

Evolución hidrodinámica del agua subterránea en el conurbano de Buenos Aires, Argentina

J. N. Santa Cruz y A. A. Silva Busso

Instituto Nacional de Agua, Subsecretaría de Recursos Hídricos.
Autopista Ezeiza-Cañuelas. Tramo J. Newbery Km 1,620, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina
E-mail: pntsas@ina.gov.ar

RESUMEN

La ciudad de Buenos Aires y su región metropolitana forman una de las zonas más densamente pobladas del mundo, con 11,5 millones de habitantes en 3.800 km². Se trata de la mayor zona industrial y de servicios de Argentina. Esta zona se encuentra localizada en la región de la Pampa Húmeda. El nivel freático se encuentra entre unos pocos cm y hasta 5 m bajo la superficie del terreno. Los acuíferos son multicapa, con profundidades de 60-70 m y existe conexión hidráulica entre los acuíferos Puelches y Pampeano. La región se caracteriza por unos importantes conos de depresión, debido a una intensa explotación sostenida durante muchos años. En estos momentos los niveles freáticos se han recuperado. En este trabajo se presentan las causas naturales y antrópicas de esta recuperación.

Palabras clave: aguas subterráneas, Argentina, hidrodinámica, hidrogeología, sobreexplotación

Groundwater evolution of Greater Buenos Aires, Argentina

ABSTRACT

Buenos Aires city and Greater Buenos Aires (also called Buenos Aires Metropolitan Region), conform one of the most numerous and densely populated areas in the world, with 11,5 million inhabitants in about 3800 Km², and is the most important industrial, manufacturing and service center of Argentina. This territory is in the wet Pampa Region. The phreatic aquifer have a water table at few centimeters to 5 m below ground surface. All the aquifers down to about 60-70m beneath the surface constitutes a multiaquifer system with hydraulic connection (Puelches and Pampeano aquifers) this region has been characterized by huge depression cones, due to ground water over-exploitation for many years. At present there is a great recovery of the piezometric levels. The natural and antropic factors responsible are described.

Key words: Argentina, groundwater, hydrodynamic, hydrogeology, intensive exploitation

Introducción y área de estudio

En la región noreste de la Provincia de Buenos Aires, limitada por el estuario del Plata y el Delta del Paraná-Uruguay se encuentra una de las regiones urbanas más extensas del mundo comprendiendo la Ciudad de Buenos Aires y el Gran Buenos Aires con más de 3800 km² y 11,5 millones de habitantes.

Esta región se encuentra en la Unidad Fisiográfica "Pampa Ondulada" que abarca cuencas hídricas que desembocan en el curso inferior del río Paraná y estuario del Plata. La topografía es suave, las máximas alturas se ubican en el sector oeste de esta área sobrepasando escasamente los 100 m de altura s.n.m. Hacia el este las cotas disminuyen hasta alcanzar el nivel del mar. Los valores de precipitación media anual son ligeramente superiores a los 1000 mm anuales y los excesos hídricos cercanos a los 200

mm anuales (Santa Cruz, 1995). Empleando los valores de precipitación mencionados, diversos autores calcularon el porcentaje de infiltración por Thornthwaite, estos valores de infiltración se encuentran entre el 0,57% y 9,44 % de las precipitaciones medias anuales en el NE de la Región de Buenos Aires (Santa Cruz y Silva Busso, 1996). En la región urbana y suburbana los valores de infiltración se encuentran, respectivamente, entre el 0,1%-7,59 % de las precipitaciones medias anuales en el Gran Buenos Aires.

La geomorfología del área está enmascarada y en parte modificada por la gran urbanización y las obras civiles, incluyendo también la red de drenaje que ha sido alterada con la canalización y/o entubado de los cursos de agua. Esto ha modificado en gran parte el funcionamiento natural del sistema en su casi totalidad. La unidad fisiográfica está atravesada por las

cuencas inferiores de los Ríos Matanza, Riachuelo, Reconquista y por pequeñas subcuencas afluentes de vertiente estuárica. En cuanto al drenaje superficial el rumbo predominante es hacia el Este. De acuerdo al comportamiento de las pendientes regionales de la zona, se trata de ríos perennes aunque algunos de sus afluentes pueden ser intermitentes con períodos de agotamiento coincidentes con grandes sequías.

El objetivo de este trabajo es exponer un análisis global de la evolución hidrodinámica de los niveles piezométricos en el Área del Gran Buenos Aires y discutir los factores responsables tanto naturales como antrópicos de dicha evolución.

Geología e hidrogeología de la Región

El área de estudio se encuentra enmarcada en la Subregión Hidrogeológica I Río Paraná (Santa Cruz y Silva Busso, 1999) la misma se extiende desde la Cuenca del Río Salado al sur y sudoeste, hacia el norte hasta al menos el meridiano 33°30' o los bajos submeridionales, al este el Río Paraná y al oeste hasta aproximadamente el paralelo 62°30'.

Los principales acuíferos de esta región se caracterizan por la siguiente estratigrafía e hidroestratigrafía:

Estratigrafía	Hidroestratigrafía	Acuíferos Principales
Sed. Pampeanos	Epiparaneano	Acuífero Pampeano
Formación Puelches	Epiparaneano	Acuífero Puelches
Formación Paraná	Paraneano	Acuífero Paraná
Formaciones Olivos, Mariano Boedo	Hipoparaneano	Acuitardo
Basamento Cristalino	Basme. Hidrogeol	Acuífugo

La Sección Epiparaneana es la tercera sección acuifera que por su accesibilidad resulta la más explorada. El agua subterránea explotable de estas áreas se encuentra alojada fundamentalmente en los Sedimentos Pampeanos y en la Formación Puelches (en las zonas más bajas puede incluir unidades formacionales post-pampeanas) con profundidades

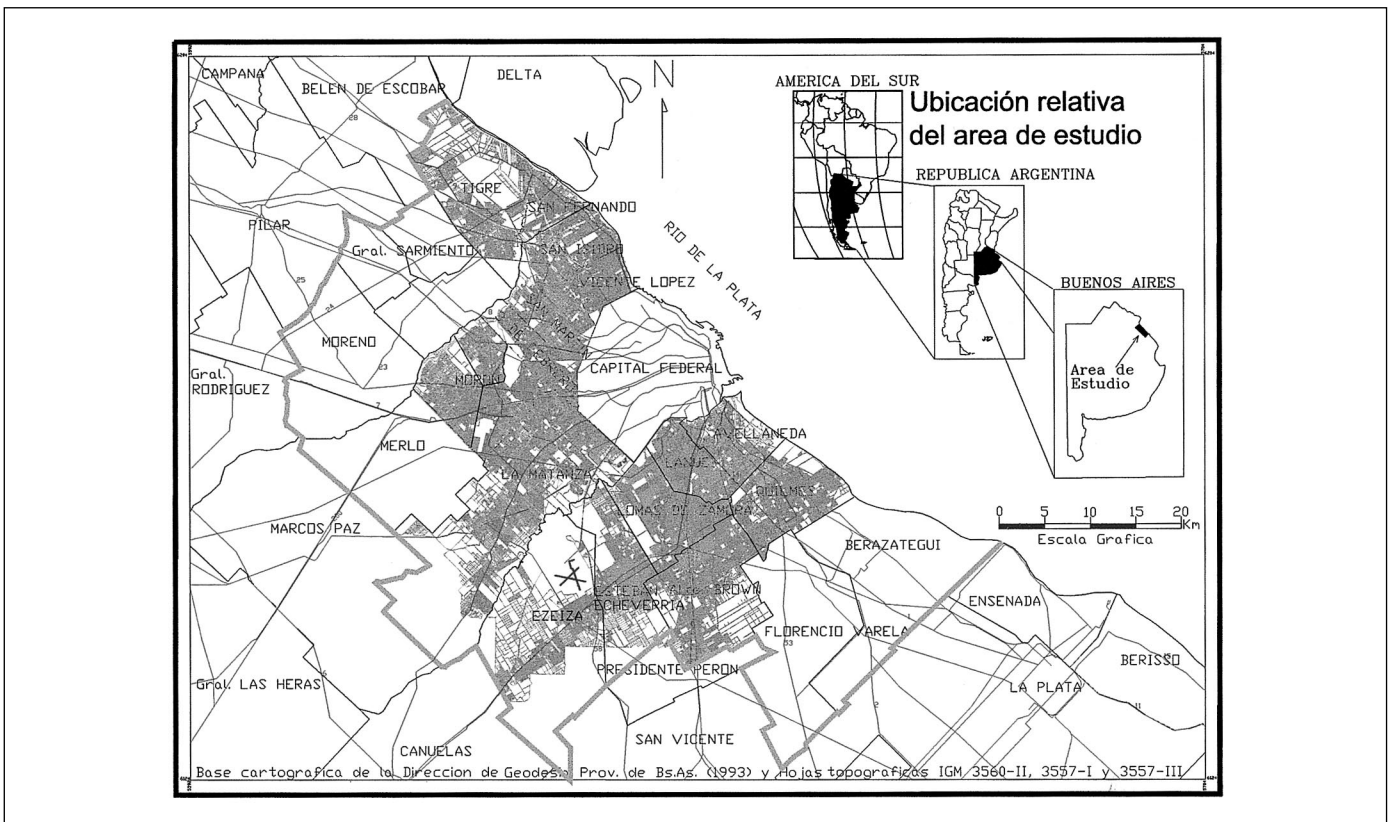


Fig. 1. Ubicación del Área de estudio
Fig. 1. Location of the study area

máximas del orden de los 70 metros. El acuífero freático es el que en condiciones naturales se halla más cerca de la superficie en equilibrio con la presión atmosférica y que se alimenta directa o indirectamente del agua de lluvias que se infiltran.

Por debajo se encuentran otros acuíferos más profundos (Acuíferos Pampeano y Puelches), que por tratarse de acuíferos multicapa de llanura están todos hidráulicamente conectados. O sea, que si se explota sólo el más profundo (Acuífero Puelches), también va a repercutir bajando el nivel freático o "arrastrando" la depresión del mismo. A la inversa, si se extrae agua de la freática va a llegar un momento en que un acuífero más profundo va a aportar agua hacia arriba disminuyendo su nivel piezométrico, o sea la presión (CFI-EASNE, 1972; Hernández, 1975; Santa Cruz, 1996).

Los Sedimentos Pampeanos poseen una porosidad efectiva del 10%, permeabilidad 5 a 10m/d, transmisividad 100m²/d a 200m²/d, coef. de almacenamiento del orden de 10⁻³, caudales específicos más comunes de 1 a 3 m³/h, caudales obtenibles más comunes entre 40 y 100 m³/h, caudales máximos sin garantía de sustentabilidad hasta 150 m³/h. El espesor que pueden alcanzar los Sedimentos Pampeanos varía entre los 20 y 60 m (Santa Cruz y Silva Busso, 1996)

El Acuífero Puelches presenta una porosidad efectiva de hasta 20 %, permeabilidad de hasta 25 m/d, transmisividad entre 300-500 m²/d, coef. de almacenamiento del orden 10⁻³ e incluso 10⁻⁴, caudales específicos más comunes: entre 3 y 11m³/h (Sala y Auge, 1970; CFI-EASNE, 1972; Hernández, 1975; Santa Cruz *et al.*, 1996).

Evolución histórica de desarrollo agropecuario y uso de agua subterránea

La región pampeana se caracteriza por ciclos climáticos húmedos y secos, y por lo tanto la ciudad de Buenos Aires y su campaña históricamente han condicionado el uso del agua superficial y subterránea a esta contingencia. Desde los tiempos de su fundación, a fines del siglo XVI, el aprovisionamiento de agua para consumo humano y particularmente la ganadería ha sido un tema de constante preocupación de los habitantes y las autoridades.

La historia de la explotación del agua superficial y subterránea en la región del Gran Buenos Aires se relaciona, en principio, con la actividad pecuaria. La explotación ganadera durante los siglos XVI, XVII y primera mitad del XVIII constituía principalmente en el sistema de "vaquerías" que consiste en la búsqueda

de ganado salvaje en la pradera con el objeto de obtener su cuero, único artículo de valor comercial durante aquel tiempo, ya que la agricultura sólo se practicaba en pequeñas plantaciones y no fue considerada una posibilidad económica a gran escala hasta fines del siglo XIX (Giberti, 1974).

El sistema de "vaquerías" implicaba reunir una gran cantidad de cabezas de ganado en áreas cercanas a la ciudad de Buenos Aires que permitan abreviar a los animales. El ganado bovino en pie consume, en la región pampeana, alrededor de 40 litros/día de agua (20 litros/día el ovino y equino respectivamente) y un número entre 50000-100000 cabezas por temporada constituye una demanda de agua importante, sobre todo en tiempos de sequía.

A este respecto, ya desde el señalamiento de las tierras durante la fundación de la ciudad; Don Juan de Garay (su segundo fundador en 1580) distribuye las "suertes de estancia" perpendiculares a los ríos afluentes del Estuario del Plata (no en el) de unas 3000 varas (2100 metros) sobre su cauce para permitir abreviar al ganado. Además se aprovechaban los meandros naturales de los ríos donde se reunía al ganado, conociéndolo con el nombre de rinconadas (Sbarra, 1973). El consumo humano se suplía a partir de dos fuentes: la primera es el empleo del agua tomada del Estuario del Plata, que si bien es dulce, su calidad depende de las condiciones climáticas y mareas y posee una turbidez elevada para ser empleada directamente como agua de bebida. La segunda era el uso de aljibes que retenían el agua de lluvia y lo almacenaban en cisternas durante gran parte del año, un método típico de regiones áridas empleado en una zona húmeda con déficit estacionales.

El uso ganadero del agua superficial no fue suficiente durante los períodos de sequía que se fueron sucediendo a lo largo de los siglos XVII y XVIII. Las repetidas sequías y mortandad de animales de la región determinaron que el cabildo de Buenos Aires obligara en 1788 a los hacendados a realizar aguadas artificiales en las estancias perimetrales (área que en gran medida es actualmente el Gran Buenos Aires). Esta es la primera referencia al uso de agua subterránea y en particular al acuífero freático en la región, y el propósito de su uso pecuario bovino, ya que la planta urbana se abastecía en aquellos días con el agua del Estuario o bien la acumulada por precipitaciones. Es evidente que la creación de aguadas artificiales con conexión al nivel freático no fueron suficientes para sostener el consumo de agua del ganado, para lo cual se construyeron mecanismos de extracción muy rudimentarios. La primera mención de dichos métodos la realiza Félix de Azara (1794) diciendo textualmente "Carecen estos campos de

agua, que aún para los animales se saca de pozos haciendo tirar la vasija o balde de cuero por un caballo" hace referencia al más primitivo de los dispositivos llamado "pelota" y consiste simplemente en un balde semiesférico de cuero de vacuno con un extremo abierto por un aro de madera dura. El mismo se sumergía en la excavación y permitía, con el auxilio de dos hombres y un caballo, extraer un volumen de agua cercano a 1-1,5 m³ (Sbarra, 1973). Una modificación posterior a este dispositivo se denominaba "balde sin fondo", diseñado por Lanusa en 1827, estaba inspirado en el balde y se fabricaba una manga de cuero de potro de 4 metros de largo que se sumergía en los pozos y volcaba el agua en una canleta. Su volumen era mayor que el balde y se ha medido un caudal cercano a los 122 pies³ en 45 minutos (Romero, 1827) o sea entre 3 y 5 m³/h. También llamado "manga" cuando se fijaba uno de sus extremos al brocal del pozo permitía extraer agua de captaciones de 5 ó 6 metros de profundidad. Frecuentemente las excavaciones de extracción de agua aprovechaban las depresiones naturales llamadas "jagüeles" que naturalmente y sobre todo en las zonas bajas tenían conexión con los niveles freáticos. En las mismas se instalaba un dispositivo que recibía el nombre de "cigüeña" que consistía en un larguero de madera que con un balde en un extremo y un contrapeso en la otra levantaba el agua del jagüel de no más de 2 metros de profundidad. Este dispositivo permitía abastecer entre 2500 y 4000 bovinos en 12 horas (Newton y Jurado, 1878) o sea una extracción entre 8-14 m³/h.

Es importante mencionar que estos dispositivos (en particular la manga) estuvieron en uso hasta fines de siglo XIX y fueron los métodos frecuentes de extracción de agua; funcionando todo el día extraían entre 3-5 m³/h de las captaciones. Sin embargo estos rudimentarios métodos no eran del todo eficaces en su cometido, Darwin (1833) menciona que las pérdidas de ganado en la provincia de Buenos Aires alcanzaron el millón de cabezas durante la sequía de 1826-27. No sólo el ganado bovino se ve perjudicado por la sequía Azara (1794) describe que durante la sequía de 1791 lo siguiente "Estando en Paraguay supe que, sin que hubieran reinado ningún viento de estos (del oeste) el agua bajó de tal manera que dejó al descubierto tres leguas (cerca de 15 km) de playa en Buenos Aires, que se mantuvo en este estado durante un día, y que ganó de nuevo su nivel ordinario, pero poco a poco" Esto dificultó el acarreo de agua ya que las carretas debían adentrarse varios kilómetros demorándose y provocando el desabastecimiento.

Estos acontecimientos fueron motivo de permanentes búsquedas para dar una solución más definiti-

va al problema de abastecimiento urbano y pecuario. El primer intento de perforación de "pozos artesianos" en la Ciudad de Buenos Aires fue realizado en 1824 por Bevans, alcanzando los 12,5 metros hasta desmoronarse sin llegar al nivel freático probablemente debido a que se realizó en una de las zonas más altas de la ciudad a 25 ms.n.m. durante un año seco. Después del ocasional intento de Bevans y hacia mediados del siglo XIX, la manga y el balde seguían siendo los mecanismos de extracción comunes en la ciudad y la campaña, si bien se habían realizado algunas mejoras reemplazando el cuero por el hierro, el abastecimiento urbano era todavía muy diverso, compuesto por pozos excavados, aljibes y agua que se acarrea del Estuario trasportándola en carretas hasta los hogares. A tal punto que las primeras propuestas de una red de suministro de agua y planta de clarificación fueron formuladas en 1859 (Sbarra, 1973) las cuales fracasaron dada la precariedad de los métodos de extracción.

Para el ingeniero Sourdeaux (1862), la forma de garantizar una buena provisión de agua clara y segura era a partir del aprovechamiento de los "pozos artesianos" que hasta el momento no constaban de alumbramiento en el país. Para tal fin realizó una serie de sondeos, con herramientas modernas para su época, en distintas zonas del Gran Buenos Aires. Después de un primer retraso en la propia ciudad de Buenos Aires (pozo La Piedad como dio en llamarse), perfora con éxito en la vecina localidad de Avellaneda, en la cuenca baja del Río Matanza Riachuelo y a 300 metros de su cauce. Este realiza un pozo de 92 varas de profundidad (aprox. 65 mb.b.p.) alumbrando las buscadas y controvertidas "aguas surgentes". El Acuífero Puelches, naturalmente y en zonas bajas, posee semisurgencia o surgencia topográfica de poca presión como ocurre actualmente en la planicie de inundación del Río Luján; estas fueron las características del alumbramiento de la perforación de Sourdeaux, donde además el agua era salobre, pero constituía la primera posibilidad real de aprovechamiento sistemático del agua subterránea.

Debe tenerse en cuenta que la expansión de ferrocarril dependía en gran medida de la provisión de agua clara y dulce para las locomotoras y fue en verdad, gracias a este, que se realizó el primer servicio de aguas corrientes en Buenos Aires abastecido por un "pozo artesiano" transportando agua a través de una modesta red de 8 km a la cual se conectaron las viviendas cercanas a su traza.

A pesar de ello, en la ciudad de Buenos Aires la provisión de agua era tan irregular como la eliminación de excretas humanas. Del censo de 1870 y luego de la epidemia de fiebre amarilla (1870-71) se conoce

que de las 30313 viviendas existentes en la ciudad contaba con 8000 que ya tenían servicio de agua corriente de red, a partir de los "pozos artesianos" de la ciudad, 3346 poseían aljibe, pozo excavado y aljibe 1668 y pozo excavado solamente 14685 y sin provisión de agua 2517 (Sbarra, 1973). Estos últimos dependían del acarreo de agua del estuario, por lo tanto a fines del siglo XIX sólo el 8,3% se abastecía de agua superficial solamente, un 5,5% combinaba el abastecimientos de pozos y aguas de lluvia y el 86,2% se abastecía de aguas subterráneas. La ciudad con 400000 habitantes no poseía servicio de cloacas para eliminación de excretas, lo que favoreció la propagación de la epidemia de 1870-71, dado que la primera cloaca máxima data de 1871-85. Esta demanda era solamente urbana y sin contar el abastecimiento de ganado que se concentraba en el perímetro urbano hoy Gran Buenos Aires.

Las perforaciones se sucedieron rápidamente en Buenos Aires ciudad y la campaña. Sourdeaux (1864) detalla valores de producción de sus pozos surgentes citando en la ciudad de Buenos Aires, en planicie de inundación del Riachuelo-Matanza, caudales surgentes entre 12-14 m³/h sin variación y en la localidad del Tuyú, 100 kilómetros al sur de Buenos Aires hasta 20 m³/h. Hacia 1882 una perforación en la ciudad de Buenos Aires, cercana al cauce del Arroyo Maldonado hoy entubado en su totalidad, hace referencia a un caudal de 200 m³/h (Sbarra, 1973) aunque no se menciona, sin duda se empleo algún mecanismo de bombeo artificial, sin embargo si menciona una "inagotable corriente de agua" entre 45-60 metros de profundidad, que corresponde a las cotas del Acuífero Puelches.

La existencia o alumbramiento de agua subterránea fue una condición necesaria en el desarrollo del abastecimiento urbano y pecuario, pero hacia el final de siglo XIX la llegada del sistema de bombeo empleando un molino eólico de tipo americano fue indispensable para hacer a la extracción de agua subterránea económicamente rentable en las áreas ganaderas y la expansión ferrocarrilera. En las zonas urbanas, el abastecimiento con agua subterránea siguió siendo porcentualmente importante al menos hasta 1928 cuando se inaugura la primera planta de clarificación de agua del Estuario del Plata y el suministro con agua superficial fue ocupando un porcentaje creciente en el servicio público.

A partir del estudio de Randle (1971) se empleó la población pecuaria a fines del siglo XIX (en base al censo de 1895) y el consumo de agua pecuario (bovinos, ovinos y equinos). Esto permitió estimar la demanda de agua de la ganadería en la zona del Gran Buenos Aires. El consumo humano se calculó a partir

de la población de Buenos Aires según el mismo censo. Los valores estimados de consumo pecuario alcanzan los 23,7 Hm³/año y el consumo humano en la ciudad de Buenos Aires es del orden de 25,11 Hm³/año, en total la demanda es cercana a los 48,8 Hm³/año. El área de estudio, en 1895, sólo estaba urbanizada en un 5% de la actual, por lo tanto el resto de la región infiltraba agua en condiciones naturales. Considerando una infiltración del orden del 10% de las precipitaciones (Sala y Auge, 1970: EASNE, 1972; Sala *et al.*, 1983) el volumen de recarga anual es de 210 Hm³/año. Como puede deducirse la demanda de agua constituye aproximadamente el 20% de las reservas reguladoras de la región, por lo tanto aún no existía su sobreexplotación regional. En base a este criterio, los escasos datos de perforaciones de fines del siglo pasado y la hidrodinámica natural de los acuíferos la región pampeana presentamos en la Fig. 2 una reconstrucción de la tendencia piezométrica de la Sección Epiparaneana hacia finales del siglo XIX.

La misma se elaboró en base a pocos datos piezométricos y considerando que los niveles freáticos están relacionados con la topografía, el área de surgencia en las zonas más bajas es observable actualmente en la cuenca del Río Luján, por ejemplo, tratándose de una cuenca cercana.

Este diseño de la red de drenaje subterráneo es característico de la región Pampeana húmeda y en particular del NE de Buenos Aires (Santa Cruz, 1986; Santa Cruz y Silva Busso, 1996) en regiones sin perturbación antrópica por explotación intensiva de acuíferos.

Desarrollo urbano e industrial y uso del agua subterránea durante el siglo XX

La zona del Gran Buenos Aires de la República Argentina que incluye la Capital Federal y diecinueve (19) distritos constituye uno de los conglomerados urbanos más densos del mundo. Por esta razón el agua subterránea es de gran importancia ya que históricamente ha constituido un porcentaje importante del abastecimiento público y es la única fuente de abastecimiento en las áreas sin cobertura de la red de agua. En la Argentina, el agua subterránea es de dominio público (propiedad de los estados provinciales). El abastecimiento del agua potable de la región considerada se realiza a través de empresas concesionarias privadas por un largo período, y regulada por un ente estatal donde participan las distintas jurisdicciones.

La industria en la Argentina se desarrolló, en prin-

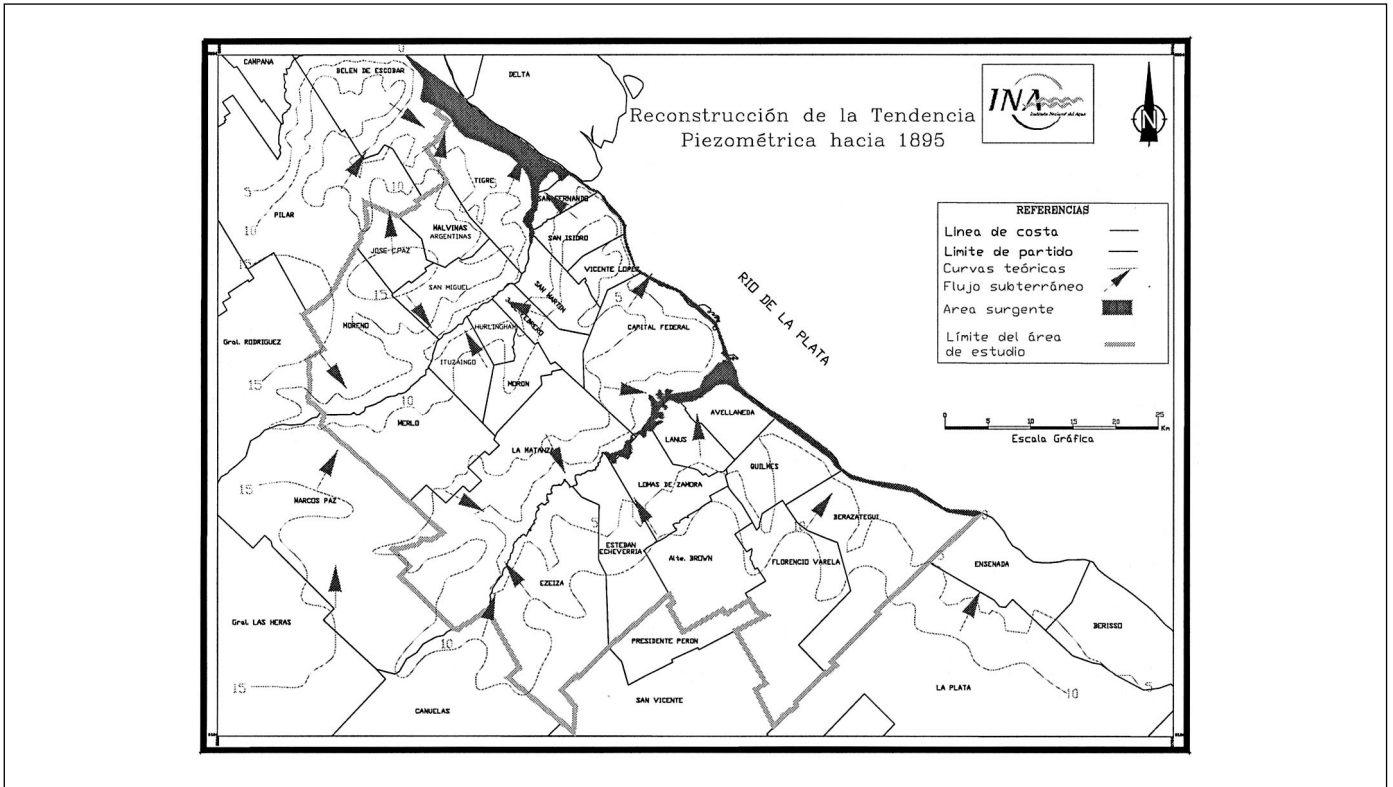


Fig. 2. Reconstrucción de la tendencia piezométrica sección epiparaneana hacia 1895
 Fig. 2. Reconstruction of the piezometric trend of the Epiparaneana section around 1895

cipio, en las zonas de mayor densidad demográfica ya que ello le ofrecía una adecuada concentración de población activa a emplear, y ésta estaba en el Gran Buenos Aires. La distribución no uniforme de la industria en la región se advierte ya hacia mediados de la década de 1930 donde en el Gran Buenos Aires comprende la zona más industrializada comprendiendo especialmente las regiones al sur y al oeste del distrito federal (ciudades de Avellaneda, Lanús, Lomas de Zamora, Quilmes, San Martín, Morón y La Matanza todas ellas perimetrales a la Ciudad de Buenos Aires). Esto alcanzó los picos más altos de actividad en dicha década, y disminuyendo paulatinamente hacia mediados del siglo XX al ir desconcentrándose hacia otros puntos del país la radicación de industrias. Según los datos del censo de 1954, referido a la cantidad de industrias y el consumo medio de agua subterránea por industria, se estimó la demanda industrial de agua subterránea. Como no existe un censo discriminado por industrias y consumos de agua subterránea, se optó por calcular un volumen medio de explotación unitario en base a las industrias censadas en el año 1992. Dicho valor es orientativo y se asume que las asimetrías en los volúmenes de

explotación por diferentes industrias están homogenizados a un valor único. Esta es una limitante importante en el cálculo final ya que no tiene comprobación inmediata, además la ausencia de datos hidrogeológicos y la intensa perturbación del régimen hidrodinámico natural impiden reconstruir una piezometría adecuada para este periodo. Considerando las 20526 industrias de la región a fines de la década de 1930 con un consumo medio de 0,06 Hm³/año por establecimiento industrial y considerando que sólo el 35% utilizarían exclusivamente agua subterránea, el resultado es un consumo anual de 450 Hm³/año. El aumento de urbanización cercano al 40% de la superficie reduce el área de infiltración regional con un valor estimado de recarga por precipitaciones cercano a los 130 H³/año. Es evidente que el consumo industrial, sin involucrar el consumo humano, es suficiente para que la demanda de agua supere las reservas reguladoras.

Así pues, entre la década de 1940 hasta 1980 se explotó el agua subterránea del Gran Buenos Aires en forma muy intensa, extrayéndose más agua de la que podía reponer el ciclo hidrológico natural de la región. De esta forma se desarrollaron los grandes

conos de depresión que alcanzaron, durante ese período, dimensiones regionales. Además, los acuíferos, y en particular el acuífero libre, han estado sometidos a un deterioro químico y macroorganismos patógenos, contaminación por nitratos, diversos contaminantes industriales, hidrocarburos, y además, la sobreexplotación provocó el avance de la intrusión salina desde las áreas bajas del estuario.

Entre 1947 y 1991 el territorio de estudio pasa de 4,7 a 11,5 millones de habitantes, lo que supone un incremento de 240% de la población. Por otro lado, como se mencionó, se desarrollaron casi todas las industrias básicas sin una planificación adecuada del uso del territorio, y sin servicios sanitarios básicos (agua potable y cloacas). Esto dio lugar a las explotaciones intensivas del agua subterránea con destino a consumo humano e industrial especialmente, ya sea con pozos domiciliarios de/y alimentación a la red pública, y la contaminación de los acuíferos por falta de desagües cloacales y eliminación de efluentes industriales sin tratar a los cursos de agua. En el Gran Buenos Aires los servicios de agua corriente de red evolucionaron de 1980 a 1991 (11 años) de un 49,5% al 54,9% de la población en tanto que la red cloacal pasó de un 27,9% de la población al 30,4%. A partir de 1993 comienza un activo incremento en la extensión de la red pública de agua potable en varios partidos del Gran Buenos Aires.

En 1995 el World Bank report 14070-AR, consideró que la contaminación del agua subterránea en el Gran Buenos Aires, era el mayor problema de contaminación en la Argentina originado principalmente por la falta de redes cloacales domiciliarios y disposición de efluentes industriales sin tratamiento.

Evolución hidrodinámica de la sección epiparanaeana

Como se ha expuesto el área geográfica de la Capital Federal y Conurbano Bonaerense ha presentado durante el pasado siglo una gran variabilidad en el uso y demanda del recurso hídrico subterráneo. La actividad industrial y su evolución durante los últimos 50 años es un aspecto de importancia en el análisis de la problemática del agua subterránea en el conurbano bonaerense. La evolución de la urbanización y la distribución de las redes de servicio domiciliario (cloacas y agua potable) constituyen también otro aspecto relevante de este análisis. La extensión de la urbanización ha sido uno de los procesos de modificación de uso de los recursos más importantes en magnitud dado que Buenos Aires y su cordón urbano constituyen una de las aglomeraciones de población más importantes y grandes del mundo.

Desde la década del 40 (del siglo pasado) hasta aproximadamente el año 1991, se explotó el agua subterránea de gran parte del Conurbano Bonaerense en forma muy intensa, extrayéndose más agua que la que podía reponer el ciclo hidrológico en forma natural.

Los mapas piezométricos representados en este estudio representan cuatro etapas de explotación y corresponden a los niveles piezométricos de los períodos que incluye la reconstrucción piezométrica de fines del siglo XIX expuesta anteriormente, la piezometría de fines de la década de 1960 (CFI-EASNE., 1972), fines de la década de 1970 (Hernández, 1978), principios de la década de 1990 (Santa Cruz *et al.*, 1996) y por último el mapa piezométrico actual para el año 2001.

El Estudio realizado por CFI-EASNE, (1972) fue realizado a partir de la información tomada durante la década del 60 y constituye el primer estudio sistemático que evalúa la hidrodinámica del sistema acuífero de la Sección Epiparanaeana en la región del Gran Buenos Aires. En particular se analizaron los Acuíferos Pampeano (Epipelches) y Acuífero Puelches.

La piezometría del Acuífero Pampeano (Fig. 3) muestra que las líneas de flujo poseen un gradiente medio de 1.10^{-3} Km/m y una dirección regional de flujo oeste-este aproximadamente, descargando hacia la terraza baja del Estuario del Plata. Más localmente las líneas de flujo descargan en las zonas bajas y planicies de inundación de los principales ríos que vierten en el estuario. Se observa también en el mapa las áreas anegadas donde descarga la freática que confirman esta característica.

Sin embargo, la piezometría del Acuífero Puelches para el mismo período (Fig. 4) presenta algunas zonas con depresiones de sus niveles piezométricos consecuentes de la coalescencia regional, de conos de depresión por bombeo (del orden de 10 a 15 metros de ápice con respecto a la piezometría del Acuífero Pampeano).

El gradiente hidráulico medio es similar al del Acuífero Pampeano en las áreas sin afectación, pero en la zona de coalescencia de conos es del orden de 5.10^{-3} pudiendo llegar incluso a aventajarla en un orden. Las líneas de flujo regionales son de rumbo oeste-este, excepto en las áreas de explotación que se dirigen hacia los conos.

En condiciones normales de flujo los Acuíferos Pampeano y Puelches tienen igual piezometría o pequeñas diferencias que no superan el metro, por tratarse de acuíferos multicapa poseen suficiente conexión hidráulica para que los niveles piezométricos del Acuífero Pampeano (superior) se vean afecta-

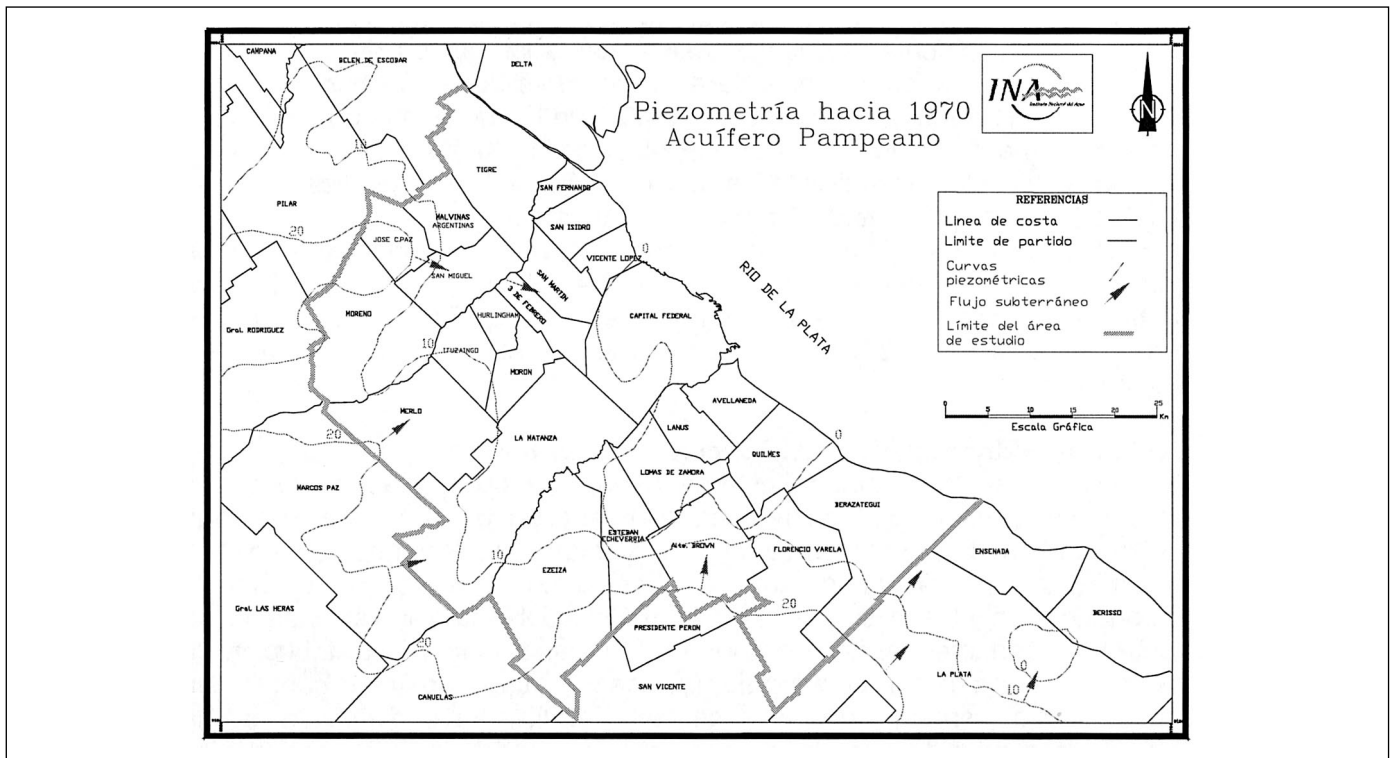


Fig. 3. Piezometría del Acuífero Pampeano (CFI-EASNE, 1972)
Fig. 3. Piezometry of the Pampeano Aquifer

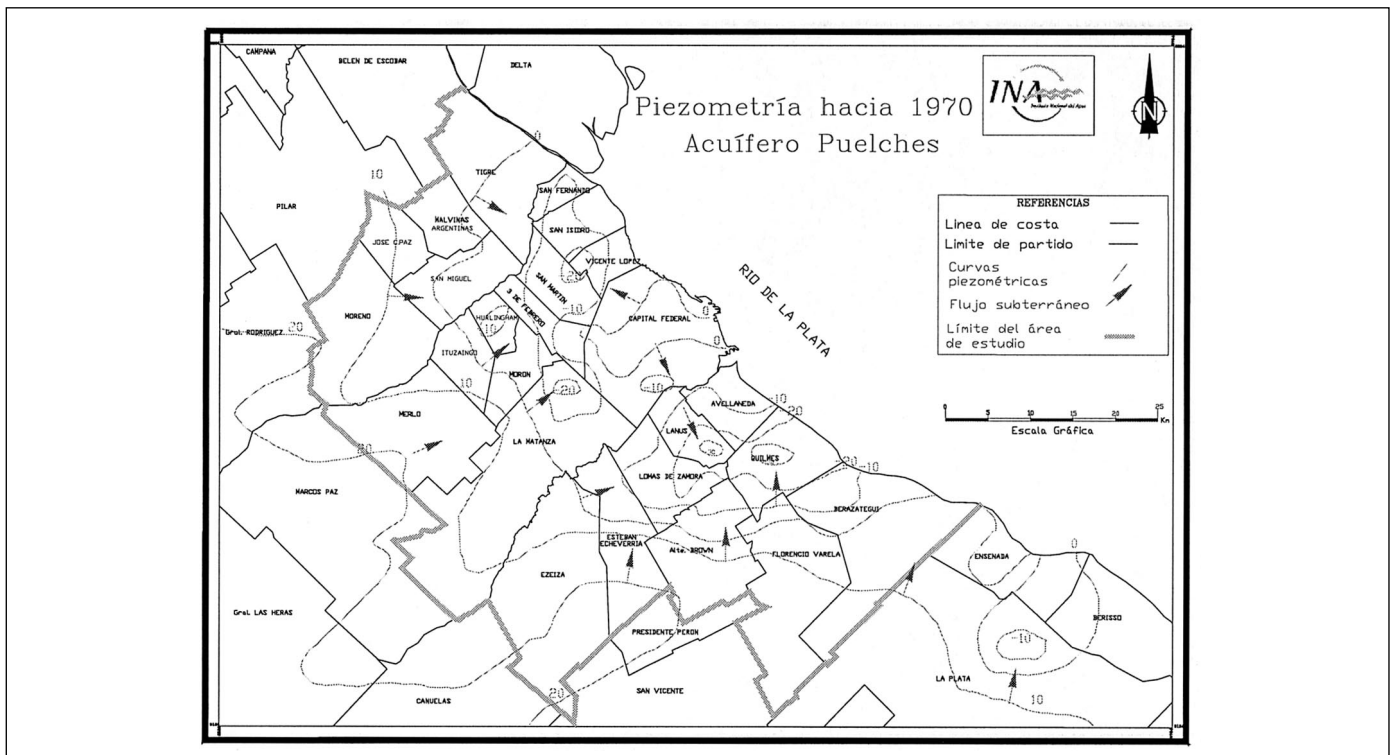


Fig. 4. Piezometría del Acuífero Puelches (CFI-EASNE, 1972)
Fig. 4. Piezometry of the Puelches Aquifer (CFI-EASNE, 1972)

dos por las depresiones de niveles en el Acuífero Puelches (inferior). En esta primera etapa de la explotación, entonces, se generaron los primeros conos regionales que por el momento sólo afectaban al Acuífero Puelches y casi no afectaban al Acuífero Pampeano.

A partir de esta primera etapa de explotación intensiva los conos se desarrollaron y profundizaron conjuntamente con el aumento de la demanda de agua hasta la formación de grandes conos de depresión regionales.

Estos conos poseían conexión hidráulica e inclusive alcanzaron a afectar y deprimir el Acuífero Pampeano y los niveles freáticos por efecto de la sobreexplotación del Acuífero Puelches (efecto cascada) En muchas zonas del Gran Buenos Aires la gran profundidad que tenía el nivel freático afectó zonas industriales muy extensas. Hernández (1978) realiza un relevamiento piezométrico de la región y presenta la piezometría en la Fig. 5.

Este estudio recopila información de los niveles piezométricos durante las décadas de 1960 y 70 observándose hacia principios de 1980 importantes fenómenos de depresión regional.

La sobreexplotación produjo efectos tan notorios como la inversión de la red de flujo natural que escu-

rría hacia el Estuario del Plata, produciéndose el efecto contrario, es decir el flujo se movilizó desde la costa hacia el interior del Gran Buenos Aires. Por otra parte la consecuencia lógica fue el avance de la interfaz de agua salobre/dulce desde la costa hacia el interior. Este último factor consecuencia de la profundización de los conos de depresión en algunas zonas costeras provocó un avance de la interfaz de varios kilómetros. La infiltración vertical descendente del Acuífero Pampeano (y freática) hasta el ápice de los conos de depresión en el Acuífero Puelches hasta el agotamiento del primero, fue una de las características más importantes de los procesos de sobreexplotación.

Debe por último incluirse el cambio de régimen de los arroyos que surcan el Gran Buenos Aires, que de ser originalmente receptores de los aportes de la descarga acuífera invirtieron su régimen y aportan agua al acuífero deprimido, con el consiguiente riesgo de migración de contaminantes hacia el acuífero (Santa Cruz *et al.*, 1996).

Aproximadamente a principios de la década de 1990 se comienza a evidenciar una lenta recuperación de esos conos regionales (Santa Cruz, *et al.*, 1996), o sea que ascendían los niveles piezométricos en los Acuíferos Puelches y Pampeano que conforman la

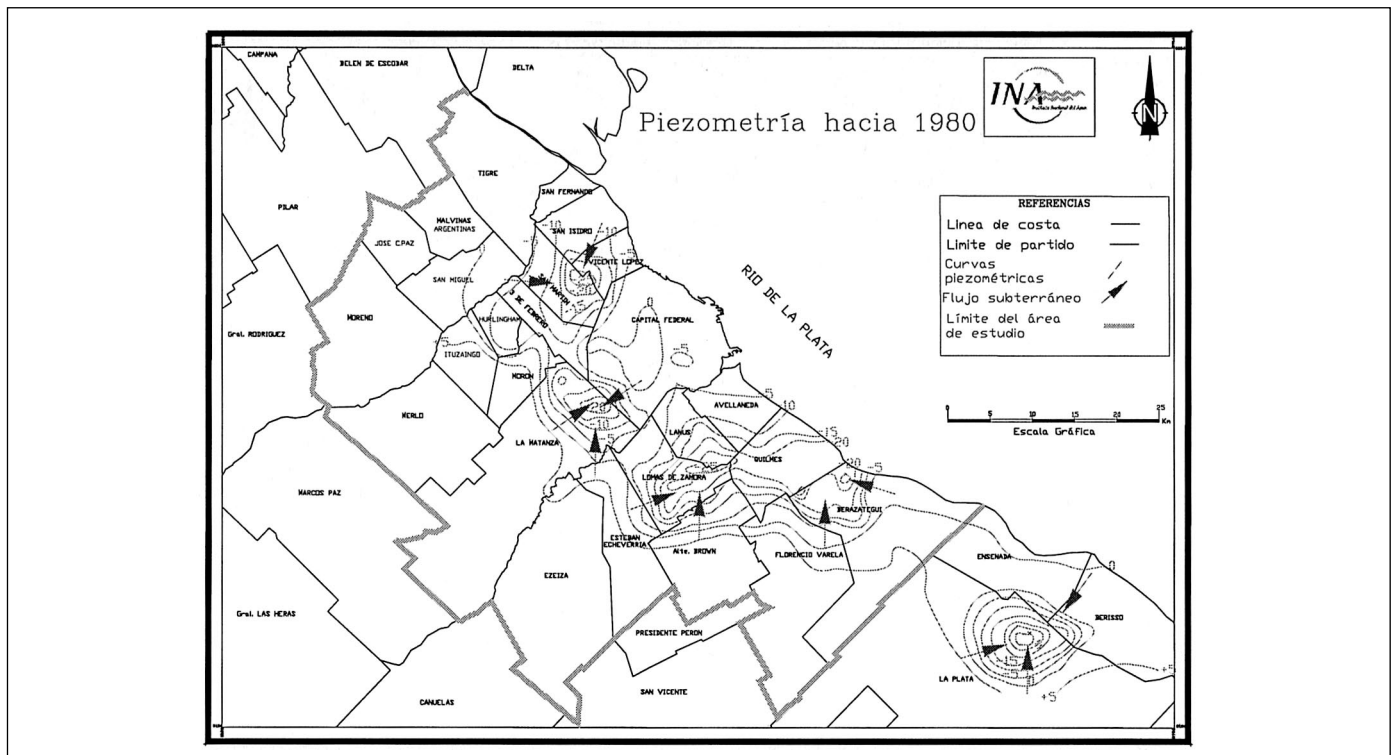


Fig. 5. Piezometría del Acuífero Puelches hacia 1980 (Hernández, 1978 tomada de Santa Cruz *et al.*, 1996)
 Fig. 5. Piezometry of the Puelches Aquifer around 1980 (Hernández, 1978 after Santa Cruz *et al.*, 1996)

Sección Epiparaneana. Su conexión hidráulica permite considerar que es más adecuado evaluar la hidrodinámica del sistema acuífero multicapa en toda la Sección Epiparaneana. En base a la misma, Santa Cruz *et al.* (1996) presentan la piezometría de la Fig. 6.

El mapa actual correspondiente a la piezometría del 2001 (Fig. 7) se ha construido a partir de la interpolación de aproximadamente 500 puntos de medición de diferentes fuentes, datos de municipios, y estudios parciales en áreas del conurbano.

Como criterios impuestos se asignó a la línea de costa un valor piezométrico de 0 m.s.n.m. en todo el Gran Buenos Aires, y en la Cuenca del Matanza se empleó la cota de 2,5 como línea de control de la piezometría de 1 m.s.n.m. debido a que la ausencia de datos específicos.

Por último, se emplearon datos de años previos en las zonas sometidas a bombeos intensos con importantes conos de depresión, y también a consecuencia de la falta de información en dichas zonas.

En el mapa piezométrico actual se observa claramente una recuperación regional importante con una reducción notable de las áreas de depresión, ápices más someros incluyendo la restitución de la red de flujo subterráneo hacia descarga natural presentándose claramente en las Cuencas de los Ríos Matanza

y Reconquista. El área de interpolación piezométrica comprende al Conurbano Bonaerense y la piezometría es representativa del Acuífero Puelches, aunque en este estudio la consideraremos válido para toda la Sección Epiparaneana.

Hacia fines de la década del 90 la recuperación ya era total en casi todas las áreas y el agua subterránea se encontraba a pocos centímetros del nivel del suelo en muchos barrios y sectores.

Consideraciones sobre los factores intervinientes en un balance hídrico de la región del Gran Buenos Aires

La evaluación de factores conducentes a un balance detallado de la explotación y su posterior recuperación en la región del Gran Buenos Aires requiere que la información existente sea más amplia y específica de lo que se dispone registro actualmente. Además el conjunto de factores naturales y antrópicos que han intervenido en la historia de la evolución de los niveles piezométricos ha sido muy variable y en la mayoría de los casos se desconoce su intensidad y magnitud a lo largo del tiempo.

Diversos autores han estudiado el problema de las

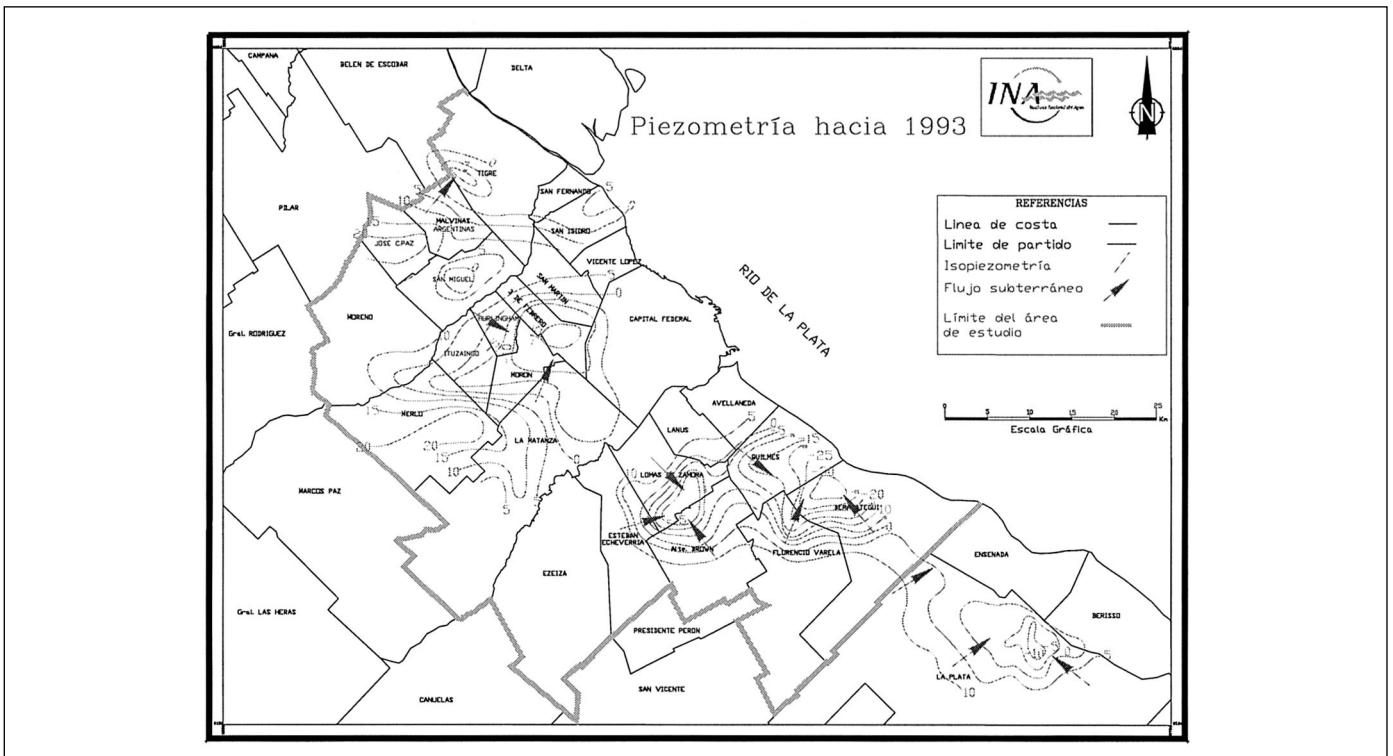


Fig. 6. Piezometría de la Sección Epiparaneana hacia 1993 (Santa Cruz *et al.*, 1996)

Fig. 6. Piezometry of the Epiparaneana section around 1973 (Santa Cruz *et al.*, 1996)

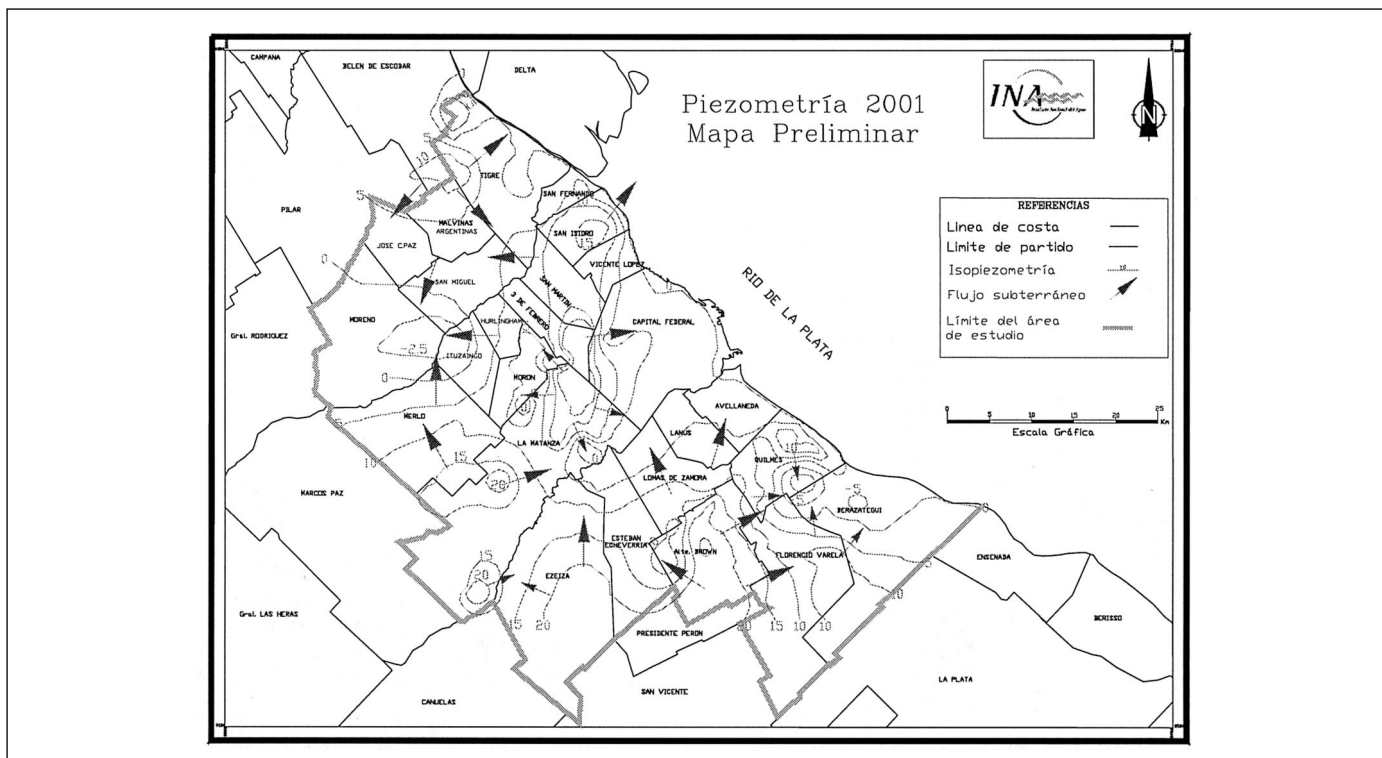


Fig. 7. Piezometría de la Sección Epiparanenana en el 2001
 Fig. 7. Piezometry of the Epiparanenana section in 2001

elevaciones de los niveles freáticos en la Región Pampeana, pero en las áreas agropecuarias se identifica más claramente la relación entre precipitaciones y niveles freáticos, Giai (2000) menciona incrementos del orden de 4 metros en la región más seca de la pampa, casi 800 Km al oeste de Buenos Aires. Según Santa Cruz y Silva Busso (2002) existe correlación entre el exceso hídrico y el incremento de los niveles freáticos a lo largo de la década de 1990 en el oeste de la provincia de Buenos Aires, en el estudio de Paoli *et al.* (2000) se determina la relación de este incremento con el anegamiento de la misma región. En áreas urbanas Vázquez-Suñe, *et al.* (2001) propone para la ciudad de Barcelona, España, tener en cuenta en el análisis de elevación piezométrica la interrelación con el desarrollo socioeconómico y urbanístico de la ciudad. En particular propone evaluar las infraestructuras urbanas, redes de abastecimiento, alcantarillado, túneles subterráneos integrar datos desde al menos principios de siglo XX. Además propone que un modelo de este tipo debe basarse en una serie de criterios naturales y antrópicos.

El Gran Buenos Aires comprende una región densamente poblada en la que se ha desarrollado a lo largo del siglo XX procesos de urbanización incontro-

lados que no han sido acompañados por un crecimiento sincrónico de la red de agua potable y cloacas. La provisión de agua se realizó a partir de perforaciones domiciliarias, en tanto que las excretas eran volcadas a "pozos ciegos", una suerte de pozo séptico sin revestimiento y muchas veces en contacto directo con el acuífero.

Como se ha visto anteriormente, durante el transcurso de la última década se comienza a evidenciar la recuperación de los conos de depresión regionales, o sea que los niveles piezométricos ascendían hasta recuperarse casi totalmente, y en las zonas bajas urbanizadas, llegaron hasta unos centímetros de la superficie. Es evidente que intervinieron diversos factores antrópicos y naturales para que esto suceda, no pudiendo cuantificarse aún el peso individual de cada uno de ellos.

El Gran Buenos Aires ha sido una de las regiones industriales más importantes de la Argentina. Por esta razón el consumo de agua subterránea por la industria en general siempre ha comprometido importantes volúmenes. Recientemente el cambio de radicación de algunas de las industrias hacia los nuevos Parques Industriales y el cierre o caída de la producción de una gran parte de ellas, consecuente con

la crisis económica de la última década, ha provocado una disminución de la extracción y consumo. El resultado de esto es la limitación o abandono de explotaciones de agua subterránea con grandes volúmenes de agua (que pueden alcanzar los varios cientos de m³/h) donde históricamente los conos de depresión regional tenían su ápice (Santa Cruz *et al.*, 1996).

Hasta principios de la década del noventa la proporción de agua subterránea, que junto con las aguas del Río de la Plata, constituían el suministro de la red domiciliaria era cercana al 15%. Las captaciones de bombeo para agua de red se encontraban en diferentes áreas del Conurbano Bonaerense donde se formaban conos de depresión de menor magnitud o coincidían arealmente con los conos de depresión industrial y urbano. Durante los últimos diez años casi todos los campos de bombeo han sido eliminados de la red de suministro domiciliario y ese déficit del mismo ha sido cubierto a partir de la extracción de aguas del Río de la Plata. De esta forma, junto con el cese o disminución de la extracción de aguas subterráneas se incrementó el suministro de aguas desde el Río de la Plata, el cual por falta de una red cloacal extensa se infiltra localmente a través de los "pozos ciegos" aumentando el volumen de recarga natural del acuífero freático en la región (Santa Cruz, 2000), al igual que otros factores no cuantificados como pérdidas en conducciones, etc.

A todo esto hay que considerar el aumento general de las lluvias en toda la región Pampeana que ocasionó también el levantamiento del nivel freático regional en el resto de la provincia. Por último, es necesario advertir sobre el peligro potencial en relación a la estabilidad de las fundaciones de obras civiles y como consecuencia del desecamiento, en su momento, de suelos y materiales geológicos con arcillas expansibles y su reciente saturación con el agua que ascendió (Santa Cruz, 2000).

Un balance preliminar buscaría establecer la importancia relativa de dichos factores, además de las posibilidades reales de evaluación de cada aspecto. Dado que en muchos casos la información proveniente no es medible con precisión, debería designarse una categoría de confiabilidad estimada a partir de las condiciones de la información de base, las condiciones limitantes y las premisas de cada cálculo estimativo.

En un balance de estas características sería posible entonces evaluar las variaciones en los volúmenes de agua resultante de diferentes factores concurrentes en el sistema acuífero, sean estos naturales o antrópicos. Se entiende que estos factores que intervienen en mayor medida en la explotación y posterior

recuperación de los niveles piezométricos de la Sección Epiparaneana. Los factores posibles son los siguientes:

- antrópicos:

- bombeos de captaciones de abastecimiento para la red de agua del Gran Buenos Aires
- consumos de Industrias fuera del área del Gran Buenos Aires
- volumen de agua que ingresó al sistema acuífero en áreas con servicio de red y sin cloacas
- volumen del cese de bombeos domiciliarios incorporados a la expansión de los servicios
- pérdidas en cañerías del suministro

- naturales

- volumen Infiltrado a partir de las precipitaciones o "recarga potencial"
- volumen de agua calculado a partir de la recuperación de las depresiones regionales.

No existe aún la información hidráulica correspondiente para comparar este balance preliminar con el volumen de agua que efectivamente ha recuperado el Sistema Acuífero Epiparaneano. Esta podría calcularse a partir de los incrementos piezométricos mejorando la información de base, realizando estudios de hidráulica de acuíferos más detallados y pudiendo finalmente hacer simulaciones con modelos matemáticos.

Conclusiones

Este trabajo aborda la problemática e historia de la explotación de la Sección Epiparaneana, pudiendo mencionar un conjunto de conclusiones preliminares para orientar un análisis más detallado. Entre estas podemos citar las siguientes:

En esta región el agua subterránea de interés para consumo, se encuentra alojada en los Acuíferos Pampeano y Puelches. Por debajo del acuífero libre o freático todos los acuíferos están interconectados. Todos se alimentan directa o indirectamente y en forma local por infiltración a partir de la recarga de las precipitaciones.

La recuperación piezométrica de la Sección Epiparaneana y en particular la del Acuífero Puelches ha sido sostenida durante al menos los últimos 15 años y esta recuperación parecería haber obedecido fundamentalmente a causas antrópicas que se relacionan con el uso del recurso subterráneo.

Se manifiesta como una problemática compleja que posee diversos aspectos concurrentes que pueden tener relación directa e indirecta con la recuperación piezométrica, no habiéndose evaluado en este estudio la magnitud e intensidad de la afectación con-

secuente y la potencial movilización de carga contaminante.

La falta de información, falta de contemporaneidad, dispersión espacial y temporal, la ausencia de proyectos concretos de control y monitoreo de las variables físicas del Sistema Acuífero sumado a la variabilidad de la dinámica de la explotación por diversas causas antrópicas dificultan en gran medida una adecuada conceptualización del funcionamiento del sistema acuífero afectado.

Desde la década de 1940 hasta fines de 1980 se explotó el agua subterránea en gran parte del Gran Buenos Aires en forma muy intensa conformándose grandes conos de depresión regionales y evidenciándose que se estaba extrayendo más agua que la que se podría reponer naturalmente a partir del ciclo hidrológico.

Desde comienzos de la década del noventa ya es notoria la recuperación de los conos de depresión, o sea el ascenso de los niveles piezométricos, hasta su recuperación casi total en muchos sectores instalándose el techo del acuífero libre o freático muy cerca de la superficie del terreno en muchas zonas urbanas y afectando sensiblemente a la población.

En cualquier caso, es evidente que se torna indispensable la eficiente intervención del Sector Público pertinente, a fin de implementar una gestión integrada y sustentable del Recurso Hídrico y mejorar el conocimiento de los mismos, reasignándole al agua subterránea una función de equilibrio ambiental propia de las regiones húmedas y acorde al nuevo paradigma de desarrollo con sustentabilidad ambiental al que nuestro país adhirió especialmente en 1992 en la Agenda 21.

Referencias

- Azara, F. 1797. *Viajes por la América Meridional*, Editorial Blanco, Buenos Aires, Argentina.
- Consejo Federal de Inversiones (CFI-EASNE), 1972. *Contribución al Estudio Geohidrológico de la Región NE en la Prov. de Buenos Aires*. Serie Técnica 24., Buenos Aires, Argentina.
- Darwin, C. 1833. *Viaje de un naturalista alrededor del mundo*, Editorial el Ateneo, Buenos Aires, Argentina
- Giai, S.B. 2001. Control del Nivel Freático en Realicó (La Pampa, Argentina). *Actas. IV Diálogo Interamericano de Gestión de Agua*, pp. 142-148. Foz de Iguazú, Paraná, Brasil.
- Giberti, H. 1974. *Historia Económica de la Ganadería Argentina*, Editorial Solar/Hachette, Buenos Aires, Argentina.
- Hernández, M. A. 1975. Efectos de la Sobreexplotación de aguas subterráneas en el Gran Buenos Aires y alrededores. Rep. Argentina. *II Congreso Ibero-Americano de Geología Económica. La geología en el Desarrollo de los Pueblos*.
- Hernández, M.A. 1978. Reconocimiento Hidrodinámico e Hidroquímico de la interfase Agua Dulce-Agua Salada en las aguas subterráneas del estuario del Plata. (Partidos de Quilmes y Berazategui, Buenos Aires). *VII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Actas II*: 273-285.
- Newton, R. y Jurado, J.M. 1878. Informe sobre la estancia "El parrillar", *Anales de la Sociedad Rural Argentina*, T XII, pag. 495.
- Paoli, C., Giacosa, R., Santa Cruz, J.N., Silva Busso A. 2000. *Estudio en el Área de Derrame de la cuenca del Río Quinto y Arroyos del Sur de Córdoba*. Informe Final. CRL, PNTSAS, Instituto Nacional del Agua y del Ambiente, Secretaría de Recursos Hídricos, Argentina., Capítulos 5 y 6 Inédito.
- Randle, P.H. 1971. *Atlas de Geografía Histórica de la Pampa Anterior*, Eudeba, Universidad Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Romero, J.M. 1827. *Informe de la Comisión de Evaluación de la Solicitud del Sr. Lanuza de patente para dos máquinas de extraer el agua entre ellas el balde sin fondo*, Archivo General de la Nación (Inédito).
- Sala, J.M. y Auge, E.M. 1970. Algunas Características Geohidrológicas del Noreste de la Prov. de Bs. As. *Actas IV Jorn. Geol. Arg.* 321-336. Bs. As.
- Sala, J.M., González, N. y Kruse, E. 1983. Generalización Hidrológica de la Provincia de Bs. As. *Coloquio Internacional Sobre Hidrología de Grandes Llanuras*. Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional, Olavarría, Argentina.
- Santa Cruz, J.N. 1995. Tipología General de la Contaminación de las Aguas Subterráneas en el Conurbano Bonaerense. *Revista Fundación Museo de La Plata*, Vol. 1-Nº 5, pp.68-71, Buenos Aires.
- Santa Cruz, J. N. y Silva Busso, A. 1996. *Disponibilidad del Agua Subterránea para Riego Complementario en las Provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Córdoba y Santa Fe*, PROSAP, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, Argentina (Inédito).
- Santa Cruz, J.N, Silva Busso, A., Amato, S., Guarino, M., Villegas, D. y Cernads, M. 1996 Explotación y Deterioro del Acuífero Puelches en la región metropolitana de la República Argentina. *Agua em revista*, CPRM, Brasil, Año 2, Vol. 1 Pág. 48-57.
- Santa Cruz, J. N., Silva Busso, A. y Cernadas, M. 1996. Diseño de un Sistema de Información para Aguas Subterráneas y Aplicaciones para la Gestión del Recursos Aguas Subterráneas. *XIII Congreso Geológico Argentino, III Congreso de Explotación de Hidrocarburos. Actas, IV*: 393-404. Buenos Aires, Argentina.
- Santa Cruz, J. N. y Silva Busso, A. 1999. Escenario hidrogeológico General de los Principales Acuíferos de la Llanura Pampeana y Mesopotamia Septentrional Argentina. *II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales en*

- Hidrología Subterránea*, Santa Fe, Argentina. Actas, Tomo I, Pág. 461-471.
- Santa Cruz, J.N. 2000. Desequilibrium of Groundwater in Argentine. *31st International Geological Congress, General Symposia, CPRM*, Río de Janeiro Brasil. Abstracts Volume in CD HTM2028.
- Santa Cruz, J. N. y Silva Busso, A. 2002. Comportamiento Regional del Nivel Freático ante Excesos Hídricos en el Oeste de la Llanura Chacoparanense de la República Argentina. *XXXII IAH y IV ALHSUD Congress Groundwater and Human Development*. Mar del Plata, Argentina. (En evaluación)
- Sbarra, N. 1973. *Historia de las Aguadas y Molinos*. EUDE-BA, Universidad Buenos Aires, Argentina
- Sourdeaux, A. 1862. *Apuntes sobre la Industria Artesiana*, Buenos Aires, Argentina. (gacetilla)
- Sourdeaux, A. 1864. *La guía de los Forasteros*, Buenos Aires, Argentina. (gacetilla).
- Vázquez-Sune *et al.*, 2001. Gestión de las Aguas Subterránea en Zonas Urbanas. Conceptualización y Modelización: Aplicación a Barcelona (España), *II Congreso Hidrogeológico Argentino y IV Congreso Hispano-Argentino sobre temas Actuales en Hidrología Subterránea*, UNT, IML, Tucumán, Argentina, Actas I pag: 41-50.

Recibido: Mayo 2002

Aceptado: Septiembre 2002