
Contaminación con nitratos del agua subterránea en La Plata, Argentina

Miguel Auge

Resumen: La Plata, capital de la provincia de Buenos Aires, fue la primera ciudad importante de Argentina que se abasteció exclusivamente con agua subterránea, desde 1885, a partir del acuífero Puelche. Actualmente, la provisión de agua potable se cubre en 42% con la proveniente del acuífero Puelche, de carácter semiconfinado, y en 58% con la proveniente del Río de la Plata. Sin embargo, para poder utilizar el agua del acuífero, ésta debe mezclarse con la superficial para disminuir su contenido en nitratos por dilución. La principal fuente de nitratos en el agua subterránea son los pozos ciegos o absorbentes en los que se volcaban las excretas, antes de construir la red de desagües cloacales o alcantarillado. Esto, junto con la estabilidad que poseen los NO_3^- cuando entran en solución, hizo posible que el acuífero Puelche sufriera una contaminación progresiva a lo largo de más de cien años, mediante el proceso de filtración vertical descendente, desde el acuífero pampeano sobrepuesto, que contiene a la capa freática y, por ende, es el principal receptor de la contaminación. En el trabajo se analizan las características climáticas, geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas de la región y los procesos de contaminación con NO_3^- . Se adjuntan las figuras y mapas

pertinentes para facilitar la comprensión de los mismos.

Palabras clave: agua subterránea, hidrogeología, contaminación, nitratos, La Plata, Argentina.

Abstract: La Plata, capital of the Province of Buenos Aires, was the first major city in Argentina that was supplied exclusively with groundwater from the Puelche aquifer since 1885. Currently, the provision of drinking water is covered by 42% from the semi-confined Puelche Aquifer and 58% from the Río de la Plata. However, in order to use the aquifer water, it must be mixed with the surface to reduce its nitrate content by dilution. The main source of nitrates in the groundwater are the cesspools or absorbent wells, in which the excreta was dumped before building the sewer network. This, together with the stability that NO_3^- possesses, when they come into solution, made it possible that the Puelche Aquifer suffer a progressive contamination over more than a hundred years, through the process of leaky vertical descending filtration, from the overlapping Pampeano Aquifer, which contains the water table and therefore, is the main recipient of contamination with NO_3^- . In the paper, the climatic, geological, geomorphological and hydrogeological characteristics of the region and the processes of contamination with NO_3^- are analyzed, attaching the relevant graphics and maps to facilitate their understanding.

Keywords: groundwater, hydrogeology, contamination, nitrates, La Plata, Argentina.

Recibido: Octubre, 2019 /Aceptado: Noviembre, 2019

Publicado en línea: Febrero, 2020

© 2020

M. Auge



Academia Argentina de Ciencias del Ambiente.

E-mail de correspondencia: miguelauge66@gmail.com

Plata y la costa del Río de la Plata, donde se desarrolla la planicie costera, en los partidos de Ensenada y Berisso. Allí funcionan la refinería de petróleo más grande del país, una importante productora de acero en chapa, dos grandes petroquímicas y el astillero naval más grande del país; una planta que produce ácido; una fábrica de coque y una central termoeléctrica. Prácticamente la totalidad del agua utilizada por la industria citada, proviene del Río de la Plata, ya sea a través de captaciones individuales por parte de las empresas, o de la suministrada por Aguas Bonaerenses Sociedad Anónima (ABSA). Esto, por el elevado tenor salino que caracteriza al agua subterránea de la planicie costera, que ocupa un ámbito anegadizo por debajo de la cota 5 m.s.n.m. Contrariamente, en el Partido de La Plata, emplazado casi totalmente por encima de la cota 10 m en la llanura Alta, la aptitud del agua subterránea, hace que la industria se abastezca mediante perforaciones que captan del acuífero Puelche. Además, existe una importante zona rural de producción florihortícola, vecina a La Plata, que también emplea agua subterránea para riego, pero en este caso aprovecha los acuíferos pampeano y Puelche en forma conjunta, pues las perforaciones que alcanzan a este último, carecen de cañería de aislación.

CLIMA

La precipitación y la temperatura son las variables que ejercen mayor influencia en las características climáticas de una región y, por ello, son las más utilizadas en las clasificaciones. En ámbitos de llanura, como el estudiado, la precipitación presenta una variabilidad espacial y temporal mucho más marcada que la temperatura, de ahí la necesidad de disponer de series prolongadas para lograr una caracterización del clima sobre la base de valores medios. Sin embargo, la variabilidad citada hace que la lluvia, durante determinados lapsos, supere con amplitud y en otros sea marcadamente inferior a la media, cuya obtención representativa, de

acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (OMM), debe basarse en registros de al menos 30 años consecutivos. Respecto a la temperatura, la OMM considera un lapso mínimo de 10 años para lograr valores medios representativos. Estos lapsos se encuentran en revisión, debido a las alteraciones en lluvias y temperaturas, producto del cambio climático.

Para la caracterización climática se emplearon los datos de la estación climatológica La Plata Observatorio Astronómico, dado que cuenta con el mayor registro continuado de precipitación y temperatura (1909 al 2019), pero debido a la disponibilidad real de datos, para el análisis se tomó el lapso 1909-2003. La Estación se ubica en el Bosque, en el ejido urbano, a 34°55' de latitud sur y 57°56' de longitud oeste y a cota 15 m.s.n.m. La reducida extensión del ámbito estudiado, en relación con su carácter llano, permite extrapolar los registros de la estación climatológica La Plata, al resto del mismo.

Precipitación

La precipitación media anual para el lapso 1909-2003 fue de 1,030 mm; el mes más lluvioso es marzo (111 mm) y el menos lluvioso, junio (62 mm). Para valores absolutos, el año de mayor precipitación fue 1914 (1,926 mm) y el más seco, 1916 (415 mm), mientras que a nivel mensual, el de mayor registro fue abril/59 (356 mm) y el menor, julio/16 (0 mm). La marcha de la precipitación en lapsos de 10 años indica que existen dos períodos secos (1921/30 y 1941/50), otros dos con valores similares al medio (1931/40 y 1961/70) y los cinco restantes húmedos (1911/20, 1951/60, 1971/80, 1981/90 y 1991/2000).

En relación con la distribución estacional, los valores medios son muy parecidos en otoño, verano y primavera (28, 27 y 26%), respectivamente, mientras que el invierno es la estación menos lluviosa, con 19% del total anual. De la comparación entre lluvia y temperatura medias mensuales,

surge una notable coincidencia en la marcha de ambas, lo que apunta a un origen predominantemente local de la primera.

Temperatura

Respecto a la temperatura, ya se señaló que se observa menor variabilidad temporal y espacial que la precipitación, especialmente en llanuras. De los registros obtenidos en la estación climatológica La Plata, surge una temperatura media anual de 16.1°C, con enero como el mes más cálido (22.7°C) y julio como el más frío con 9.8°C.

GEOLOGÍA Y COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO

La región presenta una marcada monotonía en su condición geológica, superficial, hecho que tipifica a los ambientes llanos (Auge, y Hernández, 1984). En la descripción, se hará referencia a la constitución geológica de la zona estudiada y a su incidencia sobre el comportamiento hidrogeológico, tanto hidrodinámico como hidrogeoquímico, comenzando por las unidades más modernas, debido a que son las que están en contacto directo con las fases atmosférica y superficial del ciclo hidrológico.

Postpampeano (Pleistoceno superior-Holoceno)

Está constituido por arcillas y limos arcillosos y arenosos de origen marino, fluvial y lacustre, acumulados en ambientes topográficamente deprimidos, con neto predominio en la planicie costera. Los sedimentos postampeanos, cuyo espesor varía entre pocos centímetros en la llanura alta y unos 25 m en la ribera del Río de la Plata, poseen muy poca capacidad para transmitir agua, por lo cual actúan como acuitardos o acucludos. Además, existe una notable correspondencia entre el Postpampeano y la presencia de agua salada en el perfil, aun en las unidades más profundas (Pampeano y Arenas Puelches). En los sedimentos pelíticos superiores del Postpampeano, es frecuente registrar

salinidades mayores a 15 g/L, de aguas con predominio de $\text{SO}_4^{=}$ y Cl^- .

Sin embargo, la existencia de cordones de conchilla y de arena, que se disponen paralelamente a la costa del Río de la Plata, contienen agua de baja salinidad (2 a 3 g/L), debido a que por su elevada porosidad y conductividad hidráulica, favorecen la infiltración de la lluvia y del agua proveniente de las crecidas de dicho río. Estos acuíferos, pese a ser de dimensiones reducidas (lenticiformes) y a almacenar volúmenes relativamente pequeños, constituyen las únicas fuentes de provisión de agua apta para consumo humano y para el ganado en la planicie costera.

En la figura 2 se representa el perfil geológico a lo largo de la traza A-B, que atraviesa la llanura alta y la planicie costera hasta el Río de la Plata (figura 3). En dicha figura, se aprecia el contacto directo entre el Postpampeano y las Arenas Puelches, lo que evidentemente facilitó la entrada de agua de origen marino a esta última unidad, durante las incursiones holocenas.

Pampeano (Pleistoceno medio - superior) Se emplaza por debajo del Postpampeano en la planicie costera y subyace a la cubierta edáfica en la llanura alta. Está formado por limo arenoso de origen eólico (loess) y fluvial, con abundante plagioclasa, vidrio volcánico y CaCO_3 (tosca). El espesor del Pampeano está controlado por los desniveles topográficos y por la posición del techo de las Arenas Puelches, variando entre extremos de 50 m en la llanura alta y 0 m en la costa del Río de la Plata, donde fue totalmente erosionado (figura 2).

El Pampeano y el Postpampeano son las únicas unidades geológicas aflorantes en la zona estudiada, ocupando el primero la planicie costera y el Pampeano, la llanura alta.

La trascendencia del Pampeano radica en que actúa como vía para la recarga y la descarga del acuífero Puelche

subyacente y también para la transferencia de sustancias contaminantes, como los nitratos, generadas principalmente por actividades domésticas y agrícolas. La sección superior del Pampeano contiene a la capa freática y su base está formada por un limo arcilloso de unos 6 m de espesor medio, y apreciable continuidad areal, que lo separa del Puelche, otorgándole a este último un comportamiento de acuífero semiconfinado. La comunicación hidráulica entre los acuíferos Pampeano y Puelche, señalada por Auge (1986) para la cuenca del Río Matanza, se produce de la misma manera en la zona estudiada (figura 4). En relación con los parámetros hidráulicos

del Pampeano, la conductividad hidráulica y la porosidad efectiva más frecuentes varían entre 1 y 10 m/día y entre 5 y 10%, respectivamente. Dado que el caudal puede alcanzar a 30 m³/h por pozo, se lo puede considerar como un acuífero de productividad media. En la zona rural cultivada, la falta de entubamiento y aislación del Pampeano, hace que los pozos capten en forma conjunta a éste y al acuífero Puelche. El agua contenida en el Pampeano es del tipo bicarbonatada sódica y cálcica, con salinidades inferiores a 1 g/L en la llanura alta, pero con incrementos notorios en la planicie costera, donde suele superar 10 g/L.

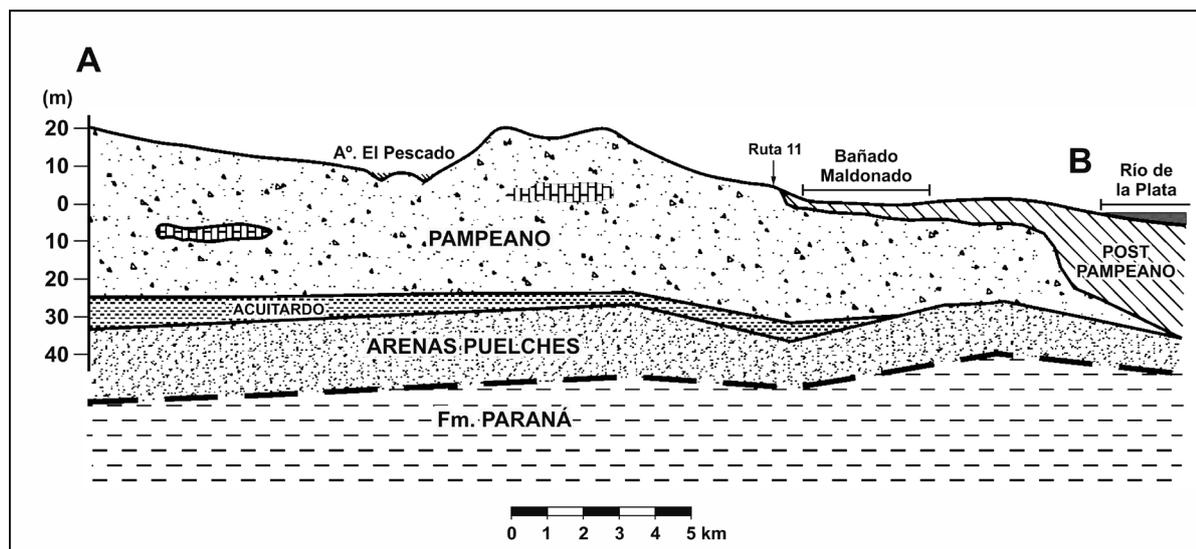


Figura 2. Perfil geológico.

Arenas Puelches (Plio-Pleistoceno)

Constituyen una secuencia de arenas cuarzosas friables, medianas y finas, blanquecinas y amarillentas, con estratificación gradada. Se sobreponen en discordancia erosiva a las arcillas de la Formación Paraná y contienen al acuífero Puelche, que es el más importante de la región y también de la Argentina, por su extensión, calidad y productividad.

Las Arenas Puelches son de origen fluvio-deltaico, ocupan en forma continua unos 92,000 km² en el subsuelo del noreste de

la provincia de Buenos Aires y se extienden también hacia el norte en la de Entre Ríos y hacia el noroeste en las de Santa Fe y Córdoba (Auge et al, 2002). En la zona estudiada el techo del Puelche se ubica entre 20 y más de 50 m de profundidad y su espesor varía entre algo menos de 20 y algo más de 30 m.

Todos los pozos del servicio de agua potable de La Plata captan este acuífero semiconfinado, que también se aprovecha para riego y para la industria, con producciones individuales entre 40 y 160 m³/h, de agua

bicarbonatada sódica, con una salinidad total menor a 1 g/L, en la llanura alta.

En la planicie costera, la salinidad del Puelche aumenta notablemente, superando en algunos casos 20 g/L (Punta Lara), con agua clorurada sódica. La transmisividad media del Puelche (500 m²/día), deriva en una conductividad hidráulica de 25 m/d para un espesor medio de 20 m (Auge, 1991).

Es muy poco lo que se conoce sobre las unidades hidrogeológicas que subyacen al Puelche, porque son muy escasas las perforaciones que las alcanzan y menos aun las que las atraviesan, debido a que tanto en la zona estudiada como en otras vecinas, han brindado aguas con elevados tenores salinos. Ellas son: Formación Paraná (Mioceno superior), de origen marino, subyace al Puelche y en Punta Lara, registró una salinidad de 7.5 g/L de agua clorurada sódica y Formación Olivos (Oligoceno–Mioceno inferior) de origen continental, con participación eólica y fluvial. Subyace a la Formación Paraná y se sobrepone al basamento cristalino, en ambos casos mediante discordancias erosivas. En Cañuelas, 75 km al oeste del área de estudio, el sitio más cercano donde se poseen datos, brindó una salinidad de 40 g/L (Auge, 1986).

Basamento Cristalino (Precámbrico)

Constituye la base impermeable del sistema hidrológico subterráneo. En la zona estudiada no aflora y está formado por rocas cristalinas del tipo gneis granítico, que por su textura carecen de porosidad primaria y, por lo tanto, actúan como acuífugas. Sólo pueden transmitir agua, pero generalmente en cantidades reducidas, a través de fisuras (esquistosidad, diaclasas, fracturas).

El basamento, de edad proterozoica, fue alcanzado por la perforación Plaza de Armas, en el ejido urbano de La Plata, a 486 m de profundidad.

ESTRUCTURA

Una de las características distintivas de la geología de los ambientes llanos es la escasa deformación tectónica, particularmente de las unidades más modernas, lo que se traduce en una posición estratigráfica subhorizontal. Esta condición caracteriza tanto al piso como al techo de las Arenas Puelches, que presentan suaves desniveles estructurales, indicativos de la ausencia de “fallamiento”. Por lo tanto, se concluye que la actividad tectónica no incide en el comportamiento de las unidades de mayor interés hidrogeológico (Puelche y Pampeano).

GEOMORFOLOGÍA

La región estudiada integra el sector austral de la gran llanura Chacopampeana y se caracteriza por ser un ámbito con pendiente dominante hacia el noreste y cotas extremas de 30 m.s.n.m. en la divisoria coincidente con el límite suroeste y de 0 m.s.n.m. en la ribera del Río de La Plata. Entre dichos ámbitos, separados por 23 km, el gradiente topográfico medio es de 1 m/km. Dentro de la región llana mencionada, se pueden distinguir dos componentes morfológicos principales (planicie costera y llanura alta) y otro que ensambla a los anteriores (Escalón) (figura 3).

Planicie costera (Auge, 1990) ocupa 318 km² y se extiende en forma de faja paralela a la costa del Río de la Plata, en un ancho de 6 a 10 km, constituye así un ámbito casi sin relieve, entre cotas 5 y 0 m (figura 3), lo que deriva en gradientes topográficos extremos de 0.5 y 0.8 m/km. Esta condición topográfica limita notoriamente el flujo superficial y dificulta severamente la llegada natural de las aguas provenientes de la llanura alta, hasta el nivel de base regional constituido por el Río de la Plata. A esto coadyuva la existencia de cordones o albardones costeros de arena y de conchilla, generalmente coronados por encima de la cota 2.5 m que, dispuestos paralelamente a la línea de ribera, actúan como barreras

para los fluvios. Lo antedicho da lugar a la formación de un ambiente mal drenado, de tipo cenagoso (Bañado-Maldonado), con agua subterránea aflorante o a muy poca profundidad (generalmente a menos de 1 m), donde predomina notoriamente la dinámica vertical sobre la lateral, lo que hace que funcione como el principal ámbito de descarga subterránea natural de la región. Otra característica distintiva de la planicie costera es el control que ejerce sobre la salinidad. En efecto, el agua subterránea asociada, generalmente presenta elevada

salinidad en el acuífero Pampeano, condición que se acentúa en el acuífero Puelche, dado que en algunos sitios este último posee un tenor salino similar al del agua de mar. En la planicie costera dominan superficialmente depósitos pelíticos de origen marino del Holoceno, cubiertos localmente por sedimentos arenosos y conchales, que forman los cordones costeros. Al conjunto se lo denomina Sedimentos Postpampeanos, cuyas características hidrogeológicas fueron descriptas en el apartado de “Geología y Comportamiento Hidrogeológico”.

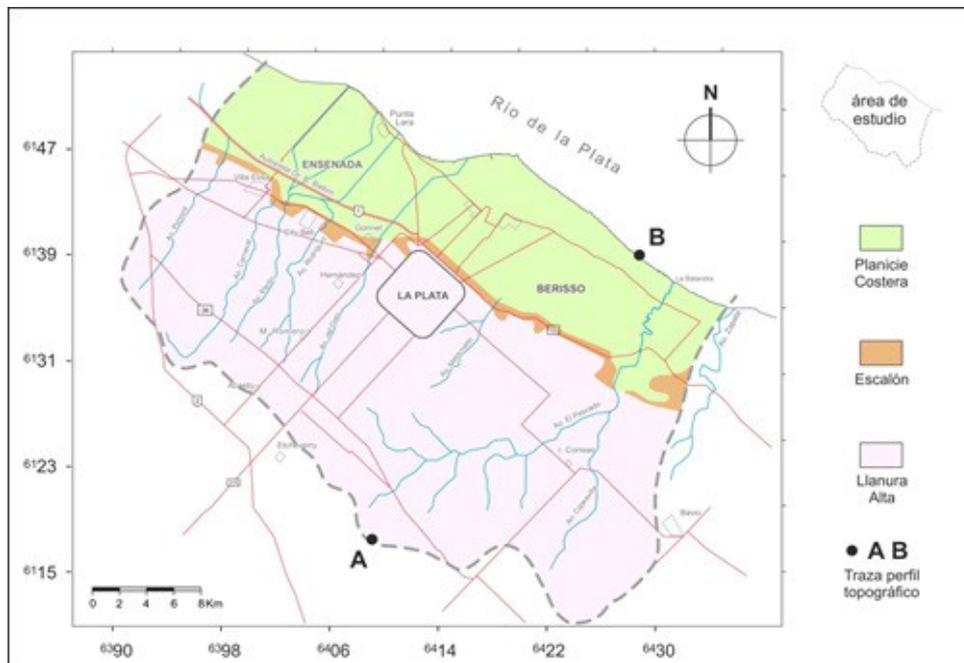


Figura 3. Mapa geomorfológico.

Llanura alta (Auge, 1997a), denominada así por su posición topográfica más elevada respecto a la planicie costera, se desarrolla en una superficie de 689 km². Se dispone en forma de faja rectangular, orientada de noroeste a sureste (figura 3), entre cotas 30 y 10 m.s.n.m., en el sector noroeste de la zona estudiada y entre cotas 23 y 7.5 m en el sector sureste. Presenta ondulaciones muy suaves originadas por la erosión fluvial y una pendiente topográfica dominante hacia el noreste de 1.4 m/km

en el sector noroeste y de 1.1 m/km en el sector sureste. En la llanura alta, por debajo del suelo, se disponen los Sedimentos Pampeanos, que por su conformación granulométrica, textural y mineralógica son más permeables y resistentes a la erosión que los Postpampeanos.

Las condiciones morfológicas y geológicas que caracterizan a la llanura alta, ejercen notable incidencia en la dinámica y en la química del agua subterránea.

En ella domina la infiltración o la recarga, particularmente en las divisorias de aguas superficiales, que son las formas de menor pendiente topográfica. Respecto a la salinidad, prácticamente toda el agua subterránea de la llanura alta es de bajo contenido salino (menos de 1 g/L), tanto en el acuífero pampeano como en el Puelche.

Escalón (Cappannini, y Mauriño, 1966) conforma el ámbito de ensamble entre la llanura alta y la planicie costera y se desarrolla aproximadamente entre las isohipsas de 5 y 10 m.s.n.m. (figura 3), manifestándose con mayor claridad entre la ciu-

dad de La Plata y el extremo noroeste de la región estudiada. Al sureste de La Plata pierde definición, por disminución del resalto vertical, disponiéndose entre cotas 5 y 7.5 m.

La erosión fluvial corta al Escalón y lo desplaza por las márgenes de los cauces, aguas arriba, lo que le otorga una forma irregular. La extensión lateral del Escalón es variable; en La Plata registra entre 300 y 500 m de ancho, amplitud que mantiene hacia el noroeste. Al sureste de La Plata, ya se mencionó que pierde definición morfológica por disminución del gradiente topográfico. Su extensión en área es de sólo 43 km².

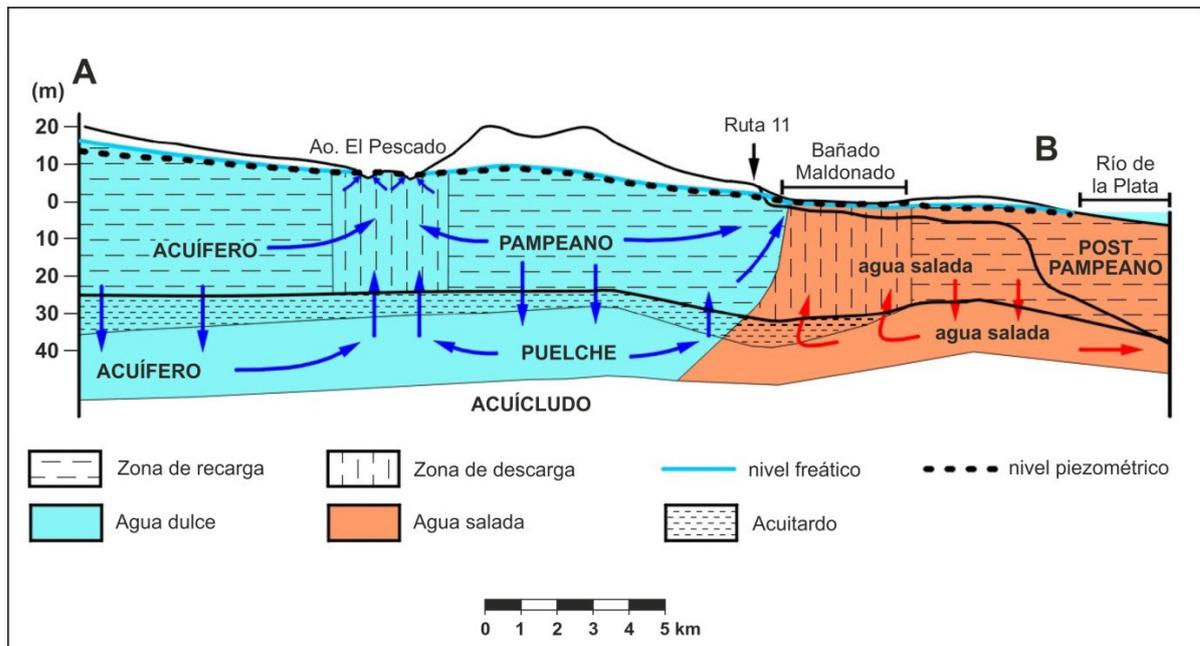


Figura 4. Perfil hidrogeológico.

El Escalón es una forma erosiva labrada en los Sedimentos Pampeanos y representa la antigua línea de ribera que limitó el ingreso del Mar Querandino. En coincidencia aproximada con el Escalón, se produce la mayor descarga natural de agua dulce del acuífero Puelche (figura 4, Ruta 11).

HIDROGRAFÍA

Las cuencas hidrográficas presentan características muy diferentes de acuerdo con el ámbito morfológico en que se desarrollen. En la llanura alta, las cuencas tienen bordes bien definidos y los colectores principales presentan trayectorias relativamente rectas, con cauces menores que rara vez superan

los 5 m de ancho. Las llanuras de inundación, por su parte, pueden alcanzar hasta unos 500 m de ancho (arroyo El Pescado). En la planicie costera, los cauces se tornan divagantes, y se pierden en el Bañado Maldonado; prácticamente desaparecen las divisorias por lo plano del relieve, y en la mayoría de los casos, sólo puede lograrse la descarga en el Río de la Plata mediante canalizaciones. En la llanura alta, la cuenca del arroyo El Pescado (figura 3) se destaca notoriamente de las otras, por su forma de bota y, además, porque su superficie (356 km²) es casi igual a la sumatoria del resto (376 km²).

Domina en la cuenca del Arroyo El Pescado el diseño dendrítico frente al de tipo recto que caracteriza al resto (Pereyra, Carnaval, Martín, Rodríguez, Del Gato y Maldonado). En estos últimos, también se destaca la escasa cantidad de afluentes que tienen los colectores principales. La mayoría de los arroyos son de tipo perenne o permanente en los tramos inferiores de sus cuencas, por el aporte subterráneo, mientras que en los tramos medios y altos se transforman en intermitentes, debido a que los cauces se ubican por encima de la superficie freática. Al carácter de influencia de las aguas superficiales sobre las subterráneas contribuye en gran medida la explotación, particularmente la que se efectúa en la ciudad de La Plata. Los aforos realizados en siete de las nueve cuencas hidrográficas brindan un índice de escurrimiento del orden de 6% respecto a la lluvia, con caudales medios individuales entre 30 y 200 L/s (Auge, 1995).

AGUA SUBTERRÁNEA

Modelo conceptual

La relación hidráulica entre los acuíferos pampeano y Puelche fue propuesta por Auge (1986) para la Cuenca del Río Matanza y demostrada para el ámbito estudiado a partir de mediciones piezométricas y freáticas (Auge, 1997b). Dicho funcionamiento hidráulico se esquematiza en la figura 4. La comunicación entre ambos acuíferos a través

del acuitado, permite que el Puelche se recargue por filtración vertical descendente, en aquellos sitios donde el pampeano presenta mayor potencial hidráulico (divisorias subterráneas), o se descargue por filtración vertical ascendente, donde presenta menor potencial hidráulico que el Puelche (zonas de descarga).

En definitiva, este funcionamiento con comunicación hidráulica vertical deriva en potenciales muy similares entre ambos acuíferos, similitud que también caracteriza a la salinidad y a la composición química de sus respectivas aguas, fundamentalmente en la llanura alta (Auge, 1996), donde la diferencia más notoria radica en el mayor contenido en calcio del agua del pampeano respecto al Puelche. González y colaboradores (2002), también desarrollaron un modelo hidrodinámico conceptual, pero para las cuencas de los arroyos Martín y Carnaval.

Ensayos hidráulicos

A partir de la realización de 47 ensayos de bombeo en el acuífero Puelche, se obtuvieron los siguientes resultados: extremos de transmisividad (T) 225 y 1 034 m²/d, promedio 500 m²/d. Las conductividades hidráulicas (K) se obtuvieron dividiendo las T por los espesores del acuífero en cada sitio ensayado; los extremos fueron 8 y 41 m/d, y el promedio 20 m/d (Auge, 2001).

Balance hídrico

Se desarrolló con tres alcances. Uno a nivel edáfico, para establecer la evapotranspiración real (E_{tr}), los excedentes y déficit hídricos y la clasificación climática. El segundo, de alcance global, tuvo por finalidad cuantificar las variables primarias, para resolver la ecuación generalizada del ciclo hidrológico; y el tercero, para establecer las entradas y las salidas al y del sistema subterráneo, a fin de estimar la relación entre la recarga y la descarga de los acuíferos pampeano y Puelche.

Edáfico

Se realizó empleando la metodología de Thornthwaite y Mather (1957), dado que ha brindado buenos resultados en este ámbito, y en otros similares, morfológica, geológica y climáticamente (Auge, 1991). Con el objeto de disponer de un panorama general respecto a la magnitud de la evapotranspiración potencial (Etp), de la real (Etr), del déficit (Df) y del exceso (Ex), se consideraron las precipitaciones (P) y las temperaturas (T) medias mensuales, correspondientes al período 1909-2003, registradas en la estación climatológica La Plata Observatorio. Para la capacidad de campo (Cc), se optó por el valor de 200 mm, en virtud del suelo y vegetación dominantes (franco limoso, con raíces de moderada profundidad ~ 1 m).

Del balance hídrico edáfico, para las condiciones hidrometeorológicas medias registradas en un lapso de 95 años, surge que la Etp (822 mm/año) difiere sólo en 1.2% de la Etr (812 mm/año), lo que indica una ínfima deficiencia de agua. Los excedentes en cambio llegan a 218 mm/a, o sea 27% de la evapotranspiración real y 21% de la precipitación media anual (1,030 mm). Para los valores medios considerados, sólo 3 meses del año presentan déficit hídrico (diciembre: 2 mm, enero: 5 y febrero: 3 mm), pese a que la precipitación en el verano (27% del total anual) supera holgadamente a la del invierno (19%). Sin embargo, en los 3 meses invernales (junio, julio, agosto), se da el mayor exceso hídrico (117 mm), que representa 54% del total. La aparente contradicción señalada es consecuencia de la marcada disminución de la evapotranspiración durante el invierno, debido fundamentalmente al descenso de la temperatura y a la disminución de la insolación y de la actividad biológica. En definitiva, el resultado del balance hídrico edáfico para valores medios de P y T, señala el notorio predominio de los excedentes sobre los déficit hídricos, lo que constituye un indicio favorable para la recarga subterránea.

Con base en la clasificación de Thornthwaite (1948), el clima es del tipo B1 B'2 ra' (húmedo, mesotermal, con nula o pequeña deficiencia de agua y concentración estival de la eficiencia térmica de 44%).

Generalizado

Se desarrolló con la finalidad de conocer los órdenes de magnitud de las variables fundamentales que integran el ciclo hidrológico, obteniéndose el siguiente resultado para los valores medios correspondientes al lapso 1909/03, expresados en mm/año.

$$I = P - Etr - Ef$$

$$156 = 1.030 - 812 - 62$$

O sea, que en relación con la precipitación (P) se tiene: evapotranspiración real Etr = 79%, infiltración I = 15%, escurrimiento fluvial Ef = 6%.

Subterráneo

Como se mencionó al inicio del capítulo, este balance tiene por finalidad establecer las entradas y las salidas, naturales y artificiales, al y del sistema hidrológico subterráneo, para estimar la relación entre la recarga y la descarga. Del análisis realizado en el punto anterior, surge que los excedentes (Ex) superan con amplitud a los déficit hídricos (Df) naturales y dado que el escurrimiento fluvial constituye un pequeño porcentaje de la precipitación (6%), la infiltración asume una magnitud significativa (15%). El cambio en las prácticas y en la superficie cultivada, acaecido en los últimos 20 años, derivó en una modificación apreciable del volumen empleado para regar, que se capta exclusivamente del subsuelo. Hasta 1995 se cultivaban hortalizas a la intemperie y se regaba por surco, con un retorno al subsuelo aproximado de 50%, que en definitiva se transformaba en recarga directa para el acuífero Pampeano, e indirecta para el Puelche. Dicha práctica requería un caudal de unos 30 m³/h para regar 5 hectáreas, volumen que podía lograrse fácilmente con una perforación. Durante los 6 meses de riego

intensivo (octubre a marzo), la extracción alcanzaba a unos 70 hm³ de los cuales un 70% provenían del acuífero Puelche y el 30% restante del pampeano; con dicho caudal se regaban unas 13,000 ha (Auge, 1997a).

No se tiene precisión sobre la superficie que se riega actualmente a la intemperie, pero se estima en 5,000 ha y la que se regaba por goteo, bajo cubierta o en invernadero, en 2016, era de 5,460 ha (Miranda, 2017). Pese a que no se tiene exactitud sobre el volumen total empleado para regar, preliminarmente se lo puede estimar en unos 30 hm³/a, de los cuales 21 provendrían del Puelche y 9 hm³/a del pampeano (Los datos mencionados son preliminares y están sujetos a revisión).

Recarga

En el punto anterior se mencionó un coeficiente de infiltración de 15% respecto a la lluvia; este índice, considerando el lapso 1909/03, brinda un valor medio para la recarga del acuífero pampeano de 156 mm/año. Se estima en 53 hm³/año la recarga natural que recibe el acuífero Puelche desde el pampeano, considerando el flujo del primero, calculado a partir de su red de flujo (figura 5) y adoptando una transmisividad media de 500 m²/d. La estimación es válida para un régimen estacionario, condición que puede aplicarse al acuífero Puelche, por su comportamiento como semiconfinado y por la estabilidad piezométrica observada en los últimos 10 años.

Descarga

En este punto deben considerarse tanto los procesos de descarga natural como artificial. De ambos acuíferos, el Puelche es el más explotado, sus principales usos son el abastecimiento humano y el riego. El pampeano se emplea para consumo doméstico, en los sitios carentes de servicio de agua potable; para riego, debido a que las perforaciones carecen de encamisado, permite su captación junto con el Puelche y para el ganado en la zona rural. El consumo actual para alimentación humana proveniente del acuífero Puelche es de 52.6 hm³/año,

que se captan mediante 218 pozos. De agua superficial, se procesan y distribuyen otros 70 hm³/a, lo que totaliza unos 123 hm³/a para abastecer a 530,000 habitantes, con agua de red (ABSA, 2019). La población que carece de este servicio emplea unos 4 hm³/a, provenientes del pampeano. La industria más importante se abastece con agua del Río de la Plata, mientras que la restante, aprovecha sólo 1.5 hm³/a del acuífero Puelche. El abastecimiento para el ganado es del orden de 0.6 hm³/a, proveniente del acuífero pampeano. Para riego, como se citó en el balance hídrico subterráneo, unos 21 hm³/a se extraerían del Puelche y otros 9, del Pampeano, es decir, un total de unos 30 hm³/a.

Dinámica

Respecto al movimiento lateral del agua subterránea, en la figura 5 se representa la red de flujo del acuífero Puelche, en ella se aprecia claramente el control que sobre el flujo del mismo ejerce el bombeo de los pozos para agua potable de La Plata y localidades vecinas, como Hernández, Gonnet, City Bell y Villa Elisa. La equipotencial de 0 m tiene forma alargada en dirección noroeste-sureste, con un perímetro de 58 km, y un marcado lóbulo hacia el suroeste a la altura de La Plata. Su eje mayor es de 24 km, mientras que el menor varía entre 3 y 7 km. En el interior de la de 0 m, se presentan 3 curvas de -5 m, también cerradas, que abarcan pequeñas superficies. Los gradientes hidráulicos, en el sector suroeste de la región estudiada (zona no alterada), varían entre 1.0 y 2.5x10⁻³, para incrementarse en la zona explotada hasta 1.9x10⁻².

Para estimar el flujo subterráneo que ingresa al cono, a través de la equipotencial de 0 m, se empleó Darcy (1856):

$$Q = T \cdot i \cdot L$$

$$145.000\text{m}^3/\text{d} = 500\text{m}^2/\text{dx} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 58.000\text{m}$$

Q: caudal, T: transmisividad,

i: gradiente hidráulico, L: longitud.

Los 145,000 m³/d equivalen a 53 hm³/a y, dado que la extracción disminuyó de 75 hm³/a en 2004 (Auge et al., 2004) a 52,6 hm³/a en 2019, por el reemplazo de agua subterránea por la del Río de la Plata, actualmente existe un equilibrio notorio entre el ingreso por recarga y el egreso por extracción en el acuífero Puelche.

El acuífero pampeano presenta un cono de depresión, más suave que el existente en el acuífero Puelche, con forma alargada en dirección este-oeste. El origen de este

como es el descenso de la superficie freática, como consecuencia de la explotación del acuífero subyacente (Puelche). Los mayores gradientes hidráulicos del pampeano (2.4×10^{-3}) son similares a los registrados en el Puelche de la zona no disturbada, pero los menores (3.7×10^{-4}) son menores que sus equivalentes del Puelche. Existe una distorsión bastante menor en la red de flujo del acuífero pampeano que en la del Puelche, debido a la menor extracción a que está sometido el primero.

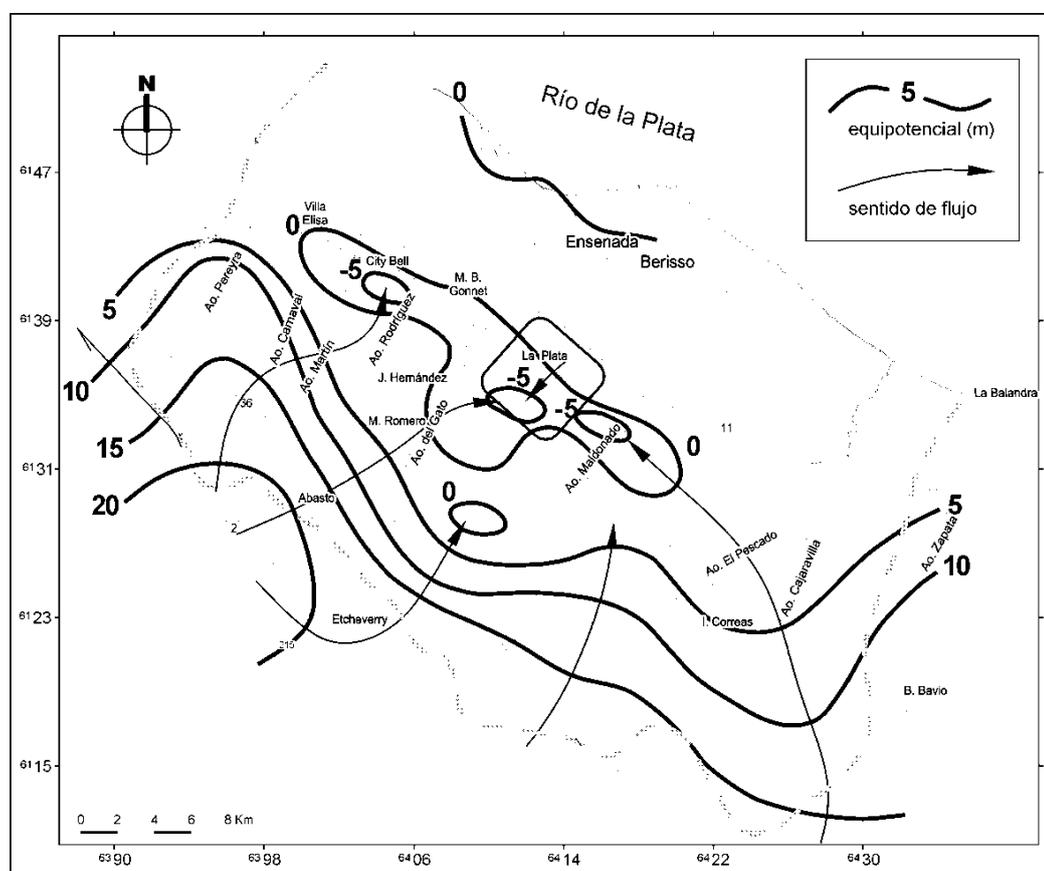


Figura 5. Red de flujo acuífero Puelche.

QUÍMICA

Acuífero Puelche

En relación con el comportamiento hidroquímico se pueden distinguir 3 ambientes: llanura alta, planicie costera y La Plata (Auge, 2001).

La llanura alta es la región más extensa y en este ámbito, todas las muestras tienen al CO_3H^- y al Na^+ como los iones netamente dominantes. La salinidad total es baja, con un promedio de 585 mg/L. El CO_3H^- se presenta con valores medios de 462 mg/L (7.6 meq/L), y domina con 80% del total de an-

iones. Le sigue el Cl⁻ con 37 mg/L (1 meq/L) y 11%, y luego NO₃⁻ y SO₄⁼ con contenidos similares. Los NO₃⁻ promedian 28 mg/L (0.45 meq/L) y 5% y los SO₄⁼ con 18 mg/L (0.4 meq/L) y 4%. El elevado contenido en CO₃H⁻ indica en forma clara que el acuífero Puelche se recarga por infiltración de la lluvia, debido a que este ión deriva de la combinación del CO₂ existente en la zona subsaturada, con el agua de infiltración. Respecto a los cationes, domina notoriamente el Na⁺ con promedios de 178 mg/L (7.7 meq/L) y 77%, le sigue el Ca⁺⁺ con 20 mg/L (1 meq/L) y 11%, el Mg⁺⁺ con 9 mg/L (0.7 meq/L) y 9%, y, finalmente, el K⁺ con 10 mg/L (0.25 meq/L) y 3%.

La planicie costera se caracteriza por la elevada salinidad del agua subterránea. Todas las muestras son cloruradas-sódicas, producto de las intrusiones marinas del Holoceno. La salinidad total es alta, promedia 12.517 mg/L. El Cl⁻ domina netamente entre los aniones con un promedio de 5.728 mg/L (162 meq/L) y 86% del total de aniones. Le sigue el SO₄⁼ con 637 mg/L (13 meq/L) y 8%. El CO₃H⁻ promedia 402 mg/L (7 meq/L) y 5%. Finalmente, el NO₃⁻ con 5 mg/L (0.07 meq/L) y 1%. Entre los cationes domina el Na⁺ con

una concentración media de 3.070 mg/L (134 meq/L) y 73% del total de cationes. Le sigue el Mg⁺⁺ con 399mg/L (33 meq/L) y 15%. El Ca⁺⁺ con 490 mg/L (24 meq/L) y 11%. Finalmente, el K⁺ con 73 mg/L (2 meq/L) y 1%.

En la Ciudad de La Plata y en parte de su periurbano, el acuífero Puelche presenta una composición química intermedia entre la que tiene en la llanura alta y en la planicie costera. Esto como consecuencia de la invasión de agua salada, por flujo lateral, desde la planicie costera hacia la llanura alta en la ciudad, debido al cono de depresión generado por el bombeo para agua potable. Dominan las muestras bicarbonatadas sódicas, como en la llanura alta, pero el CO₃H⁻ desciende a 66% del total de aniones y el Na⁺ a 70% del total de cationes. El contenido salino total promedia 1.093 mg/L. Al CO₃H⁻ (66%), le siguen el Cl⁻ con 24%, el NO₃⁻ con el 8.5% y el SO₄⁺⁺ con 1.5%. Respecto a los cationes al Na⁺ (70%) le siguen el Ca⁺⁺ y el Mg⁺⁺ con 14% cada uno y el K⁺ con 2%.

En la figura 6, se representan las composiciones químicas medias del acuífero Puelche en los tres ámbitos señalados, empleando el método de Piper.

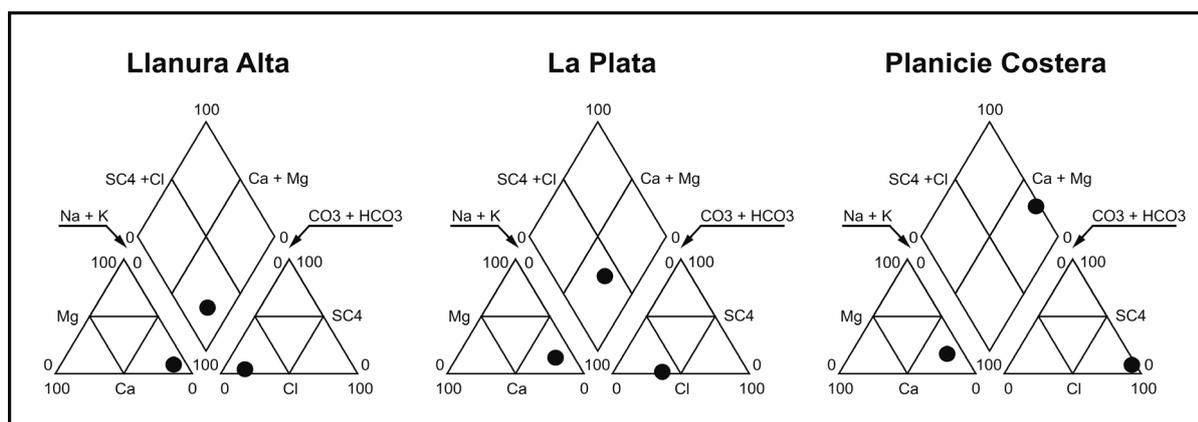


Figura 6. Acuífero Puelche–Piper.

Acuífero pampeano

Las muestras tomadas en la llanura alta promediaron un contenido en Sólidos

Disueltos Totales (SDT) de 609 mg/L, valor algo más alto que el registrado en el acuífero Puelche (585 mg/L). Tal como sucede con el Puelche, el agua del pampeano en la

llanura alta es bicarbonatada sódica, pero el porcentaje en CO_3H^- desciende a 75, respecto a 80% que registra el Puelche. El Na^+ también disminuye su participación con 56% del total de cationes, respecto a 77% del Puelche. Los alcalinos térreos son los que tienen un mayor crecimiento; el Ca^{++} aumenta de 11% en el Puelche a 24% en el pampeano y el Mg^{++} de 9 a 16%. Estos cambios en los contenidos catiónicos son producto del intercambio de bases que se produce en el agua del pampeano, cuando atraviesa el acuitardo que lo separa del Puelche. Por este proceso, el Ca^{++} y el Mg^{++} del agua del pampeano son retenidos por la estructura cristalina de la arcilla que forma el acuitardo y el Na^+ , que es uno de los elementos que la compone, es incorporado a la solución y genera un ablandamiento natural en el agua del Puelche.

En la planicie costera la salinidad total promedia 1.383 mg/L; o sea, un contenido salino mucho menor que el del Puelche (12.517 mg/L). El agua es bicarbonatada-clorurada-sódica, con porcentajes medios de 46, 39 y 66%, respectivamente. Los SO_4^- registran 15%, y del resto de los cationes, domina el Mg^{++} (15%) seguido del Ca^{++} (12%) y el K^+ (7%).

CONTAMINACIÓN

Acuífero Puelche

En lo referente a la aptitud para consumo humano, en la llanura alta, el acuífero Puelche contiene agua potable, respecto a la mayoría de las sustancias de uso corriente en las normas de potabilidad (salinidad total, sulfatos, cloruros, sodio, flúor y arsénico). Sin embargo, en los sitios urbanizados, el mayor limitante es el elevado contenido en NO_3^- .

No se detectó contaminación con plaguicidas y/o fertilizantes en la zona rural cultivada.

Nitratos. Dado que son el principal limitante de la potabilidad en la llanura alta

en general y en La Plata en particular, se hará un tratamiento específico sobre el origen y el comportamiento de los mismos.

Los NO_3^- constituyen la forma más oxidada, estable y móvil de la materia

nitrogenada en solución. Las fuentes más comunes de aporte al agua subterránea son fijación natural, especialmente por las legumbres; degradación de materia orgánica; así como contaminación urbana, rural e industrial. Aravena y colaboradores (1999), concluyen, mediante un análisis basado en la relación isotópica $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, que el NO_3^- del ámbito urbano tiene origen orgánico (materia fecal), en el cultivado en forma intensiva, el origen es tanto orgánico (abono y bosta) como inorgánico [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] y en el que se emplea para ganadería, vuelve a ser orgánico, pero de origen animal.

Acuífero Puelche

Las concentraciones extremas de nitratos identificadas en la región estudiada fueron 107 mg/L (1.7 meq/L) y 0 mg/L, el promedio 32 mg/L (0.5 meq/L) y la desviación estándar 29.8.

En la figura 7 se aprecian 3 altos cerrados con más de 50 mg/L, que es el límite de potabilidad vigente en la provincia de Buenos Aires. De los altos citados, el que se destaca por su extensión y la cantidad de pozos involucrados es el de la ciudad de La Plata con 38 km²; el de Villa Elisa tiene 11 y el de Abasto, 5 km².

El volumen de agua afectada por contaminación difusa con NO_3^- es del orden de 300 hm³, lo que implica algo más de 10% de la reserva del acuífero Puelche en la llanura alta (2 830 hm³). Ésta contaminación proviene del pampeano, por filtración vertical descendente, a través del acuitardo. El pampeano a su vez recibió y recibe la carga contaminante de pozos sépticos y pérdidas en la red cloacal. La totalidad del ejido urbano cuenta con red para evacuación de efluentes

cloacales, pero la mayor parte del periurbano no. Además, en algunos sectores del ejido

urbano el reemplazo de fosas sépticas por red cloacal, tiene menos de 30 años.

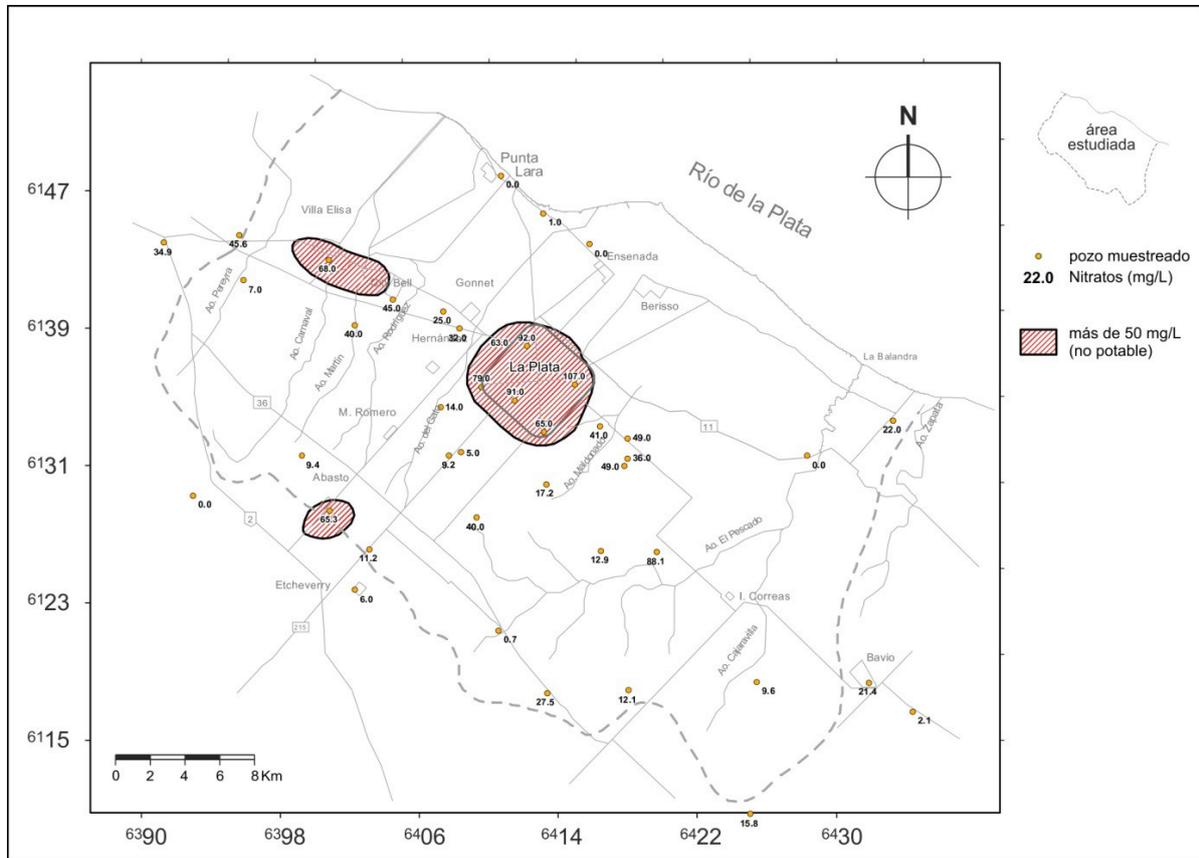


Figura 7. Nitratos Acuífero Puelche.

Para que el agua de red cumpla con la norma de potabilidad respecto a NO_3^- , considerada por la Ley Provincial 11.820, dentro de los componentes que afectan directamente a la salud y que exige un contenido inferior a 50 mg/L, ABSA procede a mezclar la subterránea con la proveniente del Río de la Plata, que normalmente posee menos de 10 mg/L. De esta forma se practica un aprovechamiento conjunto del recurso subterráneo y superficial, evitándose además, el ascenso del agua freática que ha ocasionado serios inconvenientes en el periurbano de la ciudad de Buenos Aires, debido a que en esta región se procedió a reemplazar el agua subterránea con la del Río de la Plata, por el alto tenor en NO_3^- que

presentaba la primera. Sin embargo, la falta de alcantarillado derivó en el ascenso del agua freática, que llegó a aflorar en amplios sectores, porque los vertidos se disponían en pozos absorbentes emplazados en las viviendas.

Acuífero pampeano

Los extremos de NO_3^- registrados en las muestras de agua analizadas fueron 202 y 1.0 mg/L, con un promedio de 43 mg/L. En la figura 8 se aprecian 7 altos con tenores mayores al límite de potabilidad adoptado en la norma de la provincia de Buenos Aires (50 mg/L). En el ámbito rural se presentan las concentraciones más altas, con valores

superiores a 100 mg/L, pero aquí la contaminación es puntual y, por ende, afecta a un volumen escaso de agua subterránea.

Los tenores en NO_3^- del acuífero pampeano son mayores que los del Puelche, pues el primero está más expuesto a la contaminación doméstica (pozos sépticos) y agrícola (fertilizantes).

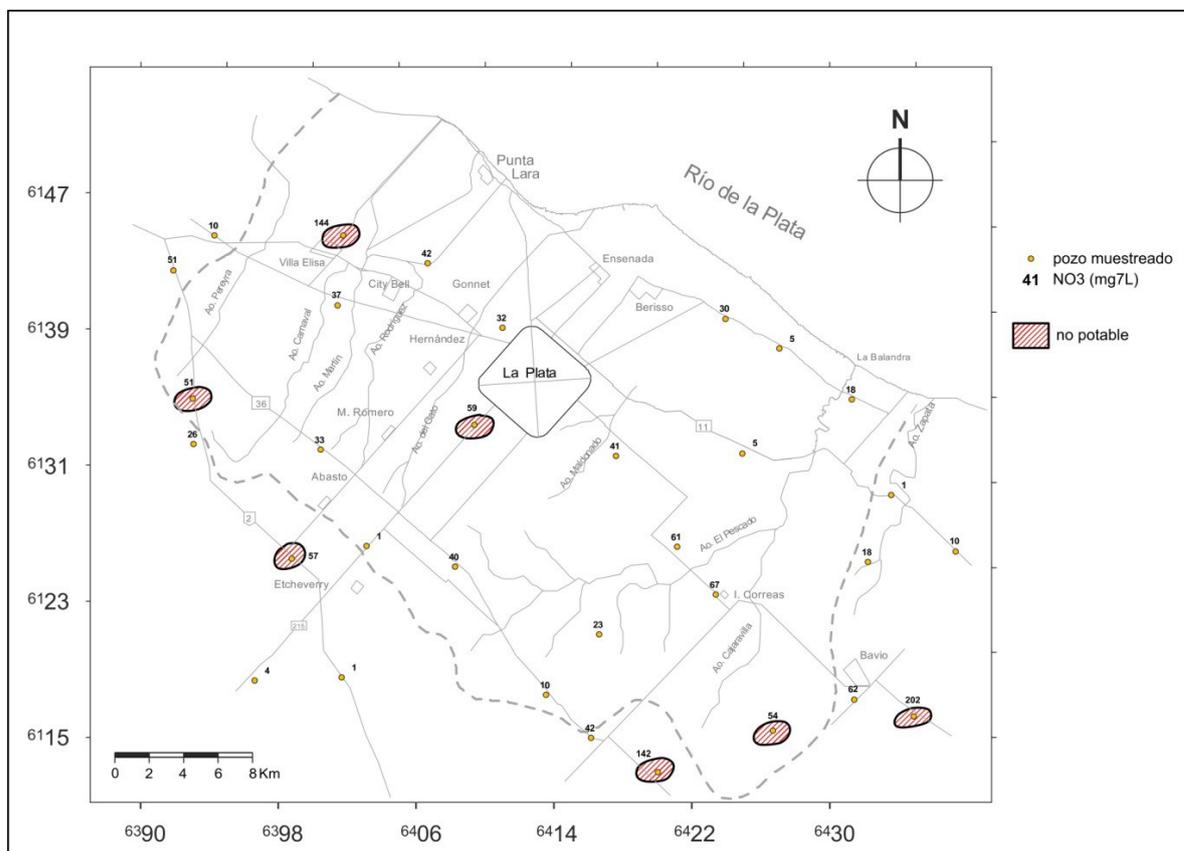


Figura 8. Nitratos Acuífero pampeano.

VULNERABILIDAD

Dado que las metodologías más conocidas (DRASTIC, GOD, SINTACS, AVI), tratan fundamentalmente sobre la vulnerabilidad de acuíferos libres, Auge (2003) desarrolló una específica para semiconfinados. La misma se basa en la diferencia de potenciales hidráulicos entre un acuífero semiconfinado y el libre sobrepuesto; en el caso objeto entre el Puelche y el pampeano.

Denominando h_1 al potencial hidráulico del acuífero libre (pampeano) y h_2 al del semiconfinado (Puelche), se tiene que si:

$h_2 > h_1$	Vulnerabilidad baja
$h_2 \approx h_1$	Vulnerabilidad media
$h_2 < h_1$	Vulnerabilidad alta

La figura 7 presenta tres altos cerrados con más de 50 mg/L de nitratos en el Puelche, que cotejados con las diferencias de potenciales hidráulicos (figura 9), brindan una buena correspondencia con los sitios de más marcados D_h favorables al pampeano. Esto resulta evidente en La Plata (máx.-10 m) y City Bell (máx. -5 m). En el caso estudiado, el espesor del acuitardo no juega un papel importante en la vulnerabilidad, pues

en el ejido urbano de La Plata es donde presenta los mayores valores (6 a 10 m); sin embargo, es justamente allí, donde el acuífero Puelche está más afectado por la contaminación con nitratos (figura 7). De lo expuesto se desprende que el acuitardo difi-culta pero no impide el flujo vertical y no es hábil para detener el transporte de NO_3^- ; por lo tanto, la contaminación del Puelche, espe-cialmente en el ejido urbano, es producto de la migración de nitratos desde el pampeano

sobrepuesto, transportados por un flujo ver-tical descendente, inducido por la mayor carga hidráulica de este último, respecto al Puelche.

Por lo tanto, de acuerdo con los resul-tados obtenidos en La Plata, se puede con-cluir que la diferencia de potenciales hidráulicos es un buen indicador de la vulnerabilidad de un acuífero semiconfinado a la contami-nación por NO_3^- .

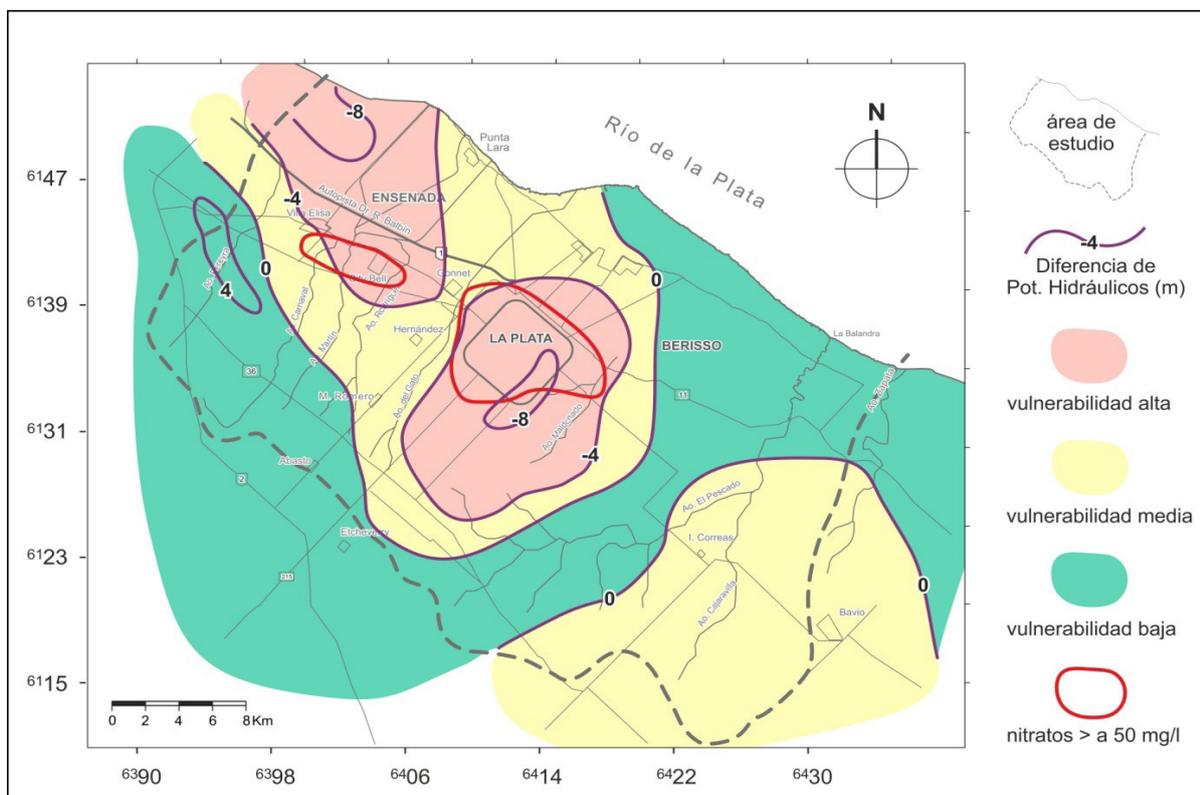


Figura 9. Vulnerabilidad del Acuífero Puelche a la contaminación con nitratos, respecto a potenciales hidráulicos.

CONCLUSIONES

- El acuífero Puelche es el más importante del ámbito estudiado, con una reserva estimada de agua dulce de $2,830 \text{ hm}^3$, en la llanura alta. De dicha reserva, algo más de 10% (300 hm^3), presenta deterioro por contaminación con NO_3^- , con más de 50 mg/L y, por lo tanto, no es potable. La elevada concentración de nitratos en el agua subterránea de las zonas urbanas, se subsana diluyéndola con la proveniente del Río de la Plata.
- Del Puelche se abastece 48% de los 530,000 habitantes de La Plata y localidades vecinas que cuentan con servicio de agua potable, a razón de $53 \text{ hm}^3/\text{a}$. Para el riego, que se practica exclusivamente con agua subterránea, del Puelche se captan

21 hm³/a y para la industria, otros 2 hm³/a. Por lo tanto, la extracción total del acuífero Puelche es de unos 76 hm³/a.

- El Puelche se recarga por filtración vertical descendente, desde el pampeano sobrepuesto, lo que deriva en potenciales hidráulicos y composiciones químicas muy similares de los dos acuíferos.
- La recarga natural del Puelche se estima en 53 hm³/a, volumen equivalente al que se extrae del mismo y se inyecta en la red de agua potable.
- El deterioro en la calidad del acuífero Puelche tuvo y aún tiene su origen en el aporte de agua contaminada con nitratos, desde el acuífero pampeano sobrepuesto, que contiene a la capa freática y, por ende, es el más expuesto a la contaminación. El transporte se produce por un flujo vertical descendente, que se incrementa notoriamente en el ejido urbano de La Plata y localidades vecinas, donde el Puelche ha perdido potencial hidráulico por explotación intensiva, respecto al pampeano.
- De las 100,000 ha estudiadas, el acuífero Puelche tiene agua dulce en unas 70,000 emplazadas en la llanura alta; las 30,000 restantes, con agua salada, coinciden con la planicie costera.
- Los parámetros hidráulicos del acuífero Puelche, obtenidos a partir de 47 ensayos de bombeo, brindaron los siguientes valores medios: transmisividad 500 m²/d y permeabilidad 20 m/d. Mediante 4 ensayos con pozo de observación se obtuvo: almacenamiento $5 \cdot 10^{-3}$ y transmisividad vertical $5 \cdot 10^{-4} \text{ d}^{-1}$.
- Las velocidades efectivas extremas de flujo en el acuífero Puelche son 0.02 y 6.5 m/d, esta última en el ámbito afectado por el bombeo; la media es 0.2 m/d.
- Respecto a vulnerabilidad ante la contaminación por nitratos, los ámbitos más afectados son los urbanos (La Plata, Villa Elisa, City Bell, Gonnet y localidades vecinas). En la zona rural, la contaminación con NO₃⁻, al ser de tipo puntual, deteriora un volumen menor del acuífero Puelche. Por ello, se recomienda al organismo proveedor de agua potable (ABSA), no construir nuevos pozos en zonas urbanas para hacerlo, de ser necesario, en aquellas zonas rurales, alejadas de los centros urbanos.
- El factor que mayor incidencia tiene en la vulnerabilidad de este acuífero, es la diferencia de potenciales hidráulicos respecto al pampeano, específicamente cuando el potencial hidráulico de este último supera al del Puelche. El espesor del acuitardo y del pampeano sobrepuesto, no ejercen incidencia apreciable en la vulnerabilidad del acuífero Puelche.
- Respecto a la química del acuífero Puelche, en la llanura alta, domina el agua de baja salinidad con un TSD medio de 585 mg/L. En relación con la composición aniónica, existe un neto predominio de agua bicarbonatada sódica (80%), seguida por la clorurada (11%), mientras que la sulfatada sólo registra 4% del total de aniones. El contenido medio de NO₃⁻ es de 28 mg/L y su participación de 5%. Entre los cationes sobresale el Na⁺, con 77% del total, seguido por el Ca⁺⁺ con el 11 y el Mg⁺⁺ con el 9, mientras que el K⁺ sólo registra 3%. En la planicie costera, el contenido salino se incrementa notoriamente (12,500 mg/L); el Cl⁻ pasa a dominar entre los aniones (86%), seguido por el SO₄⁼ (8%), el CO₃H⁻ (5%) y el NO₃⁻ (1%). Respecto a los cationes se tiene: Na⁺ (73%), Mg⁺⁺ (15%), Ca⁺⁺ (11%) y K⁺ (1%). En la Ciudad de La Plata, donde algunos pozos han sido afectados por el avance del agua salada subyacente a la planicie costera, como consecuencia de la extracción, se tiene: salinidad total media (1,100 mg/L), CO₃H⁻ (66%), Cl⁻ (24%), NO₃⁻ (8.5%), SO₄³⁻ (1.5%), Na⁺ (70%), Ca⁺⁺ (14%), Mg⁺⁺ (14%) y K⁺ (2%).

REFERENCIAS

- ABSA. (2019). Producción de agua potable para La Plata. Comunicación verbal.
- Aravena, R., Auge, M. P., Bucich, N., & Nagy, M. I. (1999). Evaluation of the origin of groundwater nitrate in the city of La Plata-Argentina, using isotope techniques. XXIX International Hydrogeology Congress. Bratislava: Proceedings . Auge, M. P., y Hernández, M. A. (1984). Características geohidrológicas de un acuífero semiconfinado (Puelche) en la llanura bonaerense. Su implicancia en el ciclo hidrológico de las llanuras dilatadas. Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras. Buenos Aires-París, Actas (II), 1019-1041.
- Auge, M. P. (1986). Hydrodynamic Behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River Basin. *GroundWater*, Dublin, Ohio. 24(5): 636-642.
- Auge, M. P. (1990). Aptitud del agua subterránea en La Plata, Argentina. Seminario Latinoamericano de Medio Ambiente y Desarrollo. Actas, Bariloche, pp. 191-201.
- Auge, M. P. (1991). Sobreexplotación del Acuífero Puelche en La Plata, Argentina. XXIII International Congress of IAH. Actas. Islas Canarias, pp. 411-415.
- Auge, M. P. (1995). Manejo del agua subterránea en La Plata-Argentina (Inéd.). La Plata, 3 T, pp. 1-149.
- Auge, M. P. (1996). Similitudes hidrogeológicas entre los acuíferos Pampeano y Puelche en La Plata, Argentina. II Seminario Hispano-Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. Serie Correlac. Geol., Universidad Nacional de Tucumán, 11, 235-241.
- Auge, M. P. (1997a). Investigación Hidrogeológica de La Plata y Alrededores. (tesis doctoral 2947). (Inéd). Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. 1-165, 58 mapas, 36 tablas, 86 figuras.
- Auge, M. P. (1997b). Piezometría de los acuíferos Pampeano y Puelche en Poblet La Plata-Argentina. Primer Congreso Nacional de Hidrogeología. Actas, Bahía Blanca, pp. 145-152.
- Auge, M. P. (2001). Hidrogeología de La Plata-Argentina. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, Curitiba, ISSN 1676-0099, 1(1), 27-40.
- Auge, M. P. (2003). Vulnerabilidad de Acuíferos. Conceptos y Métodos. E book: 1-38. RedIRIS. Red Académica y Científica de España en Internet. Recuperado de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/vulnerabilidad.html>
- Auge, M. P., Hernández, M. A., y Hernández, L. (2002). Actualización del conocimiento del Acuífero semiconfinado Puelche en la Provincia de Buenos Aires – Argentina. XXXIII International Hydrogeology Congress. Mar de la Plata: Proceedings.
- Auge, M. P., Hirata, R., y López-Vera, F. (2004). Vulnerabilidad a la Contaminación por Nitratos del Acuífero Puelche en La Plata-Argentina, Buenos Aires, E book: 1-187. FCEN-UBA. Recuperado de www.gl.fcen.uba.ar/Hidrogeologia/auge/libros.htm
- Cappannini, D. A., y Mauriño, V. R. (1966). Suelos de la zona litoral estuárica comprendida entre las ciudades de Buenos Aires al norte y La Plata al sur. Buenos Aires: INTA, 1-45.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont, Paris: Ed. V. González, N., Trovatto, M. M., y Hernández, M. A. (2002). Modelo hidrodinámico en una cuenca de llanura, tributaria del Río de la Plata. XXXIII International Hydrogeology Congress. Mar de la Plata: Proceedings, Miranda, M. (2017). Superficie de cultivo bajo cubierta en el Gran La Plata, análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica (SIG). Periurbanos hacia el consenso, Resúmenes, Primer Encuentro Nacional de Periurbanos e Interfases Críticas. Ediciones INTA, p. 75.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Rep. Geograph. Rev.* V, XXXVIII(1), 55-94.

Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance. *Climate Drexel Inst. of Techn.* 10, 185-311.