

HIDROGEOLOGÍA DE LA PLATA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Auge, Miguel P.

Departamento de Geología, FCEN, UBA. Ciudad Universitaria, Pabellón 2 (1428) Buenos Aires. auge@gl.fcen.uba.ar

Palabras clave: hidrogeología, agua subterránea, Acuífero Puelche, La Plata
Key words: hydrogeology, groundwater, Puelche Aquifer, La Plata

INTRODUCCIÓN

La Plata fue la primer ciudad importante del país que se abasteció exclusivamente con agua subterránea, habiéndose habilitado el servicio de agua potable en 1885. Recién en 1957, con la puesta en funcionamiento de la Planta Potabilizadora Punta Lara, se aprovechó también agua del Río de la Plata. Actualmente un 60% del consumo de los 700.000 habitantes servidos, se cubre con el Acuífero Puelche y un 40% con agua potabilizada del Río de la Plata.

Este trabajo es una síntesis actualizada de las numerosas investigaciones hidrogeológicas realizadas en el ámbito de La Plata y sus alrededores.

GEOLOGÍA Y COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

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 (hidrodinámico e hidroquímico), 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)

También conocido como Sedimentos Postpampeanos, está constituido por arcillas y limos arcillosos y arenosos de origen marino, fluvial y lacustre, acumulados en ambientes topográficamente deprimidos (Planicie Costera, valles fluviales y bañados o lagunas). Los Sedimentos Postpampeanos, 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 que actúan como acuitardos o acuícludos (Auge, 1990). Además, existe una notable correspondencia entre el Postpampeano y la presencia de agua salada en el perfil, aún 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 SO₄ y Cl. En la figura 1 se representa la disposición vertical del Postpampeano y otras unidades más antiguas, a lo largo de una traza que atraviesa la Llanura Alta y la Planicie Costera hasta el Río de la Plata. En la misma se aprecia el contacto directo entre el Postpampeano (Formación Querandí) y las Arenas Puelches, lo que evidentemente facilitó la entrada de agua de origen marino a esta última unidad, durante las intrusiones holocenas.

Pampeano (Pleistoceno medio - superior)

También denominado Sedimentos Pampeanos, se emplaza por debajo del Postpampeano en la Planicie Costera y subyace a la cubierta edáfica en la Llanura Alta. En la figura 3 se indica la distribución areal del Pampeano, que está formado por limo arenoso de origen eólico (loess) y fluvial, con abundante plagioclasa, vidrio volcánico y CO₃Ca (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. 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, generadas principalmente por actividades domésticas y agrícolas, como los nitratos. 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 2). En relación a 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 mediana productividad. 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.

Figura 1

PERFIL GEOLÓGICO

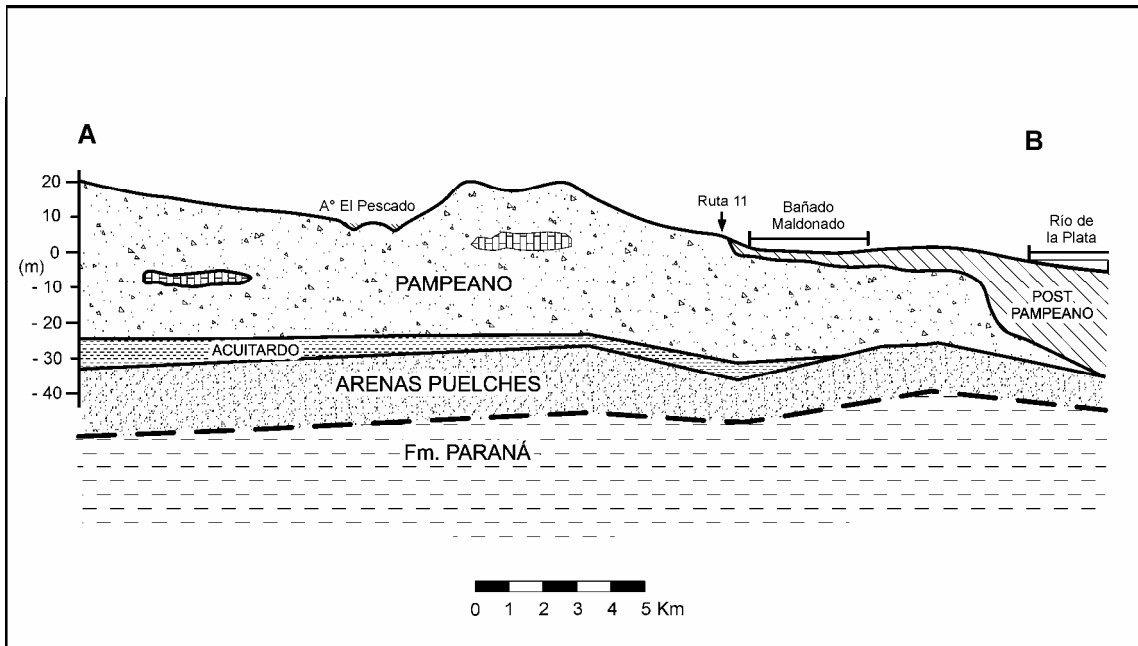
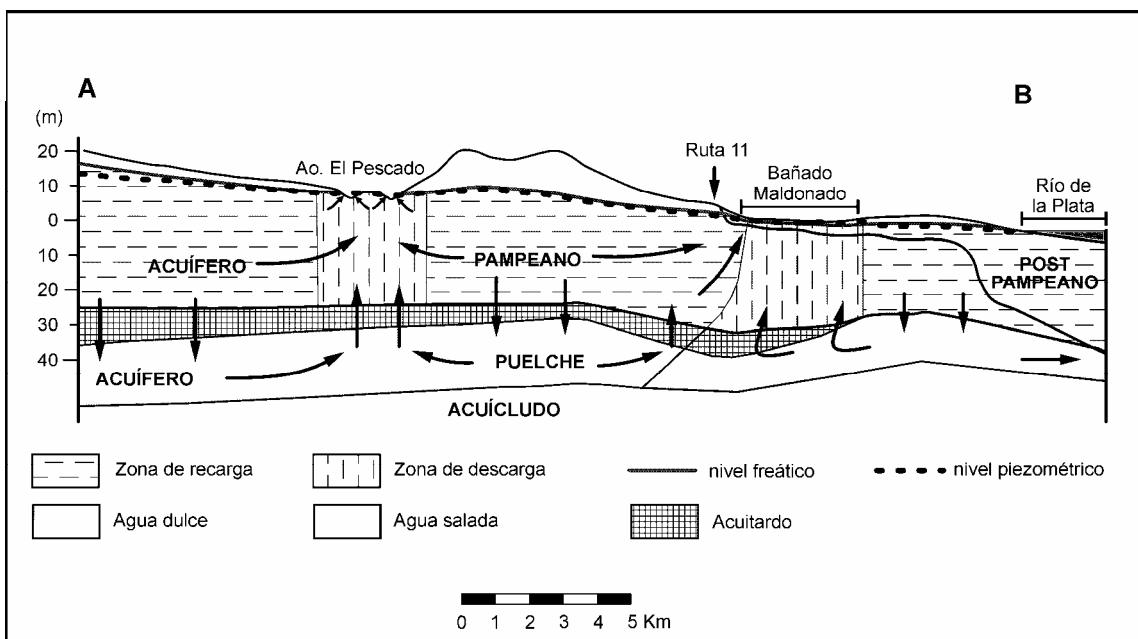


Figura 2

PERFIL HIDROGEOLÓGICO

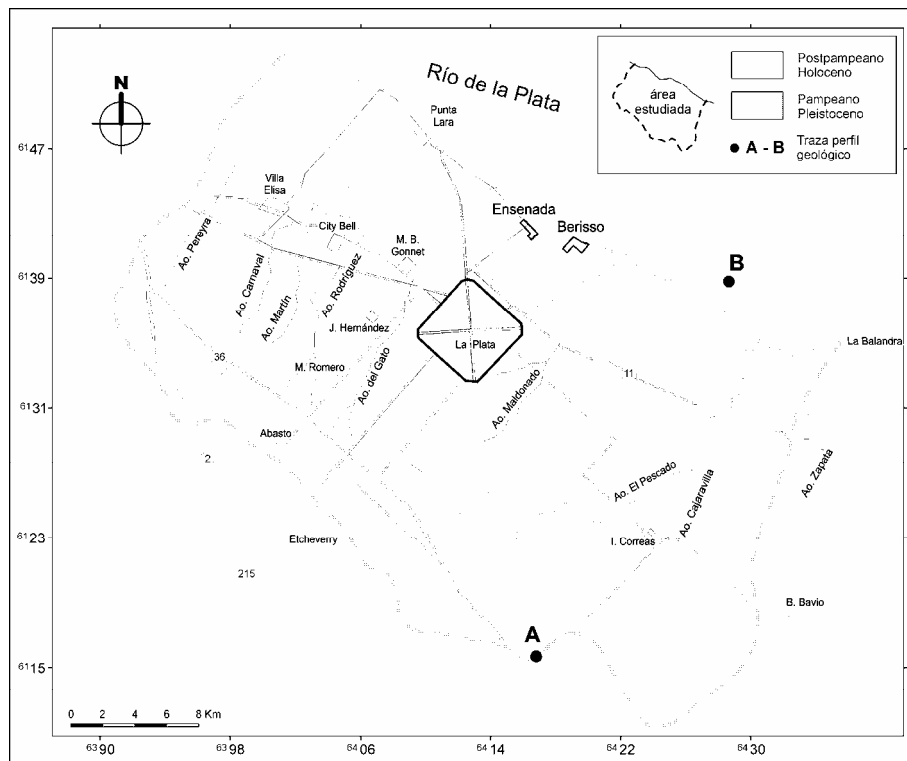


Arenas Puelches (Plio-Pleistoceno)

Constituyen una secuencia de arenas cuarzosas sueltas, medianas y finas, blanquecinas y amarillentas, con estratificación gradada. Se sobreponen en discordancia erosiva a las arcillas de la Formación Paraná y constituyen el acuífero más importante de la región por su calidad y productividad. Las Arenas Puelches son de origen fluvial, ocupan en forma continua unos 92.000 km² en el subsuelo del NE de la Provincia de Buenos Aires y se extienden también hacia el N en la de Entre Ríos y hacia el NO 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 (figura 4). Todos los pozos del servicio de agua potable de La Plata y alrededores captan este acuífero, 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 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 respecto a las unidades hidrogeológicas que subyacen al Puelche, porque son muy escasas las perforaciones que las alcanzan o las atraviesan, debido a que tanto en la zona estudiada como en otras vecinas, han brindado aguas con elevados tenores salinos. La descripción que sigue se basa en el perfil litológico del pozo Plaza de Armas de 495 m de profundidad, perforado en el ejido urbano de La Plata.

Figura 3

MAPA GEOLÓGICO



Formación Paraná (Mioceno superior)

Tiene origen marino, subyace al Puelche y está integrada por dos secciones de características disímiles. La superior, netamente arcillosa, de tonalidad verdosa dominante y con fósiles marinos, se desarrolla entre 63 y 154 m de profundidad y la inferior, más arenosa y calcárea desde 154 hasta 297 m. En la perforación Plaza de Armas no se citan niveles piezométricos ni composición de las aguas, por ello se eligió otra más somera de 82 m (Jockey Club de Punta Lara), para caracterizar químicamente a la unidad. Aquí, la secuencia arcillosa

cuspidal se extiende entre 47 y 78 m de profundidad y la unidad arenosa subyacente, ocupa el tramo de 78 a 82 m (profundidad final del pozo), por lo que, al no ser atravesada, se desconoce el espesor de esta última. El Acuífero Paraná de 78 a 82 m, presentó una salinidad de 7,5 g/L con agua clorurada sódica. Al respecto, resulta importante señalar que en la misma perforación el Acuífero Puelche, emplazado entre 23 y 47 m de profundidad, brindó agua con 18,2 g/L de sales totales disueltas y también del tipo clorurado sódico.

Formación Olivos (Oligoceno – Mioceno inferior)

Tiene origen continental, con participación eólica y fluvial. Subyace a la Formación Paraná mediante una superficie de discordancia erosiva y en la Perforación Plaza de Armas, se apoya sobre el Basamento Cristalino. En la Fm. Olivos predomina la tonalidad rojiza por lo que también se la denomina El Rojo (Groeber, 1945). En la perforación citada, ocupa el tramo del perfil que va desde 297 a 486 m de profundidad, con predominio de pelitas yesíferas de 297 a 447 m y un conglomerado cuarzoso y de rocas cristalinas (conglomerado basal) desde 447 a 486 m de profundidad. El acuífero contenido en el conglomerado basal, registró un nivel piezométrico de 7,35 m referido al cero del Riachuelo. No se indica en el perfil la composición del agua contenida en el Acuífero Olivos, pero en la cuenca del Río Matanza, la sección más profunda, registró una salinidad de 40 g/L (Auge, 1986).

Basamento Cristalino (Precámbrico)

Constituye la base impermeable del sistema hidrológico subterráneo. En el sitio estudiado 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 a 486 m de profundidad y puede asimilarse al que aflora en las Sierras de Tandil, en la Isla Martín García y en la costa uruguaya.

En el cuadro 1 se sintetiza el comportamiento hidrogeológico de las unidades descriptas.

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 hidrogeológico de las unidades de mayor interés (Puelche y Pampeano).

ESPESOR

En la figura 4 se representan las variaciones de espesor de las Arenas Puelches, apreciándose que las mayores potencias (más de 30 m) se dan en el subsuelo de La Plata y alrededores y en Bavio (más de 40 m), y espesores menores de 20 m, se presentan al O de la ciudad (arroyos Martín, Carnaval y Pereyra). Tampoco surgen evidencias de fallamiento, al analizar el mapa de espesor. Respecto al Acuífero Pampeano, la profundidad de su base (techo de las Arenas Puelches) deducida de la profundidad de la superficie freática, brinda el espesor saturado, variable que, junto con el área y la porosidad efectiva, permiten calcular el volumen de agua almacenada en este acuífero. El acuitardo que compone el techo del Acuífero Puelche, está formado por un limo arcilloso, ocasionalmente arenoso (Ensenadense basal), que se extiende en forma ininterrumpida en el subsuelo del ámbito estudiado, con un espesor más frecuente entre 4 y 8 m. Su importancia radica en que constituye la unidad a través de la cual se recarga y descarga el Puelche (Auge, 1986).

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 y por ello, es necesario 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. 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 presente). La Estación se ubica en el Bosque, en el ejido urbano, a 34° 55' de latitud S y 57° 56' de longitud O y a cota 15 m. La reducida extensión del ámbito estudiado, en relación a su carácter llano, permite extrapolar los registros de la Estación Climatológica La Plata, al resto del mismo.

Cuadro 1

UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Formación	POSTPAMPEANO	PAMPEANO		ARENAS PUELCHES		PARANÁ	OLIVOS	BASAMENTO CRISTALINO
		Llanura Alta	Planicie Costera	Llanura Alta	Planicie Costera			
Comportamiento Hidrogeológico	Acuífudo-acuitardo dominante. En los cordones conchiles, acuífero de baja permeabilidad	Acuífero de media productividad	Acuífero de media productividad	Acuífero de alta productividad	Acuífero de alta productividad	Acuífudo en la sección superior y acuífero en la inferior	Acuífudo en la sección superior y acuífero en la inferior	Acuífugo
Espesor (m)	0 a 30	25 a 45	0 a 30	15 a 30	15 a 25	234 (Perforación Pza. Armas)	189 (Perforación Pza. Armas)	
Caudal (m ³ /h)	0 (arcilla) 3 (conchilla)	10 a 30		40 a 160	30 a 120	15 a 70		
Transmisividad (m ² /d)	5.10 ⁻³ (arcilla) 10 (conchilla)	10 a 315		150 a 1500				
Permeabilidad (m/d)	1.10 ⁻³ (arcilla) 2 (conchilla)	1 a 10		10 a 50				
Salinidad (g/L)	15 (arcilla) 1 (conchilla)	0,3 a 1	4 a 15	0,5 a 1	8 a 20	3 a 7,5	6 a 40	
Litología	Arcillas y limos arcillosos y arenosos dominantes. Conchilla y arena subordinadas	Limo arenoso loessoide	Limo arenoso loessoide	Arenas medianas y finas	Arenas medianas y finas algo arcillosas	Arcillas en la sección sup. y arenas arc. en la inferior	Arcillitas yesíferas en la sección sup. y conglomerado arenoso en la inferior	
Origen	Marino, fluvial y lacustre	Eólico y fluvial	Eólico y fluvial	Fluvial	Fluvial	Marino	Eólico y fluvial	Metamórfico
Edad	Pleistoceno sup. Holoceno	Pleistoceno medio - sup.	Pleistoceno medio - sup.	Plio Pleistoceno	Plio Pleistoceno	Mioceno sup.	Oligoceno Mioceno inf.	Precámbrico

Precipitación

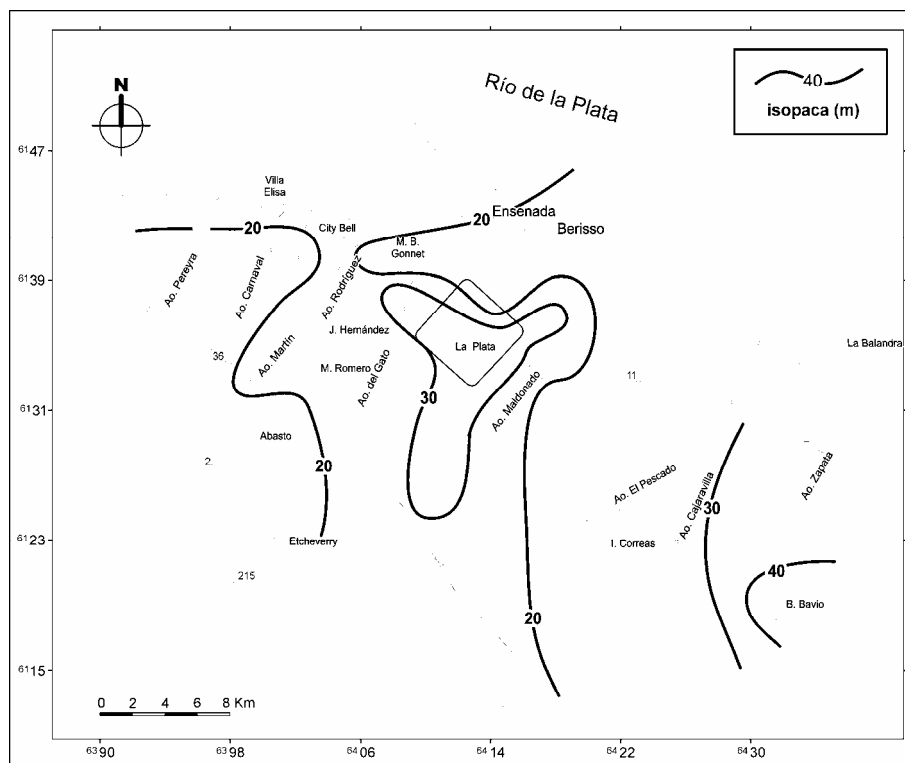
La precipitación media anual (1909/03) fue de 1.030 mm; el mes más lluvioso marzo (111 mm) y el menos lluvioso junio (62 mm). Para valores absolutos, el año de mayor precipitación fue 1914 (1.926 mm) y el más seco 1916 (415 mm), mientras que a nivel mensual, el de mayor registro fue abril/59 (356 mm) 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 1991/00). El incremento de la lluvia a partir de la década del 60, caracteriza al resto de la Provincia de Buenos Aires y es particularmente notorio en el sector NO de la misma. En relación a 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 el 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 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.

Figura 4

ACUÍFERO PUELCHÉ – ESPESOR



GEOMORFOLOGÍA

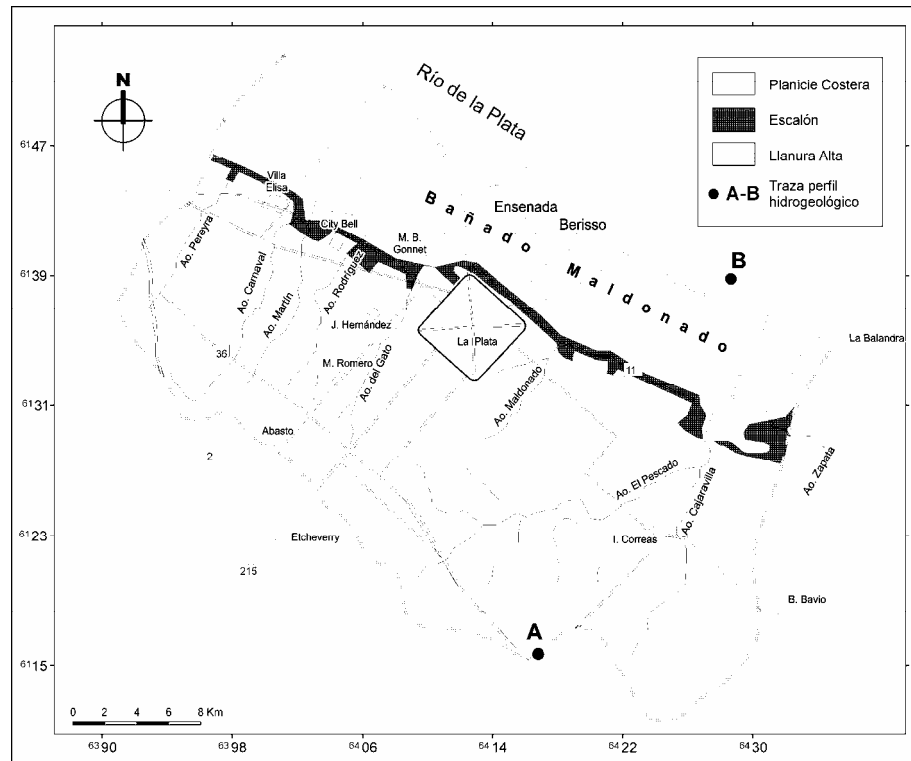
La región estudiada integra el sector austral de la gran Llanura Chacopampeana y se caracteriza por ser un ámbito con pendiente dominante hacia el NE y cotas extremas de 30 m en la divisoria coincidente con el límite SO y de 0 m en la ribera del Río de La Plata. Entre dichos ámbitos, separados por 23 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).

La **Planicie Costera** (Auge, 1990) que ocupa 318 km², se extiende en forma de faja paralela a la costa del Río de la Plata, en un ancho de 6 a 10 km, constituyendo un ámbito casi sin relieve, entre cotas 5 y 0 m (figura 5), lo que deriva en gradientes topográficos extremos de 0,5 y 0,8 m/km. Esta condición topográfica limita notoriamente el flujo superficial, dificultando 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 emplazados por encima de la cota 2,5 m que, dispuestos paralelamente a la línea de ribera, actúan como barreras para los fluvios. Por ello, para que las aguas superficiales lleguen al Río de la Plata, generalmente es necesario efectuar canalizaciones. Lo antedicho da lugar a la formación de un ambiente mal drenado, de tipo cenagoso, 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 y edad Holocena, cubiertos localmente por sedimentos arenosos y conchiles, que forman los cordones costeros. Al conjunto se lo denomina Sedimentos Postpampeanos y poseen significativa trascendencia hidrogeológica. Los pelíticos porque se comportan como acuícludos y generalmente se asocian con aguas de elevada salinidad y los conchilíferos porque conforman acuíferos de baja salinidad, debido a que por su elevada porosidad y conductividad hidráulica, favorecen la infiltración del agua de

lluvia y de la proveniente de las crecidas del Río de la Plata. Estos acuíferos, pese a ser de dimensiones reducidas (lentiformes) y a almacenar volúmenes relativamente pequeños, constituyen las únicas fuentes de provisión de agua apta para consumo humano y aún para el ganado en la Planicie Costera.

Figura 5

MAPA GEOMORFOLÓGICO



La 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 NO a SE (figura 5), entre cotas 30 y 10 m en el sector NO de la zona estudiada y entre cotas 23 y 7,5 m en el sector SE. Presenta ondulaciones muy suaves originadas por la erosión fluvial y una pendiente topográfica dominante hacia el NE de 20 m en 14 km (1,4 m/km) en el sector NO y de 13 m en 12 km (1,1 m/km) en el sector SE. En la Llanura Alta, por debajo del suelo, se disponen los Sedimentos Pampeanos, que por su conformación granométrica, 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.

El 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, manifestándose con mayor claridad entre la ciudad de La Plata y el extremo NO de la región estudiada. Al SE de La Plata pierde definición, por disminución del resalto vertical, disponiéndose entre cotas 5 y 7,5 m. La erosión fluvial corta al Escalón, desplazándolo por los 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 NO. Al SE de La Plata, ya se mencionó que pierde definición morfológica por disminución del gradiente topográfico, dado que el ancho normalmente supera los 500 m. Arealmente ocupa sólo 43 km². El Escalón es una forma erosiva labrada en los Sedimentos Pampeanos y representa la antigua línea de ribera que limitó la ingresión del Mar Querandino.

En coincidencia aproximada con el Escalón, se produce la mayor descarga natural de agua dulce del Acuífero Puelche (figura 2).

HIDROGRAFÍA

Las cuencas hidrográficas presentan características muy diferentes de acuerdo al 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 (A° El Pescado). En la Planicie Costera los cauces se tornan divagantes, perdiéndose 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 (figura 5), la cuenca del Arroyo El Pescado 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 A° 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 es 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. Existen afloros en siete de las nueve cuencas hidrográficas (Auge, 1995) que brindan un índice de escurrimiento del orden del 6% respecto a la lluvia, con caudales medios entre 30 y 70 L/s.

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 2. La comunicación entre ambos acuíferos a través del acuitardo, 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 et al (2002), también desarrollaron un modelo hidrodinámico conceptual, pero para las cuencas de los arroyos Martín - 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.

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 & Mather (1957), dado que ha brindado buenos resultados en este mismo 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 (E_p), de la real (E_{tr}), del déficit (D) y del exceso (E), se consideraron las precipitaciones (P) y las temperaturas (T) medias mensuales,

correspondientes al período 1909/01, registradas en la Estación Climatológica La Plata - Observatorio. Para la capacidad de campo (Cc), se optó por el valor 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 93 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 el 27% de la evapotranspiración real y el 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 (jun, jul, ago), se da el mayor exceso hídrico (117 mm), que representa el 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 disminución de la insolación. 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. Empleando la clasificación de Thornthwaite (1948), el clima es del tipo B 1 B' 2 r a' (húmedo, mesotermal, con nula o pequeña deficiencia de agua y concentración estival de la eficiencia térmica del 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 1909/01, expresados en mm/año.

$$I = P - Etr - Ef$$
$$156 = 1.030 - 812 - 62$$

O sea, que en relación a 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 superan con amplitud a los déficit hídricos 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 10 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 aproximado del 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 el Pampeano; con dicho caudal se regaban unas 13.000 ha (Auge, 1997a). Actualmente se cultivan a la intemperie unas 3.000 hectáreas, que se riegan por surco y otras 1.000, bajo techo, con riego por goteo. El volumen total empleado para regar es de unos 17 hm³/a, de los cuales 12 provienen del Puelche y 5 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 del 15% respecto a la lluvia; este índice, considerando el lapso 1909/01, 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 la red de flujo (figura 6) 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.

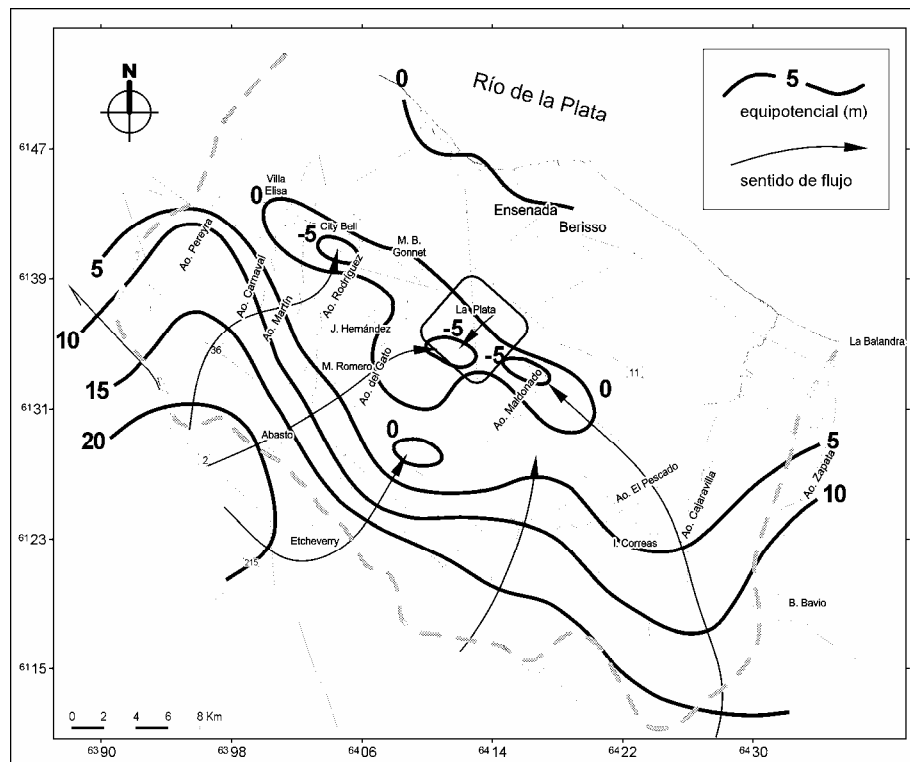
Descarga

En este punto deben considerarse tanto los procesos de descarga natural como artificial. De ambos acuíferos, el Puelche es el más explotado, siendo sus principales usos 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, permitiendo su captación junto con el Puelche, y para el ganado en la zona rural. El cambio en las prácticas de cultivo ocurridas en los últimos 10 años, donde se pasó de cultivar a la intemperie y regar por surco, a hacerlo en invernadero y regar por goteo, ha modificado sustancialmente el volumen de agua subterránea empleada. En el año 1992 la superficie regada en el ámbito de llamada del cono de depresión de La Plata era de 13.000 hectáreas y el volumen extraído de unos 70 hm³/a, de los cuales 49 hm³/a provenían del Puelche y 21 hm³/a del Pampeano (Auge, 1997a). Actualmente se riega por surco unas 3.000 ha y por goteo 1.000, lo que requiere una extracción de unos 17 hm³/a, de los cuales 12 provienen del Puelche y 5 hm³/a del Pampeano (datos sujetos a revisión). En relación al consumo para alimentación humana, proveniente del Acuífero Puelche, este creció de 50 hm³/a en 1992 a 75 hm³/a en 2003, considerando la población que cuenta con servicio de agua potable. La que carece de este servicio, emplea unos 2 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.

Figura 6

ACUÍFERO PUELCHÉ – RED DE FLUJO



Dinámica

Respecto al movimiento lateral, en las figuras 6 y 7 se representan las redes de flujo correspondientes a los acuíferos Puelche y Pampeano, producto de los niveles piezométricos medidos en junio del 2003. Respecto al primero, se aprecia claramente el control que, sobre el flujo del Puelche, ejerce el bombeo de los pozos para agua potable de La Plata y localidades vecinas, como Hernández, Gonnnet, City Bell y Villa Elisa. La equipotencial de 0 m tiene forma elongada en dirección NO – SE, con un perímetro de 58 km, y un marcado lóbulo hacia el SO 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 -5m, también cerradas, que abarcan pequeñas superficies. Los gradientes hidráulicos, en el sector SO de la región estudiada (zona no alterada), varían entre $1,0$ y $2,5 \cdot 10^{-3}$, para incrementarse en la zona explotada hasta $1,9 \cdot 10^{-2}$.

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

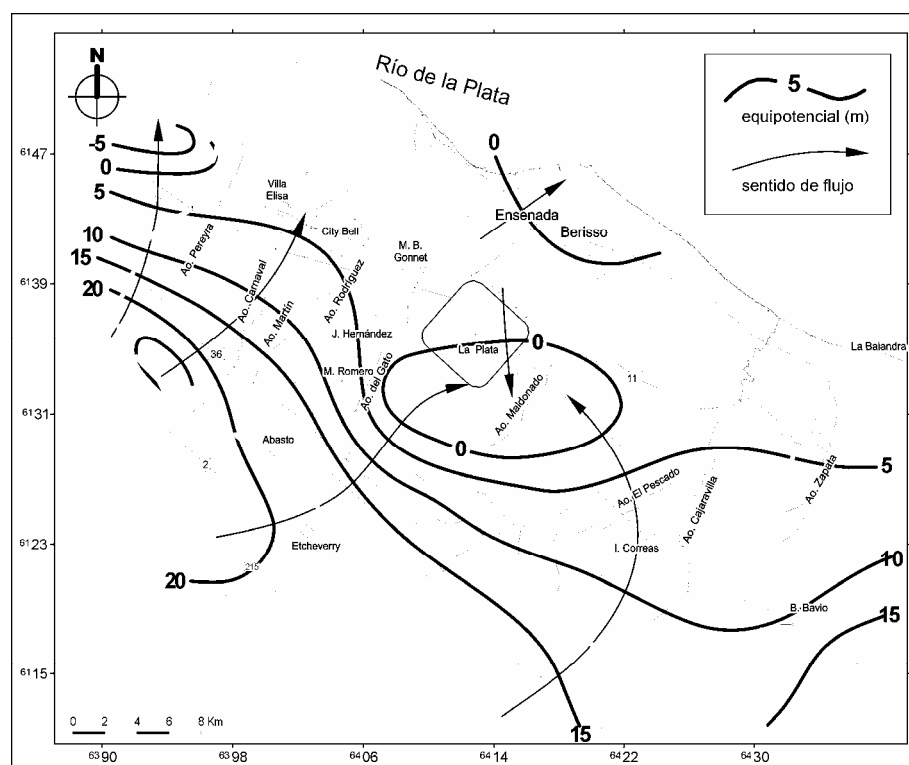
$$Q = T \cdot i \cdot L \quad 145.000 \text{ m}^3/\text{d} \approx 500 \text{ m}^2/\text{d} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 58.000 \text{ m}$$

Q: caudal T: transmisividad i: gradiente hidráulico L: longitud

Los 145.000 m³/d equivalen a 53 hm³/a y, dado que la extracción alcanza a 75 hm³/a, el déficit asciende a unos 22 hm³/a. La estabilidad piezométrica observada en los últimos años, indica que las entradas deben ser similares a las salidas y por lo tanto, el déficit mencionado debe cubrirse con aporte natural y artificial, ambos a partir del Pampeano. El primero, por filtración vertical descendente de parte de la reserva; el restante, de origen artificial, es producto de las pérdidas en la red de agua potable, estimadas en un 15% del agua circulante. Dado que en la red circulan unos 125 hm³/año (75 hm³/a de agua subterránea y 50 hm³/a de agua superficial), la recarga artificial al Pampeano asciende a unos 19 hm³/a. Adicionándole al flujo (53 hm³/a) este último valor, se llega a un equilibrio bastante aceptable entre salidas (75 hm³/a) y entradas (72 hm³/a). La figura 7, que reproduce la red de flujo del Acuífero Pampeano, presenta un cono de depresión, limitado por la equipotencial de 0 m, ubicado al S de La Plata. El cono es más suave que el existente en el Acuífero Puelche y tiene forma elongada en dirección E-O. El origen de este cono es el descenso de la superficie freática, como consecuencia de la explotación del acuífero subyacente (Puelche). Otro cono, en el vértice NO del mapa, fuera de la zona estudiada, se insinúa mediante la isolínea de -5 m. Los mayores gradientes hidráulicos del Pampeano ($2,4 \cdot 10^{-3}$), son similares a los registrados en el Puelche de la zona no disturbada, pero los menores ($3,7 \cdot 10^{-4}$), son más bajos 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 7

ACUÍFERO PAMPEANO – RED DE FLUJO



Química

Acuífero Puelche

En relación al comportamiento hidroquímico se pueden distinguir 3 ambientes: Llanura Alta; Planicie Costera; La Plata (Auge, 2001).

La Llanura Alta es la región más extensa y en este ámbito, todas las muestras tienen al CO₃H y al Na como iones netamente dominantes. La salinidad total es baja, promediando 585 mg/L. El CO₃H se presenta con valores medios de 462 mg/L (7,6 meq/L) y 80% del total de aniones. 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 el 3%.

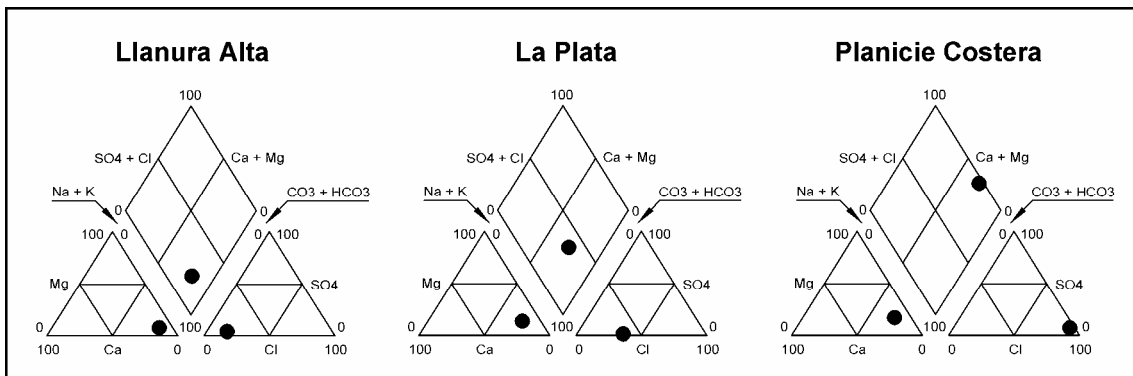
La Planicie Costera se caracteriza por la elevada salinidad del agua subterránea. Todas las muestras son cloruradas – sódicas, producto de las intrusiones marinas del Holoceno. La salinidad total es alta, promediando 12.517 mg/L. El Cl domina netamente entre los aniones con un promedio de 5.728 mg/L (162 meq/L) y 86,5% del total de aniones. Le sigue el SO₄ con 637 mg/L (13 meq/L) y 7,9%. El CO₃H promedia 402 mg/L (7 meq/L) y 5,5%. Finalmente, el NO₃ con 5 mg/L (0,07 meq/L) y 0,1%. 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 al 66% del total de aniones y el Na al 70% del total de cationes. El contenido salino total promedia 1.093 mg/L. Al CO₃H le siguen el Cl con el 24%, el NO₃ con el 8,5% y el SO₄ con el 1,5%. Respecto a los cationes al Na le siguen el Ca y el Mg con el 14% cada uno y el K con el 2%.

En la figura 8, se representan las composiciones químicas medias del Acuífero Puelche en los tres ámbitos señalados, empleando el método de Piper.

Figura 8

ACUÍFERO PUELCHÉ – PIPER



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). En este ámbito, pero en los sitios urbanizados, el mayor limitante es el elevado contenido en NO₃. **No se detectó contaminación con plaguicidas y/o fertilizantes en la zona rural cultivada.** En la Planicie Costera, las concentraciones en sales totales disueltas, Cl, SO₄ y Na, superan con amplitud los máximos admitidos en la Norma de Potabilidad de la Provincia de Buenos Aires, superando en algunos casos a las del mar, por lo que el agua subterránea es inapta para consumo humano y aún para el ganado. Aquí, sólo el agua contenida en los cordones conchiles puede ser consumida por lugareños mediante captaciones domiciliarias de poca profundidad, pero la reserva es muy limitada

Nitratos. Dado que son la 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 esta sustancia. Los NO₃ 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; contaminación urbana, rural e industrial. Aravena et al 1999, concluyen, mediante un análisis basado en la relación isotópica ¹⁵N/¹⁴N, que: el NO₃ del ámbito urbano, tiene origen orgánico (materia fecal), en el cultivado en forma intensiva, el origen es tanto orgánico (abono – bosta) como inorgánico

[(abono – $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$] y en el que se emplea para ganadería, vuelve a ser orgánico, pero de origen animal. 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 9 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 del 10% de la reserva del Acuífero Puelche en la Llanura Alta (2.830 hm³). Esta 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 20 años. 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, se 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 el ascenso del agua freática, que ha ocasionado serios inconvenientes en el periurbano de Buenos Aires.** En esta región se procedió a reemplazar el agua subterránea con la del Río de la Plata, debido al alto tenor en NO_3 que presentaba la primera. Además, la salida de servicio de numerosos pozos de provisión a la industria, por la retracción económica, hizo que a partir de 1990 se produjera un ascenso continuado de la superficie freática, especialmente en los sitios sin cobertura de red cloacal. **Actualmente el problema es muy grave pues afecta a más de 2 millones de habitantes, con agua freática contaminada aflorando en amplios sectores del Conurbano de Buenos Aires.**

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 al 80% que registra el Puelche. El Na también disminuye su participación con el 56% del total de cationes, respecto al 77% del Puelche. Los alcalinos térreos son los que tienen un mayor crecimiento; el Ca aumenta del 11% en el Puelche a 24% en el Pampeano y el Mg del 9 al 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 generando 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 del 46, 39 y 66%, respectivamente. Los SO_4 registran un 15%, y del resto de los cationes, domina el Mg (15%) seguido del Ca (12%) y el K (7%).

Nitratos

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 10 se aprecian varios 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).

VULNERABILIDAD

Dado que las metodologías más conocidas (DRASTIC, GOD, SINTACS, AVI), tratan 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 **h1** al potencial hidráulico del acuífero libre y **h2** al del semiconfinado, se tiene que:

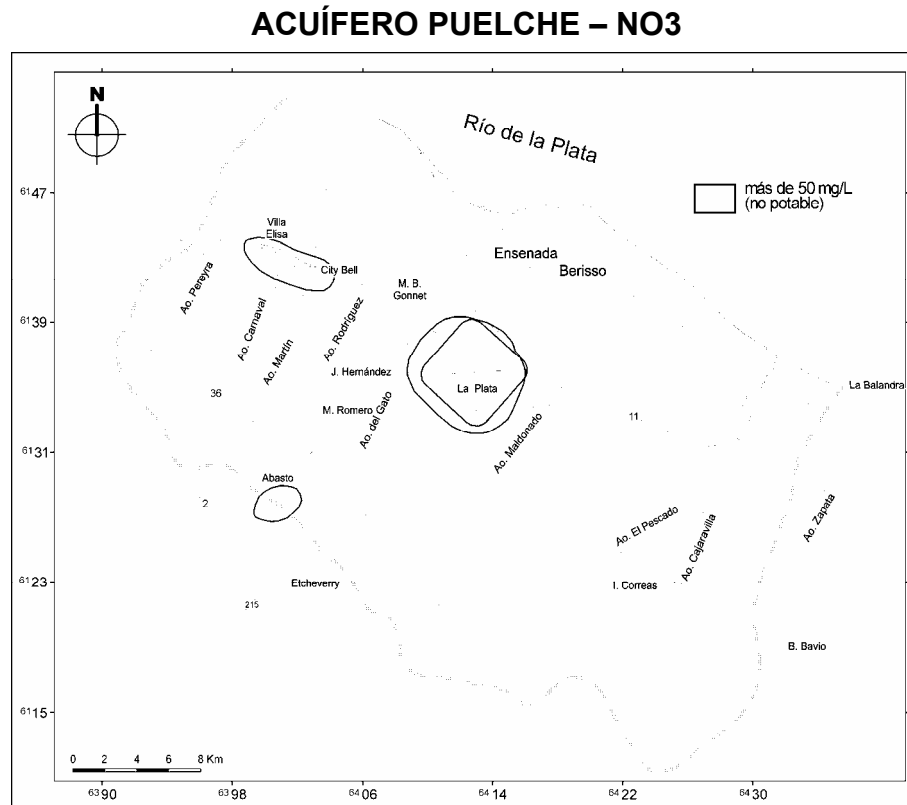
$h_2 > h_1$	vulnerabilidad baja
$h_2 \approx h_1$	vulnerabilidad media
$h_2 < h_1$	vulnerabilidad alta

La figura 9 presenta tres altos cerrados con más de 50 mg/L de nitratos en el Puelche, que cotejados con las diferencias de potenciales hidráulicos (figura 11), brindan una buena correspondencia con los sitios de más marcados Δh favorables al Pampeano. Esto resulta evidente en La Plata (-10 m) y City Bell (-10 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 (de 6 a 10 m); sin embargo es justamente allí, donde el Acuífero Puelche está más afectado por la contaminación con nitratos (figura 9). De lo expuesto se desprende que el acuitardo dificulta pero no impide el flujo vertical y no es hábil para detener el transporte de NO_3 , por lo que la contaminación del Puelche, especialmente en el ejido urbano, es producto de la migración de nitratos desde el Pampeano sobrepuesto, transportados por un flujo vertical descendente, inducido por la mayor carga hidráulica de este último, respecto al Puelche. Por lo tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos en La Plata, se puede concluir que la diferencia de potenciales hidráulicos es un buen indicador de la vulnerabilidad de un acuífero semiconfinado a la contaminación con NO_3 (Auge et al, 2004).

PROPUESTA DE EXPLOTACIÓN

En este punto se propone la construcción de nuevos pozos, para incrementar la captación a fin de abastecer a unos 200.000 habitantes que hoy carecen de agua potable. Para la ubicación de la batería propuesta y para definir las características constructivas de las perforaciones, se tuvo en cuenta la aptitud del agua subterránea, tanto en lo referente a calidad como a disponibilidad, productividad y renovabilidad. Los ámbitos excluidos fueron: los urbanizados, por el alto contenido de NO_3 , los cultivados, por la alta carga de pesticidas, y la Planicie Costera, por la elevada salinidad. Finalmente, se desarrolló un modelo matemático en condiciones de régimen variable, con el objeto de predecir la evolución piezométrica del Acuífero Puelche. En la figura 12 se indica la posición de los 30 pozos integrantes de la batería propuesta, que como se aprecia se ubican a la vera de la ruta 36 (20 de ellos) y del camino real

Figura 9



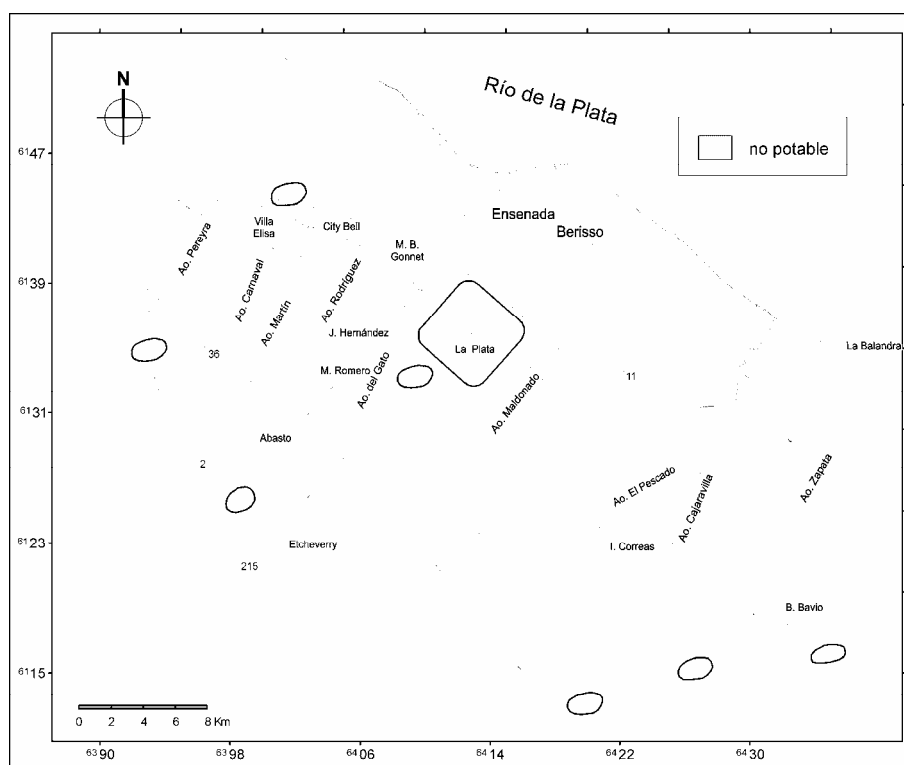
que une Ignacio Correas con Oliden, los 10 restantes. Este ámbito prácticamente no está alterado por explotación, ni presenta actualmente riesgo de contaminación por actividades agrícolas. Para la batería se eligió un caudal total de 64.800 m³/d (90 m³/h por pozo) y una separación entre pozos de 700 m. Los parámetros hidráulicos utilizados en la simulación fueron:

transmisividad (T) = 500 m²/d, coeficiente de almacenamiento (S) = 5 · 10⁻³,
transmisividad vertical (T') = 5 · 10⁻⁴ día⁻¹, factor de filtración (B) = 1.050 m

Para el modelo de simulación se tuvo en cuenta el comportamiento de semiconfinado, con filtración vertical a través del techo (acuitardo), que caracteriza al Acuífero Puelche. La extensión del cono de depresión generado por el bombeo conjunto de los 30 pozos, a los 60 días continuados de bombeo, que es cuando se alcanzaría la estabilidad hidráulica es de unas

Figura 10

ACUÍFERO PAMPEANO – NO3



23.000 hectáreas (Auge y Bucich, 1996). El excedente hídrico, considerando los valores medios surgidos del balance, es de 218 mm/año; del mismo un 72% se infiltra (156 mm/a) y un 28% escurre superficialmente (62 mm/a). Traduciendo la lámina a volumen, se tiene que en las 23.000 ha, la infiltración alcanzaría a 35,9 hm³/a; valor que supera al programado para la extracción de agua potable (23,6 hm³/a), más el que se bombea actualmente para riego en el ámbito afectado por el cono de depresión (2 hm³/a). Dado que la extracción total es de 25,6 hm³/a, el excedente neto alcanza a unos 10 hm³/a.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El Acuífero Puelche es el más importante del ámbito estudiado, con una reserva estimada de agua dulce de 2.830 hm³, en la Llanura Alta. De dicha reserva, algo más del 10% (300 hm³), presenta deterioro por contaminación con NO₃, con más de 50 mg/L, y por lo tanto no es potable.
- Del Puelche se abastecen el 60% de los habitantes de La Plata y localidades vecinas que cuentan con servicio de agua potable (700.000), a razón de 75 hm³/a. Para el riego, que se

practica exclusivamente con agua subterránea, del Puelche se captan 12 hm³/a y para la industria, otros 2 hm³/a. Por lo tanto la extracción total del Acuífero Puelche es de unos 89 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, mientras que la generada por pérdidas en la red de distribución de agua potable, es de unos 19 hm³/a adicionales. El proceso de filtración vertical descendente, también permite el pasaje de NO₃ desde el Pampeano al Puelche, a través del acuitardo que los separa.
- De las 100.000 hectáreas estudiadas, el Acuífero Puelche tiene agua dulce en unas 70.000 emplazadas en la Llanura Alta; las 30.000 restantes, con agua salda, 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, permeabilidad 20 m/d. Mediante 4 ensayos con pozo de observación se obtuvo: almacenamiento $5 \cdot 10^{-3}$, 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 a 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. 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 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 a la composición aniónica, existe un neto predominio de agua bicarbonatada sódica (80%), seguida por la clorurada (11%), mientras que la sulfatada sólo registra un 4% del total de aniones. El contenido medio de NO₃ es de 28 mg/L y su participación del 5%. Entre los cationes sobresale el Na, con el 77% del total, seguido por el Ca con el 11 y el Mg con el 9, mientras que el K sólo registra el 3%. En la **Planicie Costera**, el contenido salino se incrementa notoriamente (12.500 mg/L); el Cl pasa a dominar entre los aniones (87%), seguido por el SO₄ (8%), el CO₃H (4,9%) y el NO₃ (0,1%). 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), SO₄ (1,5%), Na (70%), Ca (14), Mg (14) y K (2%).
- Para ampliar el servicio de agua potable, se propone la construcción de una batería de 30 pozos, ubicada a unos 15 km al S de La Plata. Con dichos pozos, programados para erogar un caudal individual de 90 m³/h (23,6 hm³/a), se podrá abastecer a una población de unos 200.000 habitantes, que hoy carecen de dicho servicio.

Se recomienda:

- No perforar más pozos en el casco urbano de La Plata y parajes vecinos (Tolosa, Ringuet, Gonnet, City Bell, Villa Elisa, Los Hornos, etc), debido al elevado contenido en NO₃ que presenta el agua subterránea. Para reforzar el suministro de las localidades menos pobladas, deben elegirse sitios ubicados fuera de los ámbitos urbanizados.
- Identificar y reparar las pérdidas en la red cloacal, para evitar el continuo ingreso de NO₃ al sistema subterráneo. Esto, que evidentemente no resulta tarea sencilla, dará lugar a la disminución progresiva de la contaminación en el Acuífero Pampeano y consecuentemente en el Puelche.
- Instalar caudalímetros en los pozos de explotación, a fin de precisar sus gastos, pues en la actualidad, la extracción debe estimarse en función del rendimiento de los equipos de bombeo.
- Instalar medidores domiciliarios para optimizar el uso del agua y establecer la magnitud de las pérdidas en las cañerías de conducción.
- Ejecutar la batería de pozos propuesta toda vez que el costo del agua subterránea es significativamente menor que el del agua superficial, debido a que no requiere tratamiento de potabilización. Además, el Río de la Plata presenta contaminantes de todo tipo, algunos altamente tóxicos, aún en muy bajas concentraciones (metales pesados, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, fenoles, pesticidas, productos medicinales y radiológicos, etc.). Esto hace que no sólo sean complicados y costosos los procesos para extraerlos del agua, sino que también es complicado y a veces prácticamente imposible detectarlos y cuantificarlos

con precisión. En este sentido, el agua subterránea está mucho más protegida que la superficial frente a la polución y por ende, normalmente no presenta ninguno de los contaminantes peligrosos citados.

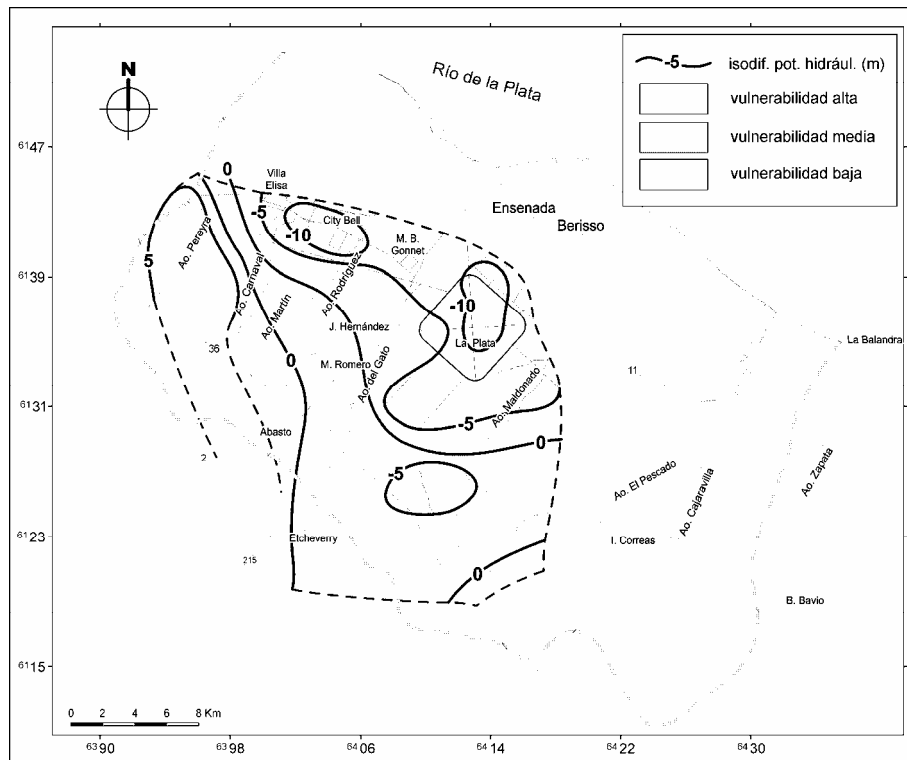
- Monitorear la batería de pozos propuesta, para lo cual será necesario instalar una red de piezómetros, dentro del ámbito en el que se desarrollará el cono de depresión (23.000 ha). La cantidad de piezómetros se estima en 20 y su finalidad será establecer la evolución espacial y temporal del cono generado por el bombeo, para verificar el grado de validez del modelo de simulación empleado en la predicción. Esto permitirá realizar los ajustes que eventualmente resulten necesarios, tanto en los caudales individuales como en el total de la batería.
- Definir una zona de protección para los pozos propuestos, a fin de prohibir en su entorno, la realización de actividades que pudiesen deteriorar la calidad y/o la reserva del Acuífero Puelche.

AGRADECIMIENTO

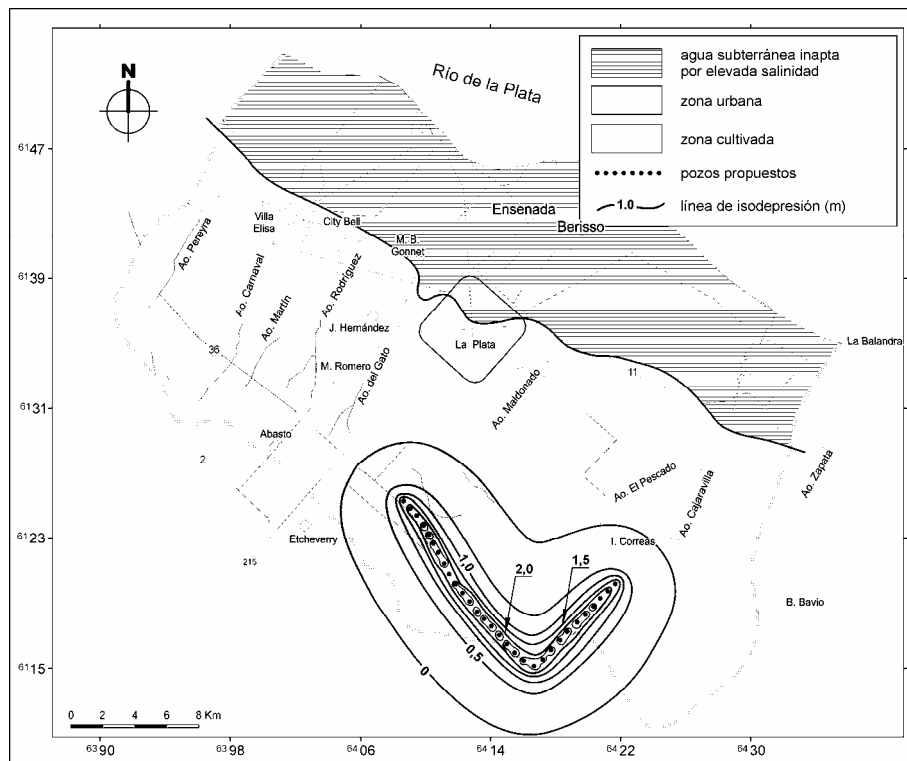
Al D.I. Carlos Sánchez, por la diagramación y el dibujo de los gráficos.

Figura 11

**DIFERENCIA DE POTENCIALES HIDRÁULICOS
VULNERABILIDAD ACUÍFERO PUELCHE**



**PROPUESTA DE EXPLOTACIÓN
ACUÍFERO PUELCHE**



BIBLIOGRAFÍA

Aravena, R. Auge, M.P. Bucich, N. y 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. Proceedings: 323-328. Bratislava.

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. Actas (II): 1019-1041. Buenos Aires - París.

Auge, M.P. 1986. Hydrodynamic Behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River Basin. Ground Water 24 (5): 636-642. Dublin, Ohio.

Auge, M.P. 1990. Aptitud del agua subterránea en La Plata, Argentina. Seminario Latinoamericano de Medio Ambiente y Desarrollo. Actas: 191-201. Bariloche.

Auge, M.P. 1991. Sobreexplotación del Acuífero Puelche en La Plata, Argentina. XXIII International Congress of IAH. Actas: 411-415. Islas Canarias.

Auge, M.P. 1995. Manejo del agua subterránea en La Plata - Argentina. 3 T: 1-149. Inéd. La Plata.

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. Ser. Correlac. Geol. 11: 235-241. Universidad Nacional de Tucumán.

Auge, M.P. y Bucich, N. 1996. Manejo del agua subterránea en La Plata, Argentina. Cuartas Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses. Actas, Vol. 2: 229-237. Universidad Nacional de La Plata.

Auge, M.P. 1997a. Investigación Hidrogeológica de La Plata y Alrededores. Tesis Doctoral # 2947. Universidad de Buenos Aires: 1-165, 58 mapas, 36 tablas, 86 figuras. Inéd. Buenos Aires.

Auge, M.P. 1997b. Piezometría de los acuíferos Pampeano y Puelche en Poblado La Plata – Argentina. Primer Congreso Nacional de Hidrogeología. Actas: 145-152. Bahía Blanca.

Auge, M.P. 2001. Hidrogeología de La Plata – Argentina. Revista Latinoamericana de Hidrogeología. Vol. 1 # 1: 27-40. ISSN 1676-0099. Curitiba.

XVI Congreso Geológico Argentino

- 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. Proceedings. ISBN 987-544-063-9: 624-633. Mar del Plata.
- Auge, M.P. 2003. Vulnerabilidad de Acuíferos. Conceptos y Métodos. E book: 1-38. RedIRIS. Red Académica y Científica de España en Internet. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/vulnerabilidad.html>
- Auge, M.P. Hirata, R. y López Vera, F. 2004. Vulnerabilidad a la Contaminación por Nitratos del Acuífero Puelche en La Plata - Argentina. E book: 1-187. FCEN - UBA. www.gl.fcen.uba.ar/Hidrogeologia/auge/libros.htm Buenos Aires.
- 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. INTA: 1-45. Buenos Aires.
- 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. Proceedings. ISBN 987-544-063-9: 652-659. Mar del Plata.
- Groeber, P. 1945. Las aguas surgentes y semisurgentes del norte de la Provincia de Buenos Aires. Rev. La Ingeniería. XLIX, # 6: 371-387. Buenos Aires.
- 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.