculados a la calidad natural poco adecuada (por los elevados tenores de arsénico y flúor) o a contaminación. De modo más localizado pueden ocurrir variaciones de nivel freático, siendo en general más problemático el ascenso del mismo ya que puede generar dificultades en el laboreo rural o directamente anegamiento de áreas deprimidas. Como consecuencia de esto la calidad de vida puede verse afectada en distintos aspectos como salud, vivienda, trabajo, entre otros (Bécher Quinodóz, 2014; Bécher Quinodóz *et al.*, 2014). Para dar respuesta a diferentes problemas como los mencionados, es necesario conocer el funcionamiento hidrológico de un área, que comprenda tanto el sistema subterráneo como el superficial y sus interrelaciones dinámicas y químicas. Así, en muchas situaciones los cuerpos de agua superficial obtienen agua y solutos de los sistemas de agua subterránea y en otros, los sistemas superficiales constituyen la fuente de recarga de acuíferos siendo por lo tanto responsables de algunos de sus cambios en la composición química natural y en la cantidad de agua. Al sumar acciones humanas, la extracción de agua superficial puede generar variaciones del nivel freático en las inmediaciones o por el contrario, el bombeo del acuífero libre puede disminuir el agua disponible en arroyos, lagos o humedales (Blarasin *et al.*, 2005; Manzano *et al.*, 2009; Bécher Quinodóz, 2014). Dependiendo de las relaciones entre los cuerpos de agua, la contaminación del agua superficial puede provocar una degradación de la calidad del agua del acuífero libre y por el contrario la contaminación del agua subterránea puede degradar la superficial (Navarro Mendoza *et al.*, 2002; Bécher Quinodóz *et al.*, 2014). Por lo tanto, para una gestión eficaz del recurso hídrico, en cualquier entorno hidrológico y de uso del territorio, se requiere de una clara comprensión de los vínculos físico- químicos entre el agua superficial y el agua subterránea. En este marco, se plantea como objetivo realizar la caracterización hidrodinámica e hidrogeoquímica (general e isotópica) de las relaciones agua superficial – subterránea en el ambiente medanoso del Sur de Córdoba. Se realiza además la simulación en la evolución geoquímica del agua a partir de procesos de ganancia y/o pérdida de iones en la solución y procesos de mezcla, mediante modelación numérica inversa, para validar el modelo hidrogeológico conceptual. Contar con este tipo de información permite una mejora en el manejo y gestión de los recursos hídricos superficial y subterráneo.

Materiales y métodos

Se realizó la recopilación y el análisis de antecedentes (bibliográficos, cartográficos, geológicos, geomorfológicos, históricos, etc.), del área y tema a investigar, además de la integración

de la información existente. La investigación se llevó a cabo a escala 1:50.000, sobre la base del análisis y compilación de imágenes satelitales (Google Earth, LANDSAT ETM+) y hojas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Se efectuó la caracterización climática del área a través del tratamiento e interpretación de la información metodológica (especialmente precipitaciones), procedentes de la estación El Colorado – El Olvido con una serie temporal de 111 años (1903 - 2014).

El estudio geológico-geomorfológico se llevó a cabo a través de la descripción del relieve, perfiles litológicos aflorantes y procedentes de perforaciones, efectuándose en ambos casos la recolección de muestras de sedimentos para posterior análisis textural (tamices ASTM, escala Udden - Wendworth). De estos análisis se obtuvieron los histogramas con los porcentajes de las distintas fracciones granulométricas. Algunas muestras fueron seleccionadas para el análisis mineralógico de las fracciones retenidas en el tamiz 270 (53-63 μ) y fracción arcilla (<2 μ). Para el análisis mineralógico de las fracciones retenida en el tamiz 270, las muestras se introdujeron en un separador de partículas ultrasónico, por un lapso de 5 minutos, luego se efectuó el tamizado vía húmedo y se deja secar a estufa a una temperatura inferior a los 30°C. Las muestras se enviaron luego al Laboratorio de Petrotomía, donde se las preparó en un montaje de grano suelto para las determinaciones correspondientes por parte de personal del área de Mineralogía (Departamento de Geología, UNRC). El montaje se realizó en un medio constituido por una resina epoxi de índice de refracción aproximadamente 1,560 - 1,575 (variable de acuerdo a las condiciones de fraguado). La fracción arcilla, fue determinada mediante difracción de Rayos X (DRX). El pretratamiento de las mismas se llevó a cabo según Besoain (1985), analizando muestras al natural. Las determinaciones e interpretaciones mineralógicas se realizaron con colaboración del Área de Suelos de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) utilizando un equipo de uso compartido situado en la Universidad Nacional de Córdoba (Phillips PANalytical X'PERT-PRO, con Goniómetro PW3050/60, a 40 mA y 40 kV, y Ánodo de Cu, realizando un barrido entre 2° y 35° para muestras naturales). Los diagramas de rayos X se generan con el programa PANalytical X'PERT-HighScore (PW3209), Versión 2.1b. Para complementar la tarea de reconstrucción del subsuelo se realizó prospección geoelectrónica mediante sondeos eléctricos verticales (SEV) según disposición Schlumberger (GEOMETER MPX-400. Ponti Electronics). Las curvas de resistividad aparente resultantes fueron procesadas con aplicaciones informáticas específicas, comparándose los resultados con datos de perforaciones.

Para el análisis hidrogeológico se estableció una red preliminar de pozos, con una densidad adecuada a la zona y a la escala de trabajo seleccionada para realizar el inventario de los mismos. Se trabajó a escala 1:50.000, realizándose un censo de perforaciones con una densidad de muestreo aproximada, de un pozo cada 35 km² para el acuífero libre, quedando la red censada conformada por 22 pozos, que captan de los primeros 20 metros del acuífero libre. El censo hidrogeológico consistió en el relevamiento de las mencionadas perforaciones, recabándose información vinculada a litologías atravesadas, diseño de pozo (profundidad de captación, filtros, etc.) y diferentes aspectos hidráulicos. Además, se efectuó la medición de profundidad de nivel estático del acuífero libre, con una sonda piezométrica de señal lumínica y sonora (Solinst). Para el análisis hidrodinámico del acuífero libre se elaboraron e interpretaron el mapa de equipotenciales hidráulicos y profundidad del nivel freático. El primero se usó como base para definir divisorias de agua, áreas de recarga y descarga del acuífero y para calcular gradientes hidráulicos. Teniendo en cuenta aspectos granulométricos del acuífero, se calcularon velocidades de flujo de agua subterránea. Con ambos mapas y la base topográfica se analizaron las relaciones hidráulicas entre los sistemas hidrológicos lagunas – acuífero libre; mediante numerosos perfiles ubicados en sitios de interés (Ej: Perfil A-A).

En la toma de muestras de agua subterránea en cada perforación, se garantizó la renovación del agua de la captación dejando fluir un mínimo de 3 volúmenes de pozo (Vázquez-Suñé, 2009), controlando además la temperatura del agua hasta su estabilización. Luego, el recipiente de muestreo fue enjuagado 2 veces con el agua de la perforación y llenado por completo. En los sistemas hidrológicos superficiales lénticos (lagunas, pantanos), se realizó el relevamiento de los diferentes cuerpos de agua presentes, clasificándolos en función de su origen y régimen temporal (permanentes/temporarias). Además, se realizó *in situ* la determinación de parámetros de calidad y la toma de muestras, para posterior análisis físico-químico e isotópico. En ambos sistemas hidrológicos, se midieron *in situ* pH y temperatura con un medidor Hanna HI 98127, conductividad eléctrica (CE) con conductímetro Hanna HI 9033 y oxígeno disuelto con oxímetro YSI model 95. Los análisis físico-químicos de las muestras, siguiendo *Standard Methods* (APHA, AWWA y WPCF, 2005), fueron realizados en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología (UNRC). Se corroboraron los datos obtenidos en el campo respecto a CE y pH (con electrodo Orion), y se midieron: carbonatos ($\text{CO}_{3,2}$) y bicarbonatos (HCO_3), mediante titulación potenciométrica con electrodo selectivo Orion - Thermo; sulfatos ($\text{SO}_{4,2}$) por turbidimetría (con centrífuga Macrotronic); cloruros (Cl -) mediante titulación colorimétrica con nitrato de plata, calcio (Ca_2+) y magnesio (Mg_2+) por titulación colorimétrica con EDTA; sodio ($\text{Na}+$) y potasio ($\text{K}+$) por fotometría de llama (fotómetro digital Metrolab 315). Finalmente se efectuó el análisis de la información hidrogeoquímica obtenida durante las etapas de campo y laboratorio para el acuífero libre y el agua superficial (sistemas lénticos) de la zona estudiada. Las muestras fueron clasificadas en función de los iones dominantes (Custodio, 1993) definiéndose los tipos geoquímicos y se elaboraron mapas de distribución areal de CE e hidroquímicos de interés (relaciones iónicas, diagramas de Stiff). Las determinaciones isotópicas, ^{18}O y ^2H , fueron realizadas por personal del laboratorio de isótopos estables y de tritio del INGEIS (Instituto de Geocronología y Geología Isotópica) que cuenta con un sistema de gestión de calidad bajo normas ISO/IEC 17025. Con la información obtenida, se elaboraron los diagramas convencionales ^2H vs ^{18}O , se calcularon los estadísticos más importantes y se elaboraron diagramas de caja para las variables ^2H y ^{18}O de manera de ayudar a las interpretaciones isotópicas. Los resultados isotópicos fueron también utilizados para interpretar relaciones agua superficial - subterránea.

La información resultante de la caracterización hidrodinámica e hidrogeoquímica, permitió elaborar el modelo hidrogeológico conceptual. El modelo hidrogeoquímico de las relaciones de mezcla entre aguas superficial - subterránea, fue corroborado mediante modelación geoquímica de tipo inversa utilizando el programa computacional PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) basado en balance de masas. La simulación seleccionada permitió establecer, a partir de una solución inicial y otra final, vinculadas hidráulicamente, las posibles reacciones químicas que tuvieron lugar en el medio y que condujeron a la evolución química observada, asumiendo flujo de tipo pistón. El programa seleccionado permite hacer las primeras aproximaciones de balances de masas y el cálculo de la distribución de especies químicas a partir de: a) disolución de minerales b) procesos de mezcla entre aguas de diferente composición c) cambios en la temperatura d) procesos de evaporación y e) cambios en las condiciones redox. En las modelaciones realizadas se consideraron como variables químicas (*constraints*) a los iones mayoritarios HCO_3^- , $\text{SO}_{4,2}$, Cl -, Na +, K +, $\text{Ca}+2$ y $\text{Mg}+2$; mientras que la selección de las fases fue realizada en función de la mineralogía descripta para la zona de estudio.

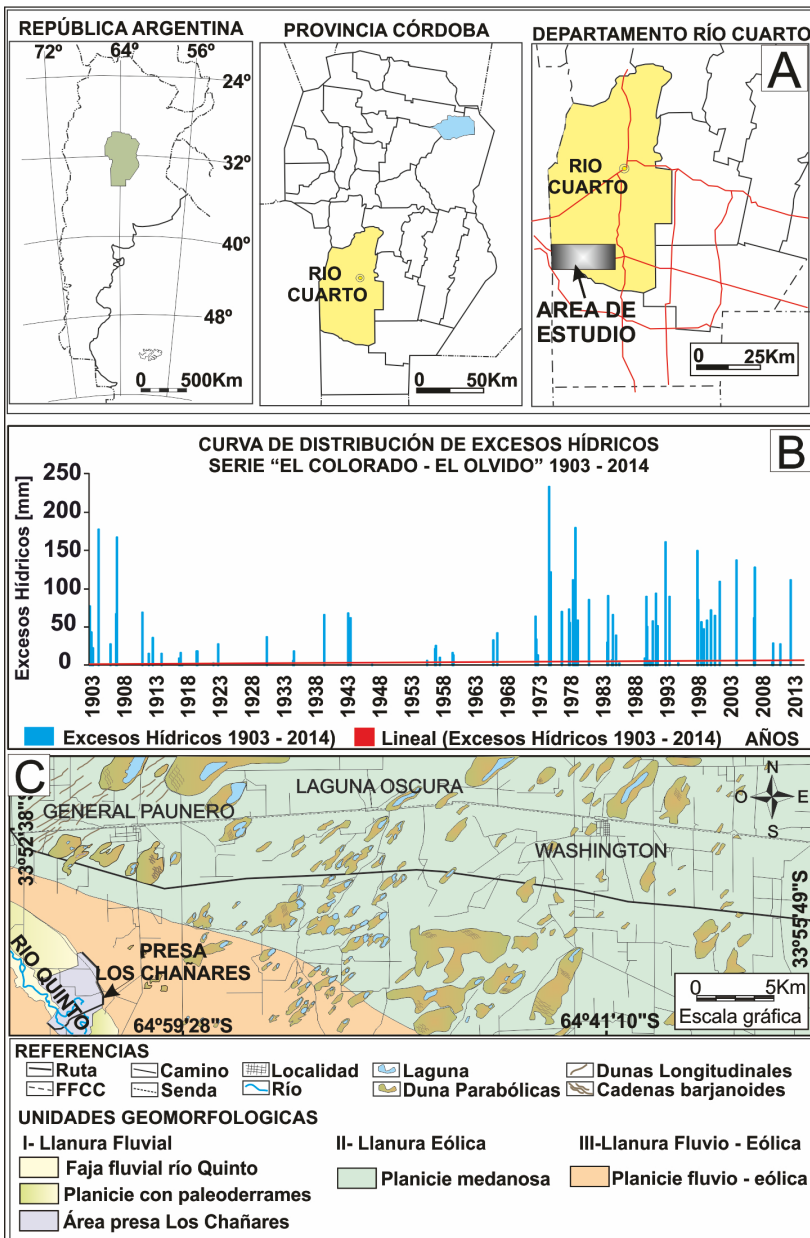


Figura 1. A)- Localización área de estudio. B)- Curva de distribución de Excesos hídricos resultantes del balance hídrico para la serie de precipitaciones El Colorado – El Olvido (1903-2014). C)- Mapa geomorfológico de la zona Paunero – Laguna Oscura – Washington y entorno rural. Modificado de Bécher Quinodóz et al. (2014). **Figure 1.** A) - Study area. B) – Water excesses resulting from a water balance for the rainfall series El Colorado – El Olvido (1903-2014). C) - Geomorphological map of the Pannero – Laguna Oscura – Washington region. Modified Bécher Quinodóz et al. 2014.

Resultados y discusión

Caracterización climática

El clima en la zona es de tipo mesotermal subhúmedo seco, con una precipitación media anual de 821 mm, concentrada principalmente en primavera – verano. La serie de precipitaciones anuales (P) analizada fue Ea. El Colorado – El Olvido (1903 - 2014) con un mínimo de 259 mm y un máximo de 1.359 mm. El balance hídrico seriado de paso mensual muestra que, para un almacenamiento de agua en el suelo de 150 mm, entre 58,5 y 100% de P es devuelto a la atmósfera como evapotranspiración real. Los déficits se alojan fundamentalmente en los meses de otoño-invierno y los excesos, variables entre 0 y 537 mm, en primavera – verano, muy condicionados por el comportamiento de P. La tendencia de los excesos hídricos es creciente (figura 1B), fundamentalmente para los últimos años de la serie (1972 – 2014).

La distribución temporal de los excesos hídricos del período analizado, concuerda con el comportamiento hidrológico observado en toda la región del Sur de Córdoba (Blarasin *et al.* 2014). Así, en épocas de mayores excesos se registran aumentos de superficie de agua en lagunas instaladas en dunas parabólicas, incremento en los caudales erogados por los arroyos y ascenso de niveles freáticos, mientras que durante los años más deficitarios, se observan descensos del nivel freático y reducción de los cuerpos de agua (Bécher Quinodóz, 2014).

Caracterización geológica y geomorfológica

La zona de estudio se ubica íntegramente dentro de la provincia geológica Llanura Chaco Pampeana, al Este y Sudeste de las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En el área de estudio no aflora basamento cristalino, ni ha sido detectado en las perforaciones realizadas con el fin de abastecer de agua a las poblaciones presentes. Los materiales reconocidos corresponden a sedimentos cuaternarios (figura 1C), perteneciendo la mayoría de los depósitos aflorantes a la Fm Laguna Oscura (Holoceno superior, Cantú, 1992). También afloran depósitos históricos (últimos siglos), representados por materiales de origen eólico, aluvial y palustres. En general, representan ciclos de agradación controlados por eventos neotectónicos y fundamentalmente por oscilaciones climáticas (Degiovanni, 2008). Desde el punto de vista geomorfológico el área se ubica en la Planicie Arenosa del Sur de Córdoba. El relieve, con pendientes en general menores al 2 %, es plano a suavemente ondulado, de carácter predominantemente agradacional, compuesto fundamentalmente por cuerpos medanosos de diferente tipo y tamaño (figura 1C), aunque en el ángulo sudoeste el área es atravesada por un pequeño tamo del río Quinto. Se reconocieron tres grandes ambientes geomorfológicos: I- Llanura Fluvial, II- Llanura Eólica y III- Llanura Fluvio - Eólico. En el extremo SO, se identifica la unidad llanura fluvial (I), la cual comprende la faja actual del río Quinto y la planicie con paleoderrames. La llanura fluvio – eólica (III), constituye un sector de transición entre la unidad anterior (I) y la llanura eólica (II). La misma se caracteriza por presentar un relieve suavemente ondulado, resultante de la interacción y yuxtaposición del “Mar de arena pampeano” (Iriondo, 1999) con antiguos derrames del río Quinto. La Llanura eólica (II) por su parte, comprende la mayor extensión dentro del área, la misma está caracterizada por la presencia de un relieve medanoso, en el que viejas dunas longitudinales fueron retrabajadas durante el clima actual por vientos del NE, generándose un paisaje de dunas parabólicas cuya removilización, producida por vientos secundarios, ha formado cadenas barjanoides (Blarasin, 1984; Blarasin y Sánchez, 1987). En el sector centro y NE se identifica la mayor acumulación de dunas parabólicas las que en su

mayoría se encuentran fijas por la vegetación, reconociéndose focos activos, con desarrollo importante de cadenas barjanoides. En la cubeta principal de las dunas parabólicas se reconocen lagunas temporarias y/o permanentes de variado tamaño (0,3 - 7,0 km) y profundidad (2 - 12 m). Las viejas dunas longitudinales de orientación SO-NE, se reconocen especialmente en el extremo NE, en el sector de General Paunero (figura 1C).

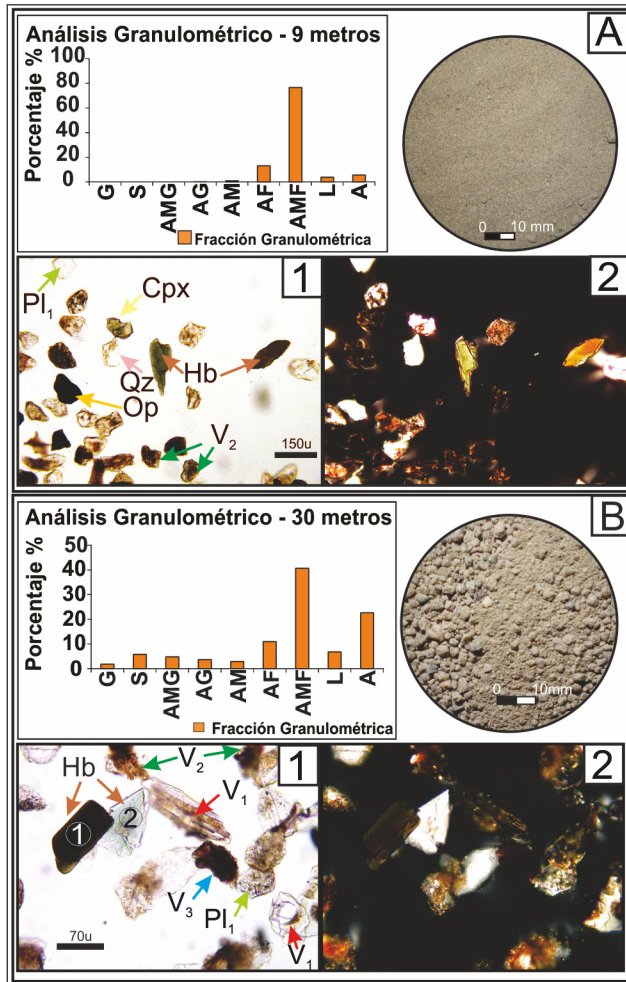


Figura 2. Mineralogía de la fracción retenida en el tamiz 270 (53 – 63 μ). **A)**- Muestra seleccionada del ambiente eólico, sector Laguna Oscura. **1)** Nícoles paralelos, **2)** Nícoles cruzados. **B)**- Muestra seleccionada del ambiente fluvial. **1)** Nícoles paralelos, **2)** Nícoles cruzados. Nomenclatura: V1 = Vidrio tipo 1. V2 = Vidrio tipo 2. V3 = Vidrio tipo 3. Qz = cuarzo. Pl = Plagioclase. Hn = Hornblende. Cpx = Clinopiroxeno. Op = opacos. **Figure 2.** The mineralogy of 270 - mesh fraction (53 - 63 μ). **A)** - Sample selected from the aeolian environment in Laguna Oscura. **1)** Parallel nicols, **2)** Crossed nicols. **B)** - sample selected from the fluvial environment. **1)** Parallel nicols, **2)** Crossed nicols. Classification: V1 = Glass type 1. V2 = Glass type 2. V3 = Glass type 3. QZ = Quartz. Pl = Plagioclase. Hn = Hornblende. Cpx = Clinopyroxene. Op = opaque.

En todas las unidades dominan sedimentos psamo – pelíticos con variable grado de cementación carbonática. En el ambiente fluvio – eólico aparecen subordinadas arenas gruesas y muy localmente gravas, mientras que en el ambiente eólico se destaca la fracción arenas muy

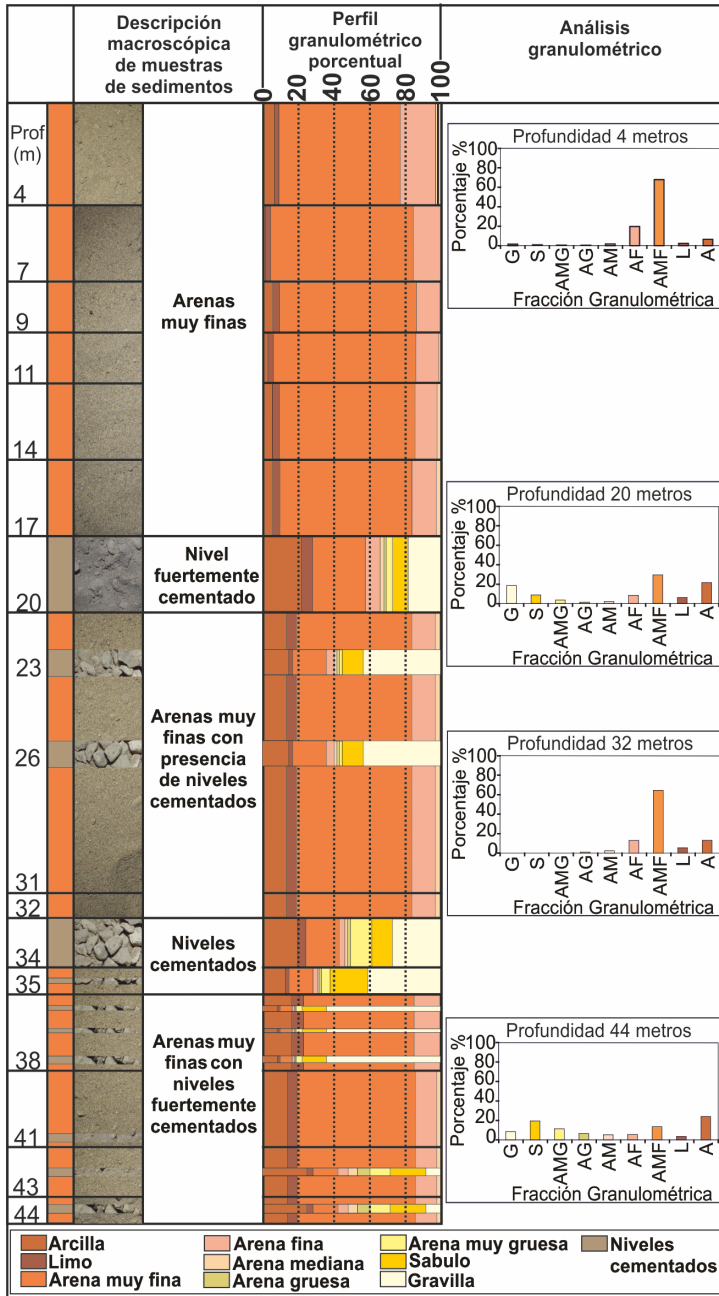


Figura 3. Perfil litológico correspondiente a la perforación localizada en el sector de Laguna Oscura y distribución granulométrica de muestras seleccionadas. Figure 3. Lithological profile of the perforation located in Laguna Oscura and granulometric description of selected sediment samples.

finas-limosas (Bécher Quinodóz *et al.*, 2014). El análisis y descripción mineralógica del área de estudio, se realizó en 4 muestras seleccionadas de perforaciones y sedimentos aflorantes, las que sirvieron de base para realizar modelación numérica de la evolución hidroquímica del agua y

posibles mezclas agua superficial – subterránea. De las muestras seleccionadas, 3 se corresponden con sedimentos de origen eólico ubicados en el sector medanoso de Laguna Oscura (extremo NO) y la 4° con sedimentos de origen fluvial, asociados a paleoderrames del río Quinto. Los estudios mineralógicos realizados permitieron identificar para ambos ambientes geomorfológicos, la dominancia de vidrio volcánico y minerales como cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita, anfíboles y piroxenos (figura 2a y b). En la fracción arcilla se reconocieron entre otros, illita e illita-esmectita (Bécher Quinodóz, 2014).

Caracterización hidrogeológica

El estudio de la geología superficial, de los perfiles expuestos, el inventario de perforaciones de profundidades variables y los resultados e interpretaciones de los SEV, permitieron generar un modelo hidrogeológico preliminar. El acuífero estudiado es el libre, el cual exhibe moderada homogeneidad dado el dominio de sedimentos finos, aunque se reconocen cambios faciales que, a una escala local, implican anisotropías desde el punto de vista hidráulico. Los cambios faciales se vinculan a materiales más cementados o sectores medanosos, que tienen proporciones de 10 % hasta 37,2 % de arenas finas, o más gruesos (17,1 % y 30,3 % de arenas gruesas y medias respectivamente) asociados al ámbito de la faja fluvial del río Quinto y áreas de paleoderrames. Los materiales dominantes en toda la zona, arenas muy finas, presentan valores de conductividad hidráulica (K) del orden de 1-2 m/día. En los ensayos de bombeo de agua realizados en perforaciones en zonas medanosas (Blarasin *et al.*, 2013), estos valores alcanzan hasta 5-7 m/d en sedimentos arenosos finos y medios. Los sectores con mejores propiedades acuíferas están vinculados a la faja fluvial actual del río Quinto, como así también a sistemas de médanos removilizados de la llanura arenosa. Esto se debe al predominio de materiales arenosos finos, medios, gruesos y con gravillas dispersas, en donde los valores de K, muy localmente, pueden alcanzar los 5-10 m/día, mejorando la circulación de agua (Bécher Quinodóz, 2014). Los análisis granulométricos realizados en una de las perforaciones (M116 - sector de Laguna Oscura), permitieron identificar desde la superficie y hasta los 17 m, un dominio de la fracción arenas muy finas, mientras que a partir de dicha profundidad y hasta los 44 m la fracción anterior, se encuentra intercalada con niveles fuertemente cementados (calcretas), los que van desde pocos centímetros hasta los 3 metros de espesor (entre 17 - 20 m y 32 - 35 m). Las fracciones correspondientes con arenas gruesas a gravillas, observables a partir de los 17 m (figura 3), se corresponden con fragmentos derivados de niveles fuertemente cementados (Bécher Quinodóz, 2014).

Caracterización hidrodinámica general y de relaciones acuífero libre – lagunas

La superficie freática es de morfología casi plana a suavemente ondulada. El sentido de escurrimiento general del agua subterránea es ONO – ESE (figura 4A). La recarga del acuífero es areal debido a la infiltración a partir de precipitaciones, mientras que las dunas activas con materiales más sueltos de más alta permeabilidad constituyen sectores de recarga preferencial.

Los gradientes hidráulicos del orden de 0,1 % a 0,4 % se asocian a áreas más planas y sectores medanosos, respectivamente. Las velocidades de escurrimiento del agua subterránea, teniendo en cuenta la porosidad efectiva de los sedimentos, son de 0,04 - 0,07 m/d (en ambientes planos) a 0,25 - 0,5 m/d (en los campos de dunas del sector NO). Considerando la morfología en planta de la superficie freática y la dirección de las líneas de flujo del agua subterránea,

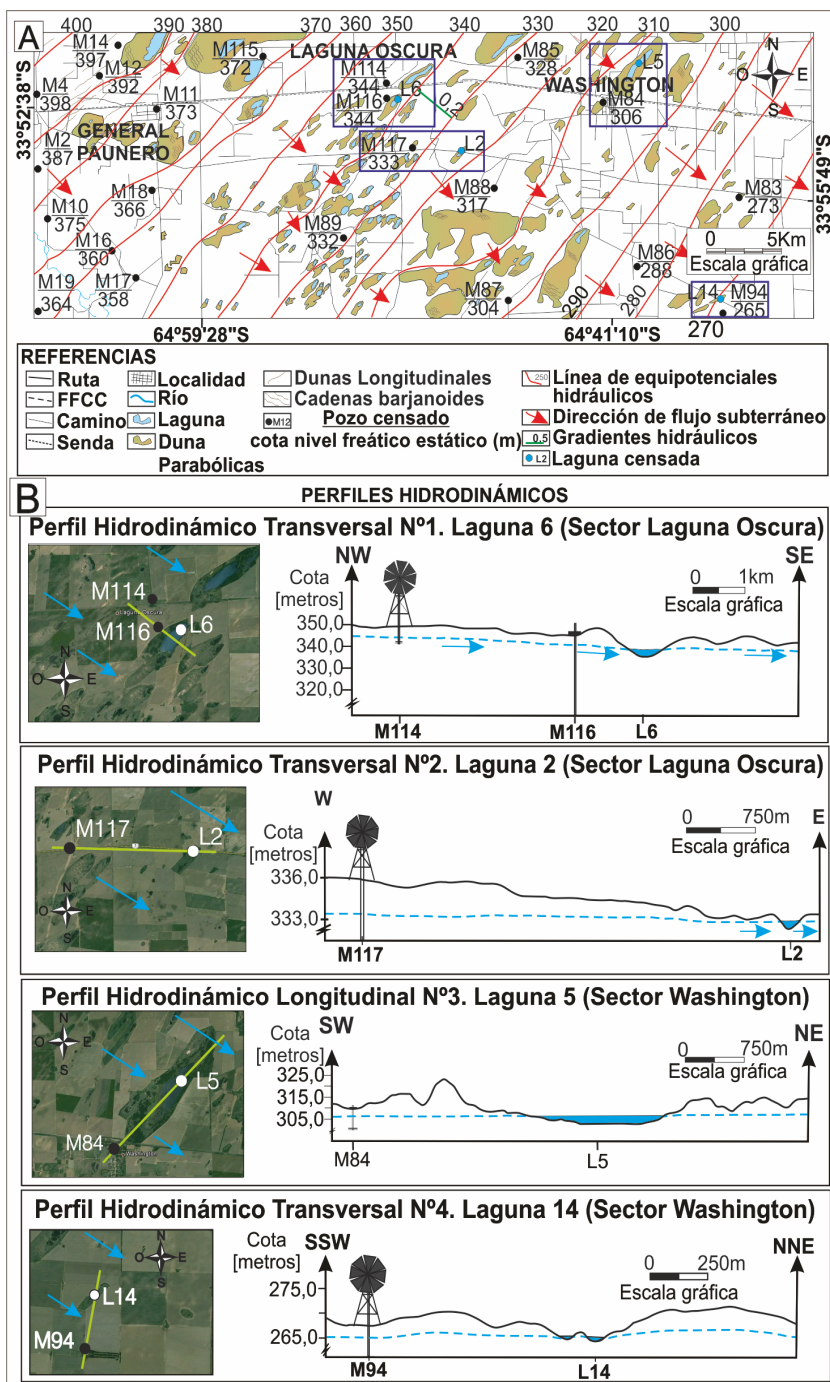


Figura 4. A)- Mapa de equipotenciales del acuífero freático. B)- Perfiles hidrodinámicos transversales. Figure 4. A)- Equipotential map of the unconfined aquifer. B) – Transverse hydrodynamic profiles.

con respecto a los diversos cuerpos de agua y la topografía (figura 4A), puede interpretarse una relación de influencia por parte del acuífero libre hacia las lagunas, especialmente en la margen noroccidental. Para verificarlo y establecer con mayor detalle el tipo de relación existente entre ambos sistemas hidrológicos, se realizó una serie de perfiles transversales (figuras 4A y B). De los mismos se interpreta que existe en todos los casos una relación de influencia por parte del acuífero, es decir que las lagunas actúan como área de descarga de los flujos de agua subterránea (figura 4B).

Caracterización hidrogeoquímica general e isotópica

El estudio estadístico de la calidad de las muestras de agua de las lagunas, permitió establecer que estas presentan conductividades eléctricas que varían desde los 1.371 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los 11.080 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un promedio de 6.398 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figura 5A), reconociéndose lagunas de aguas dulces, salobres y saladas (0,9 a 7,7 g/L), con un tipo geoquímico variado desde bicarbonatadas sódicas hasta cloruradas – sulfatadas sódicas. El acuífero libre presenta valores de conductividad eléctrica variables entre 487 a 12.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores inferiores a los 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se corresponden con perforaciones que captan en los primeros 10 - 15 m metros del acuífero libre y que interceptan la lente de agua dulce, originada por recarga local en los cuerpos medanosos. Por su parte el agua más salada se asocia a captaciones más profundas (20 - 30 metros) o bien ubicadas en áreas planas, de descarga hidrológica. Las muestras de agua subterránea analizadas presentan al igual que las lagunas, un patrón geoquímico variado, del tipo bicarbonatadas sódicas hasta cloruradas sódicas y de carácter aniónico mixto.

El análisis de las relaciones químicas agua superficial – subterránea, se realizó a través del trazado de perfiles hidroquímicos transversales (figura 5B), habiéndose tenido en cuenta los aspectos hidrodinámicos discutidos previamente. Como se desprende de los perfiles anteriores, la relación entre las lagunas y el acuífero libre, muestra algunas diferencias geoquímicas, observándose en general que las lagunas son más saladas que el acuífero, aumentando especialmente sodio, sulfatos y cloruros, aspectos vinculados a los procesos de evaporación de los cuerpos superficiales (L6/L2/L14) y a la posible llegada de flujos más profundos de aguas más saladas. Se detectó sólo una laguna de agua dulce (L5) la que se vincula a la recarga local del médano circundante.

En función de lo expuesto y con el fin de realizar un mayor ajuste del modelo hidrodinámico e hidrogeoquímico conceptual de la zona de trabajo, se llevó a cabo la determinación de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$).

La isotopía ambiental, es una herramienta en hidrogeología que permite identificar no sólo el origen, la ubicación de las fuentes de recarga al acuífero y procesos geoquímicos que puedan tener lugar en el medio (reacciones agua – roca, mezcla de distintas aguas y precipitación – disolución), sino también establecer posibles conexiones hidráulicas entre los sistemas superficiales y subterráneos. El estudio isotópico, cuyos resultados se muestran en la figura 6, se llevó a cabo en muestras de agua correspondientes a ambos sistemas hidrológicos, ampliándose además la investigación al área de aporte (cuenca alta) para las muestras de agua del acuífero libre, hacia el Noroeste, aguas arriba y fuera de la zona estudiada (figura 7). Esto está vinculado a la necesidad de contar con datos de las áreas de aporte y así poder establecer conexiones

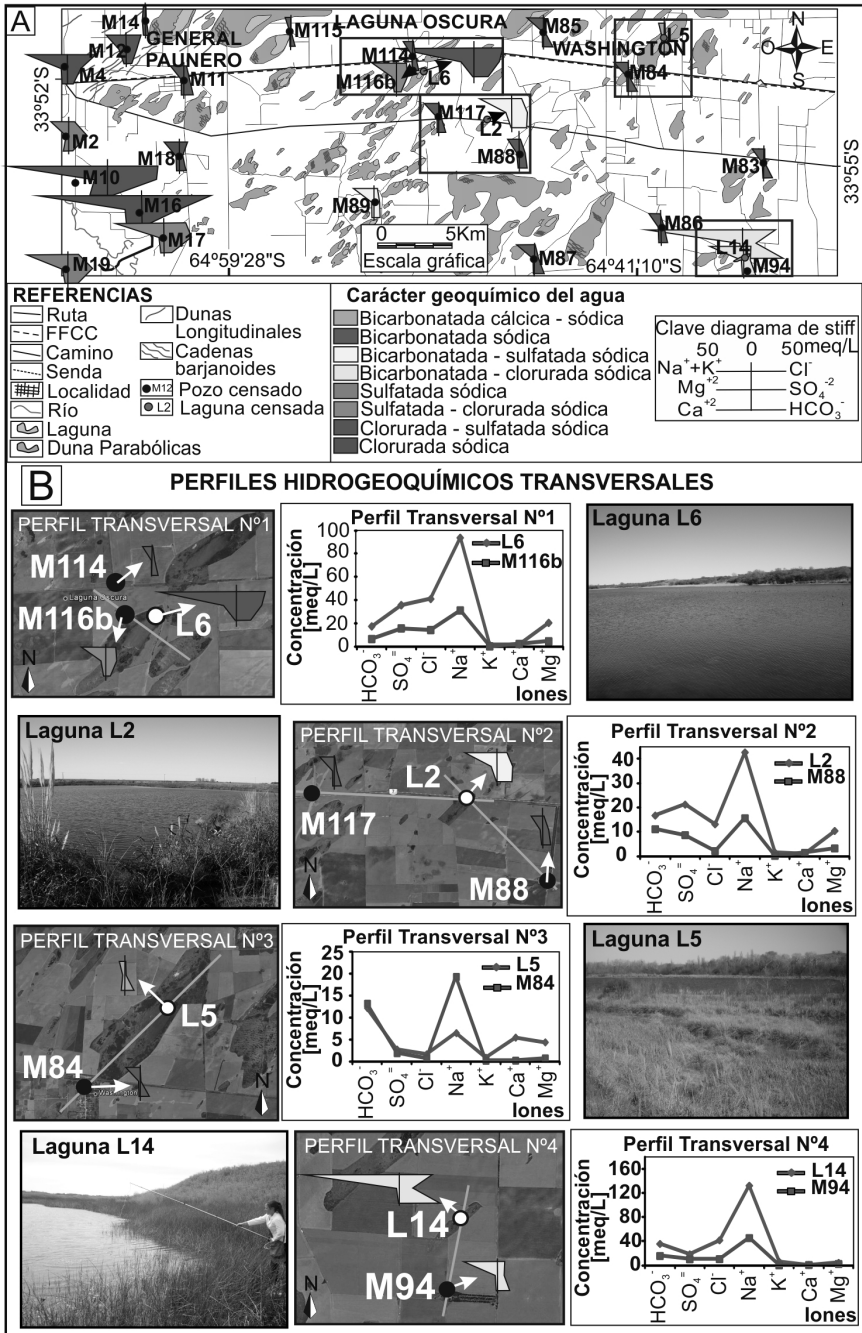


Figura 5. A)- Mapa de carácter hidrogeoquímico del agua superficial (lagunas) y subterránea (acuífero libre). Localización perfiles hidrogeoquímicos transversales. B)- Perfiles Hidrogeoquímicos transversales, relaciones lagunas – acuífero libre. **Figure 5.** A)- Hydrogeochemical map of the surface water (lagoons) and groundwater (unconfined aquifer) with location of transverse hydrogeochemical profiles. B) - Transverse hydrogeochemical profiles, relationships between unconfined aquifer -lagoons.

hidráulicas. A partir del diagrama convencional $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ (figura 6), se observa en general que las muestras de agua de las lagunas presentan valores más enriquecidos de $\delta^{18}\text{O}$ (1 ‰ a 8,3 ‰) y de $\delta^2\text{H}$ (-2 ‰ a 42 ‰), que los del acuífero libre, cuyos valores son de $\delta^{18}\text{O}$ (-4,7 ‰ a -4,1 ‰) y de $\delta^2\text{H}$ (-29 ‰ a -22 ‰). A su vez el acuífero en el sector se encuentra más enri-

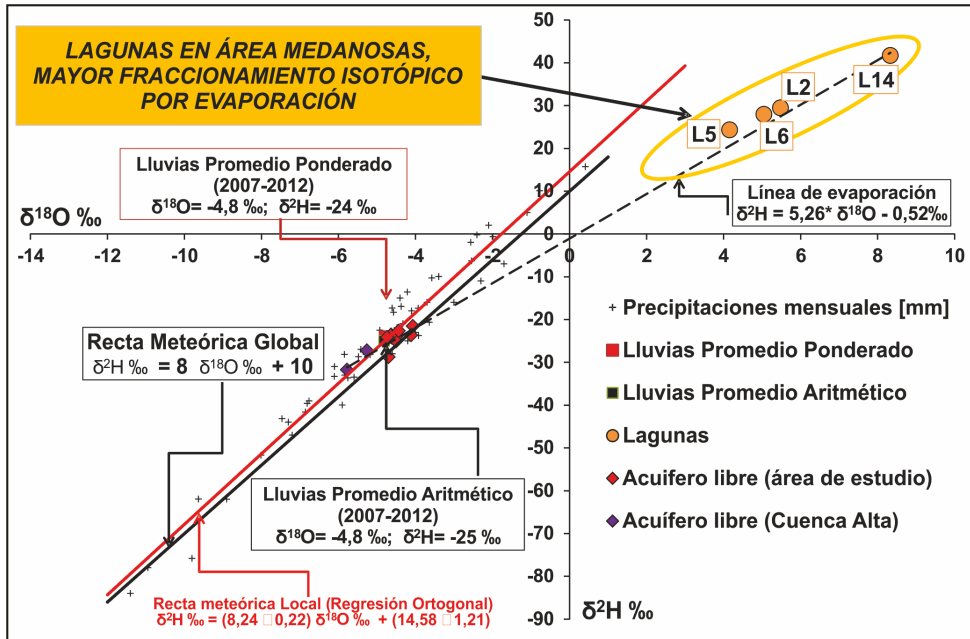


Figura 6. $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ para muestras de agua de lagunas y acuífero libre. Figure 6. $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ for water samples from lagoons and unconfined aquifer.

quecido que las muestras de agua del acuífero libre ubicadas en cuenca alta con valores de $\delta^{18}\text{O}$ (-5,8 ‰ a -5,3 ‰) y de $\delta^2\text{H}$ (-32 ‰ a -27 ‰). En la figura 6 se visualiza que las muestras de las lagunas y las del acuífero libre (zona de trabajo y cuenca alta), están alineadas en una recta de evaporación explicada por la ecuación $\delta^2\text{H} = 5,26 * \delta^{18}\text{O} - 0,52 \text{ ‰}$.

Interpretación del modelo hidrodinámico e hidrogeoquímico conceptual del área de estudio

El empobrecimiento isotópico que presentan las muestras del acuífero en cuenca alta es atribuible a recarga de agua procedente de lluvias más livianas isotópicamente, precipitadas en sectores serranos a partir de vapor de agua más empobrecido, debido al efecto de continentalidad y de altura (Dansgaard, 1964; Panarello *et al.*, 1984) pudiendo incluso indicarse que los altos excesos de deuterio observados se atribuyen a vapor reciclado vinculado con la ITCZ (Zona de Convergencia Intertropical) y ENSO positivos (Bécher Quinodóz, 2014). Por su parte, el enriquecimiento isotópico de las muestras de agua de las lagunas, resultante de fraccionamiento isotópico por evaporación, permite interpretar que estos cuerpos de agua se alimentan, al menos parcialmente, del acuífero libre ya que en función de la gráfica de la figura 6, se visualiza que las muestras de las lagunas y las del acuífero (zona de trabajo y cuenca alta), están alineadas en una misma recta de evaporación explicada por la ecuación $\delta^2\text{H} = 5,26 * \delta^{18}\text{O} - 0,52 \text{ ‰}$, marcando

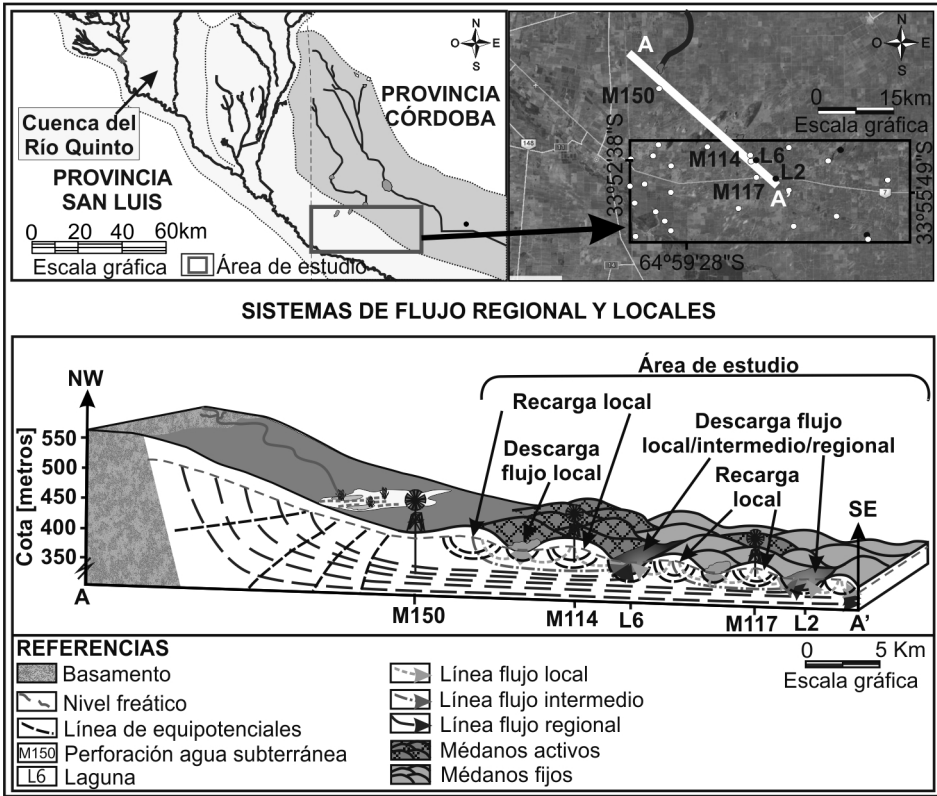


Figura 7. Sistema de flujos de agua subterránea regionales, intermedios y locales de agua. Situación modelada. **Figure 7.** Regional, intermediate and local groundwater flow systems. Modeled scenario.

a su vez procedencia y vínculo entre los sistemas hidrológicos.

Los resultados hidrodinámicos e hidrogeoquímicos generales e isotópicos obtenidos permiten entonces interpretar que las lagunas bajo estudio, localizadas en cubetas de deflación de dunas parabólicas, actúan como zonas de descarga de los flujos de agua subterránea, es decir el acuífero presenta un carácter influente con respecto a las lagunas, las que luego sufren diferente grado de evaporación.

A pesar de demostrada la conexión hidráulica laguna - acuífero, ninguna de las lagunas presenta la misma salinidad ni el mismo patrón en la distribución de las especies químicas (figura 5B), por lo que se interpreta entonces que los flujos de agua subterránea intervinientes, no proceden del mismo sector, es decir que en varias de las lagunas se produce la confluencia de flujos locales e intermedios y eventualmente algunos más regionales, que se mezclan en forma variable con escurrimientos superficiales o precipitaciones, a los que se suman procesos de evaporación por encontrarse estos sistemas expuestos a la atmósfera (figura 6).

De esta manera las bajas CE que presenta el acuífero libre, se asocian con perforaciones someras que captan de los primeros 10 metros del acuífero que interceptan flujos subterráneos locales. Del mismo modo, las lagunas poco profundas de régimen temporario, de agua más dulce, se vincularían con flujos de agua subterránea activos, más locales (áreas de descarga local del médano circundante), en donde el nivel freático puede fluctuar en el tiempo en función de los excesos hídricos. Se han medido fluctuaciones del orden de 1,5 m (Bécher Quinodóz, 2014). Por

su parte los máximos valores de CE se encuentran asociadas con perforaciones que captan a una profundidad del orden de 20 m o bien con las lagunas más grandes, estables y, en general, de régimen permanente, interpretándose que se corresponderían con áreas de descarga de flujos de agua subterránea intermedios o regionales procedentes del Oeste provincial. Estos aspectos han sido discutidos por otros autores para el sur de Córdoba. (Blarasin *et al.*, 2005, Bécher Quinodóz, 2014).

Modelación numérica

Para ayudar a interpretar la gran variabilidad geoquímica (superficial y subterránea) de una zona relativamente pequeña y validar el modelo hidrogeológico conceptual, se aplicó modelación de tipo inversa. El código utilizado, además de ser una buena herramienta para hacer las primeras aproximaciones de balances de masa, permite simular procesos de mezcla al mismo tiempo que propone las posibles reacciones químicas que tienen lugar en el medio y que condujeron a la evolución observada, asumiendo flujo de tipo pistón. Las fases consideradas, teniendo en cuenta el análisis mineralógico y de eflorescencias salinas en la zona (Bécher Quinodóz, 2014) son: a) Calcita: ya que la presencia de CO_3Ca queda asegurada debido a la existencia de calcretos, carbonato en nódulos de variado tamaño o disperso en la masa de sedimentos. b)- CO_2 gas, disuelto en el agua y responsable principal de su agresividad. Se ha considerado esta fase dentro del modelo, debido a que los sistemas analizados son lagunas y acuífero libre es decir sistemas abiertos que lo incorporan. c)- Feldespato potásico, albita, dióxido, por ser los minerales presentes en los sedimentos en mayor porcentaje. Dada las condiciones climáticas y de tiempo, la meteorización es baja pero es capaz de aportar iones (Giuliano Albo, 2013) d)- SO_4Ca_2 , existe sulfato disponible, para luego ser lavado e incorporado a las soluciones que se mezclan, en el perfil del suelo y en superficie en las eflorescencias salinas que abundan en estos ambientes. Se destaca además la composición sulfatada cálcica – magnésica del agua de lluvia que recarga estos acuíferos (Bécher Quinodóz, 2014, Cabrera *et al.*, 2013). No fue empleada la fase ClNa , ya que al ser el Cl- un elemento conservativo es empleado por el programa para el cálculo de la mezcla.

En función del modelo hidrogeoquímico conceptual, descrito anteriormente, se seleccionaron dos situaciones para mostrar en este trabajo:

1)- Procesos de mezcla que explican las características geoquímicas de la muestra de la laguna L6 (salada).

La hipótesis que se plantea es que el agua salada de la laguna (L6) se debe a procesos de mezcla entre un agua subterránea local dulce, procedente de la recarga del médano circundante (M114) y agua subterránea intermedia/regional más salada (M150), procedente de la cuenca baja del arroyo Chaján (tabla 1), resultante de la evolución en la propia cuenca, y en dirección de flujo vinculado hidráulicamente a las lagunas que se modelan (figura 7).

Nº Muestra	pH	Cond. $\mu\text{S/cm}$	S.D.T. mg/l	$\text{CO}_3^{=}$ mg/l	CO_3H^- mg/l	$\text{SO}_4^{=}$ mg/l	Cl ⁻ mg/l	Na^+ mg/l	K^+ mg/l	Ca^{+2} mg/l	Mg^{+2} mg/l
M150(SI)	7,81	9070	6349	0	637	1261	1500	1498	17,3	96	115
M114(SI)	8,60	1320	924	17	488,5	161	40	311	7	12	10
L6 (SF)	8,60	8760	6132	63	1097	1706	1471	2184	60	40	251

Tabla 1. Análisis químico de las soluciones iniciales (SI) y final (SF). **Table 1.** Chemical analysis of the initial (IS) and final (FS) solutions.

Muestras	Modelo 6					
	Fraciones mezcla	Calcita mmol/L	CaX ₂ mmol/L	KX mmol/L	MgX ₂ [mmol/L]	CaSO ₄ ·2H ₂ O mmol/L
SI 1-M150	0,59	0,76	-2,83	0,52	2,56	0,90
SI 2-M114	0,41	0,52	-2,01	0,36	1,78	0,63

Tabla 2. Resultado de la modelación numérica realizada con PHREEQC. **Table 2.** Numerical modeling results (PHREEQC).

A través del programa PHREEQC, se han testeado 27 modelos posibles de los cuales se seleccionó el que mejor se ajusta a las restricciones tenidas en cuenta en el modelo conceptual (tabla 2).

Los valores hallados, luego de aplicar procesos de mezcla, indican que para alcanzar la composición salada del agua de la laguna (solución final), las soluciones iniciales deben mezclarse en un porcentaje aproximado 41/59 (dulce/salada). Además, debe producirse disolución de carbonatos y sulfatos e intercambio catiónico (Ca sale de la solución y pasa a posiciones de intercambio), para explicar los cambios que ocurren en el trayecto y la mezcla que da lugar al agua de la laguna, debiendo ésta última sufrir procesos de evaporación en un 53 %, como indica el modelo numérico.

2)- Procesos de mezcla que explican las características geoquímicas de la muestra de la laguna L2 (salobre).

El modelo conceptual planteado para la modelación es a lo largo de una línea de flujo donde se propone que una laguna salobre del área (L2), es producto también de la mezcla de aguas subterráneas locales dulces, vinculadas a la recarga en médanos (M117), con aguas subterráneas saladas (M150) procedentes de flujos intermedios/regionales que descargan en la laguna (tabla 3), pero se hipotetiza que hay una preponderancia de los flujos locales más dulces tal como se muestra en la figura 7.

Nº Muestra	pH	Cond. µS/cm	S.D.T. mg/l	CO ₃ ⁼ mg/l	CO ₃ H ⁻ mg/l	SO ₄ ⁼ mg/l	Cl ⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ⁺² mg/l	Mg ⁺² mg/l
M _{150(SI)}	7,81	9070	6349	0	637	1261	1500	1498	17,3	96	115
M _{117(SI)}	8,50	1760	1232	12	753	217	71	482	8	10	14
L2 (SF)	9,20	4380	3066	121	1050	1013	471	995	66	22	128

Tabla 3. Análisis químico de las soluciones iniciales (SI) y final (SF). **Table 3.** Chemical analysis of the initial (IS) and final (FS) solutions.

A través del programa PHREEQC, se han testeado 27 modelos posibles de los que se seleccionó el modelo que mejor ajusta en función de las restricciones tenidas en cuenta en el modelo conceptual (tabla 4).

En función de los valores encontrados y luego de aplicar procesos de mezcla, se establece que para alcanzar la composición salobre del agua de la laguna (solución final), las soluciones iniciales deben mezclarse en un porcentaje aproximado 12/88 (salado/dulce). Además, debe producirse disolución de sulfato de calcio e intercambio catiónico, para explicar los cambios que ocurren en el trayecto y la mezcla que da lugar al agua de la laguna, sufriendo esta última procesos de evaporación en un 59 %.

Los altos porcentajes de evaporación observables en ambas situaciones modeladas son coherentes con el resultado isotópico que muestra a las lagunas alineadas en una recta de evaporación (debido al alto fraccionamiento y enriquecimiento isotópico que produce este proceso) y con la posición de las muestras de las lagunas en la línea de evaporación.

Muestras	Fracciones mezcla	Modelo 13				
		CO ₂ (g)	CaSO ₄ ·2H ₂ O mmol/L	CaX ₂ [mmol/L]	MgX ₂ [mmol/L]	KX [mmol/L]
SI 1- M150	0,124	-0,78	0,42	- 0,92	0,39	0,15
SI 2- M117	0,876	-5,53	2,99	- 6,56	2,76	1,03

Tabla 4. Resultado de la modelación numérica realizada con PHREEQC. **Table 4.** Numerical modeling results (PHREEQC).

Conclusiones

La zona presenta un relieve fundamentalmente de origen eólico, con diferente tipo de dunas. Las dunas parabólicas y las cubetas asociadas poseen diferente tamaño, lo que condiciona la variabilidad en el tamaño y profundidad de las lagunas alojadas en las cubetas y también su relación hidráulica y química con el acuífero libre. La modelación geoquímica numérica realizada permite corroborar en forma general el modelo conceptual en el que se considera que el carácter salado y salobre de las lagunas L6 y L2 respectivamente, resultan de procesos de mezcla. Dicho comportamiento se debe a que ambas lagunas actúan como zona de descarga de los flujos intermedios/regionales (agua salada), procedentes del sector occidental y de flujos locales (agua dulce), procedentes de la recarga preferencial de médanos circundantes.

En función de los valores encontrados luego de aplicar procesos de mezcla mediante modelación numérica inversa se establece que, para alcanzar la composición salada del agua de la laguna L6 (solución final), las soluciones iniciales deben mezclarse en un porcentaje aproximado 41/59 (dulce/salada), mientras que para alcanzar la composición salobre de la laguna L2, las soluciones iniciales deben mezclarse en un porcentaje 88/12 (dulce/salada). Además, debe producirse en ambas disolución de sales, fundamentalmente CaSO₄ e intercambio catiónico Ca/Na, para explicar los cambios que ocurren en el trayecto y la mezcla que da lugar al agua de las lagunas, debiendo éstas sufrir procesos de evaporación en alto porcentaje, situación que se corresponde con los datos isotópicos encontrados, donde las lagunas muestran un alto fraccionamiento isotópico por evaporación.

A partir de los resultados alcanzados en el presente trabajo, puede concluirse que efectivamente, la zona comprende un mosaico geoquímico complejo en el que convergen flujos de circulación local, intermedia y regional. De este modo, las lagunas más grandes de carácter permanente, salobres y saladas, constituyen áreas de descarga de dichos flujos, en donde se producen procesos de mezcla de agua en variable proporción. En las más saladas domina la influencia de los flujos intermedios-regionales, mientras que en las salobres los flujos locales (agua dulce) resultan ser los dominantes.

Agradecimientos

El trabajo fue subsidiado por, FONCYT y MINCYT-PID 35/08 y SECYT-UNRC

Referencias

- APHA, AWWA y WPCF. 2005. *American Public Health Association & Eaton, Andrew D & Water Environment Federation & American Water Works Association*. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st, Washington, D.C.

- Bécher Quinodóz, F. 2014. [Implicancias ambientales de las relaciones hidrodinámicas e hidroquímicas entre aguas superficiales y subterráneas en la planicie arenosa del Sur de Córdoba. Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto. 412 pp. *Inédita*]
- Bécher Quinodóz, F., Blarasin, M., Feliciani, M. y Felizzia, J. 2014. Zona rural Paunero – Laguna Oscura – Washington. Aptitudes de uso del acuífero freático. *UniRío Editora*. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina. (Ed) E-book, pp. 24.
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. En: *Serie de libros y materiales educativos* Vol. 60 IICA. San José, Costa Rica, pp. 1205.
- Blarasin, M. 1984: [Hidrología subterránea de la zona Laguna Oscura. Córdoba. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Río Cuarto. 150 pág. *Inédita*]
- Blarasin, M. y Sánchez, M.L. 1987: Depósitos eólicos cuaternarios de la zona de Cuatro Vientos. Departamento Río Cuarto. Provincia de Córdoba. República Argentina. *10º Congreso Geológico Argentino* (San Miguel de Tucumán). Acta III: 293-296.
- Blarasin, M., Degiovanni, S., Cabrera, A. y Villegas, M. 2005: Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: una perspectiva geoambiental. *Ed. Universidad Nacional de Río Cuarto*. pp. 320.
- Blarasin, M., Cabrera, A., Bécher Quinodóz, F., Felizzia, J. y Giuliano Albo, J. 2013. El relieve y su incidencia en el hallazgo de agua para abastecimiento humano en la planicie mediana sudoriental cordobesa. *8º Congreso Argentino de Hidrología “Agua Subterránea Recurso Estratégico” y 7º Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en Hidrología Subterránea*. (La Plata, Argentina). Tomo I: 218 – 225.
- Blarasin, M., Cabrera, A. y Matteoda, E. 2014. Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba. Edición UniRío. *E-book. Río Cuarto-Córdoba*. pp. 147.
- Cabrera, A., Blarasin, M., Dapeña, C. y Maldonado, L. 2013. Composición físico-química e isotópica de precipitaciones del Sur de Córdoba. Estación Río Cuarto-Red Nacional de Colectores. Argentina. *8º Congreso Argentino de Hidrología “Agua Subterránea Recurso Estratégico” y 7º Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en Hidrología Subterránea*. (La Plata, Argentina). Tomo II: 35 – 42.
- Cantú, M.P. 1992: El Holoceno de la provincia de Córdoba. En Manual: Holoceno de la República Argentina. *Editor Martín Iriondo. Comité Argentino de Investigación del Cuaternario (CODINAQUA)*. Volumen I, pp. 1-16.
- Custodio, E. 1993. Hidrogeoquímica e Isotopía ambiental. En *Bocanegra y Rapacini (Eds.), Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Universidad Nacional de Mar del Plata y Consejo Federal de Inversiones, Mar del Plata*. pp. 61-78.
- Dansgaard, W. 1964. *Stable isotopes in precipitation*. Tellus, 16: 436-468.
- Degiovanni, S. 2008. [Análisis geoambiental del comportamiento de los sistemas fluviales del Sur de Cba, en especial del A° Achiras –del Gato, como base para su gestión sustentable. *Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto*. 597 pp. *Inédita*].
- Giuliano Albo, J. 2013. [Evaluación de la Contaminación por Nitratos en Aguas Subterráneas de Agroecosistemas mediante el uso de Isótopos Estables 15N-14N, 18O-16O y otros solutos relacionados. *Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto*. 379 pp. *Inédita*].
- Jarsún, B., Gorgas, J., Zamora, E., Lovera, E., Ravelo, A. y Tassile, J.L. 2003. Recursos Naturales de La Provincia de Córdoba: Los Suelos. Nivel de Reconocimiento 1:500.000. Argentina. Agencia Córdoba D.A.C. y T. S.E.M *Dirección de Ambiente e INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria– Manfredi)*, pp. 541
- Iriondo, M. 1999. Climatic changes in the South American plains: Records of a continent scale oscillation. *Quaternary International, Elsevier Sciences Ltd*. 57-58, 93-112.
- Manzano, M., Custodio, E., Higuera, H., Puig, R. y Soler, A. 2009. Influencia de la gestión del acuífero sobre los humedales del manto eólico de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*, 120 (3): 377-392
- Navarro Mendoza, S., Bautista Belmonte, A. y Belmonte Jiménez, S. 2002. Río Atoyac y su relación con el acuífero alimentador de fuentes de agua potable en la ciudad de Oaxaca. *Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; AIDIS. Memorias México*, D.F. FEMISCA. P. 1-9.
- Panarello, H. y Parica, C. 1984. Isótopos del oxígeno en hidrogeología e hidrología. Primeros valores en aguas de lluvia de Buenos Aires. *de la Asociación Geológica Argentina*, XXXIX (1 -2): 3-11.
- Parkhurst, D.L. y Appelo, C.A.J. 1999. User's guide to PHREEQC (version 2.17) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculation. *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations*. Report 99-4259, pp. 312.
- Vázquez-Suñé, E. 2009. Hidrogeoquímica. En Escuder, R., Fraile, J., Jordana, S., Ribera, F., Sánchez-Vila, X. y Vázquez-Suñé, E. (eds.). *Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología Subterránea. Barcelona, España*, pp. 426-471.

Recibido: 16 de Abril del 2015

Aceptado: 03 de Octubre del 2015