

CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS DE AZUL,
PROVINCIA DE BUENOS AIRES, REPUBLICA ARGENTINA

Miguel P. AUGE* y V.B. STREL CZENIA**

*Profesor Titular de Hidrogeología, Universidad de Buenos Aires,
Departamento de Geología. Ciudad Universitaria, Pabellón 2 (1428)
Buenos Aires, Argentina.

**Profesor Asociado de Hidrología, Universidad Nacional del Centro
de la Provincia de Buenos Aires. 65 N° 113 (1900) La Plata, Argen
tina.

RESUMEN

Se establecen las características y el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del acuífero que provee de agua potable a la ciudad de Azul, para optimizar su aprovechamiento. El área estudiada abarca 1.200 km² en los sectores alto e intermedio de la cuenca del Arroyo del Azul. Morfológicamente, la región se ubica en el piedemonte de las Sierras de Tandil, en cuyo cuerpo afloran las rocas del "basamento cristalino" más antiguas reconocidas hasta el presente en Argentina. La pendiente topográfica varía entre 100 m/km en la zona serrana y 1,4m/km en la llanura aledaña al piedemonte. La precipitación y la temperatura medias anuales son 892 mm y 14°C. El balance hídrico arroja un excedente medio de 160 mm/año de los cuales sólo un 9 % se transforma en escurrimiento superficial; el resto (146 mm/año), se infiltra. El agua subterránea es bicarbonatada (cálcica, magnésica y sódica) con una salinidad inferior a 1.000 ppm. Las perforaciones que abastecen a la ciudad presentan bajas eficiencias, en muchos casos debido a la obturación de sus filtros por precipitados de óxidos.

PALABRAS CLAVE

Hidrogeología; acuífero multiunitario; explotación urbana; hidrodinámica e hidroquímica subterráneas; Provincia de Buenos Aires-Argentina.

HYDROGEOLOGICAL BEHAVIOR OF AZUL,
PROVINCE OF BUENOS AIRES, ARGENTINA

ABSTRACT

The hydrodynamic and geochemical behavior of the aquifer that supplies drinking water for the town of Azul are established, in order to optimize its use. The study area includes 1,200 km² in the upper and intermediate parts of the Azul Creek basin. Morphologically, the region is located in the piedmont of the Tandil Range, in which the oldest "crystalline basement" rocks known in Argentina crops out. The topographic gradient varies between 100 m/km in the uplands to 1,4 m/km in the plain which borders the piedmont. The precipitation and the annual mean temperature are 892 mm and 14 °C respectively. Calculations of the groundwater budget give an average excess of 160 mm/year, of which only 9 % is lost in surface run-off; the rest (146 mm/year) infiltrates. Bicarbonate is the dominant anion in the groundwater and calcium, magnesium and sodium are the dominant cations. The total dissolved solids are less than 1,000 ppm. The wells which supply the city are very inefficient, in many cases due to oxide precipitation in their screens.

KEYWORDS

Groundwater resources; multi-unit aquifer; urban exploitation; hydrodynamic and hydrochemical; Buenos Aires Province-Argentina.

UBICACION GEOGRAFICA Y FISOGRAFIA

La zona estudiada se ubica en la llanura aledaña al faldeo NE de las Sierras de Tandil, en el sector SE de la Provincia de Buenos Aires (fig. 1).

La cadena serrana, se extiende con rumbo NO-SE a lo largo de unos 335 km con un ancho máximo de 60 km, cubriendo una superficie aproximada a 10.000 km². Se caracteriza por sus escasas alturas absolutas (máxima 500 m*) y relativas, con desniveles entre 50 y 250 m respecto del piedemonte aledaño (Holmberg, 1972).

El cuerpo de las Sierras de Tandil, está formado por rocas gnéissicas del basamento cristalino más antiguo reconocidas hasta el presente en Argentina (2.200 millones de años) y conforma el extremo austral del escudo brasileño (Teruggi et al, 1975).

El pasaje del ambiente serrano al llano circundante, se efectúa a través de un piedemonte de escasa manifestación morfológica.

Si se considera específicamente al área de estudio, las pendientes topográficas son: sierra 21 a 10 % piedemonte 1,6 a 0,16 %, llanura 0,25 a 0,12 %. Las alturas absolutas varían entre 285 y 120 m y las relativas entre 60 m (sierra) y 2,5 (llanura).

El ámbito estudiado ocupa las partes alta y media de la cuenca del Arroyo del Azul, en una superficie aproximada a 1.200 km².

CLIMA

El clima de la región es de tipo húmedo-mesotermal con nulo o pequeño déficit de agua y escasa variación de la temperatura: B1 B'2 r a' (Thornthwaite, 1948).

La precipitación media anual es de 892 mm, la máxima media mensual se registra en marzo con 112 mm y la mínima media mensual en agosto con 41 mm** (fig. 2).

La mayor precipitación estacional se produce en los meses de verano (diciembre, enero y febrero) con el 30 % del total, la mínima en invierno (junio, julio y agosto) con el 14 %, mientras que al otoño (marzo, abril y mayo) y a la primavera, les corresponde el 29 y el 27 % respectivamente.

Pese a lo señalado, el invierno, resulta la estación de mayor exceso hídrico, debido al bajo índice de evapotranspiración.

Se aprecia un aumento de la pluviosidad de un 11 % entre 1975/86, pues en ese período la media alcanzó a 991 mm/año.

La temperatura media anual es de 14 °C, la máxima media mensual 21,3 °C corresponde a enero y la mínima media mensual 7,4 °C a julio (fig. 3).

La evapotranspiración potencial, de acuerdo a Thornthwaite y Mather (1955), es de 741 y la real de 732 mm/año.

La humedad relativa media anual es del 75 % y los vientos dominantes son del sector NE con una velocidad media de 17 km/h, siendo los meses más ventosos setiembre, octubre y noviembre.

* Las alturas están referidas al nivel del mar.

** Las precipitaciones y temperaturas medias corresponden a registros de la Estación Azul para el período 1921/86 y 1941/80, respectivamente.

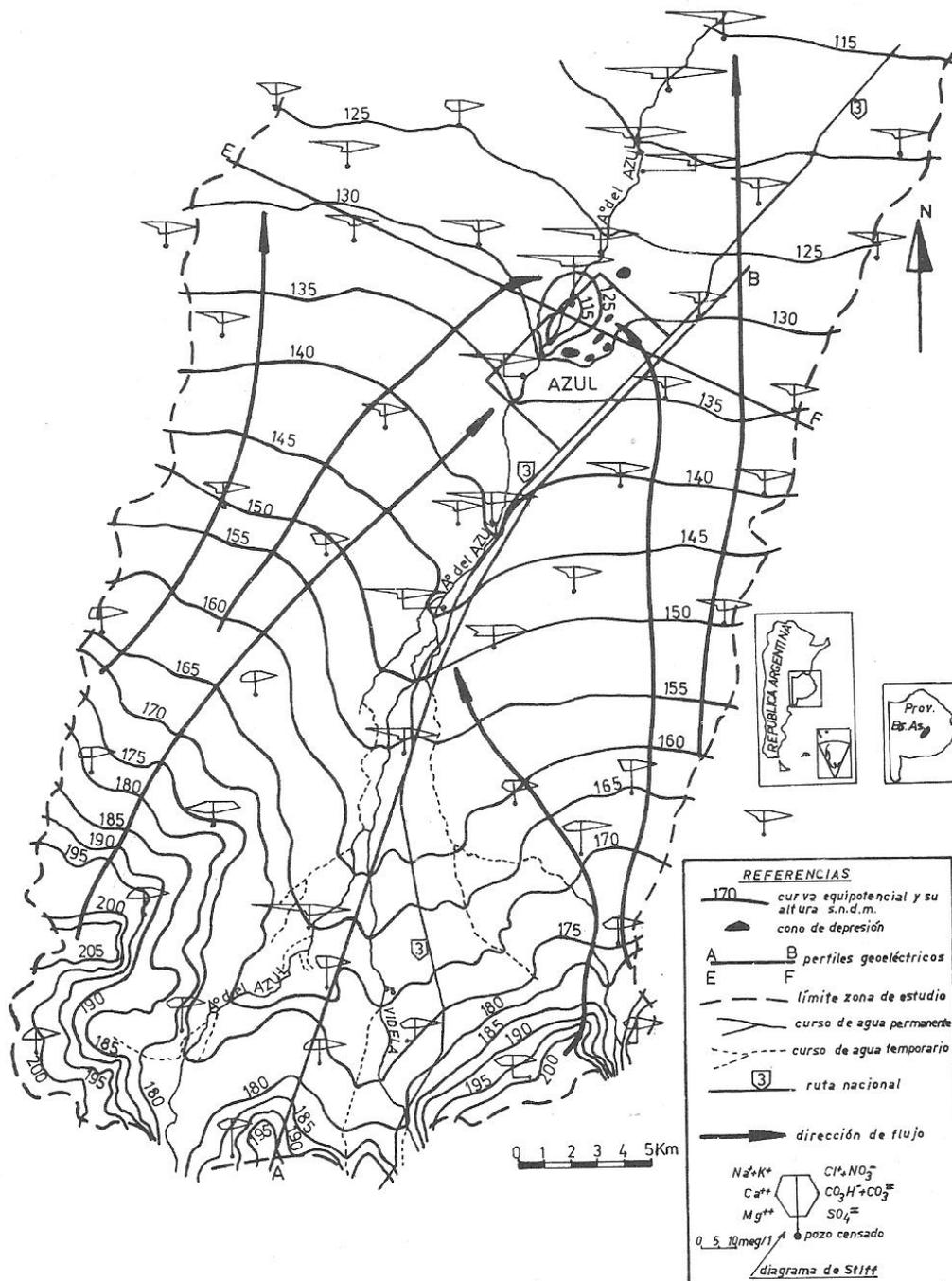


Fig. 1. Red de flujo subterráneo - diagramas de Stiff

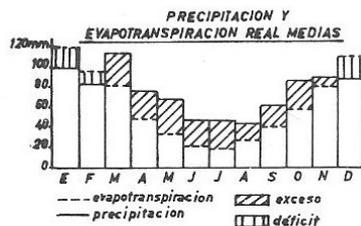


Fig. 2. Pluviograma-evapotranspirograma

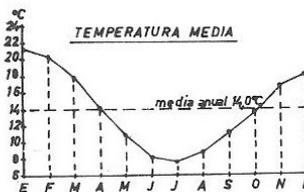


Fig. 3. Termograma

BALANCE HIDRICO

Aplicando la metodología de Thornthwaite y Mather (1955) para desarrollar el balance hídrico a nivel del suelo y asumiendo una capacidad de campo de 200 mm por las características texturales y estructurales de los suelos y el grado de penetración de las raíces, resulta un exceso de 160 mm/año, si se considera el período 1921/86. La estación con mayor exceso de agua es el invierno (42 % del total), seguida por la primavera (35 %) y el otoño (23 %). El verano, presenta un déficit medio anual de 9 mm (Cuadro 1).

El exceso medio de 160 mm/año, debe repartirse entre escurrimiento superficial e infiltración.

A partir de aforos realizados, en el Arroyo del Azul, que es el colector principal del escurrimiento superficial de la cuenca, se obtuvo un módulo de 0,95 m³/s (1962/85), que equivale a una lámina de 14 mm/año. Esto representa solamente el 2 % de la precipitación y el 9 % del exceso.

Empleando la ecuación generalizada del ciclo hidrológico se tiene:

$$I = P - Evtr - Es \quad 146 = 892 - 732 - 14$$

I: infiltración P: precipitación Evtr: evapotranspiración real Es: escurrimiento superficial (todos en mm).

Por lo tanto, la infiltración efectiva representa el 91 % del exceso hídrico y el 16 % de la precipitación.

GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA

Teniendo en cuenta el comportamiento hidrogeológico de las unidades geológicas, se diferencian rocas y sedimentos.

Las primeras se caracterizan por carecer de porosidad y en el caso de poseerla esta es de tipo secundario (fisuras, diaclasas, esquistosidad, estratificación, etc.).

Los sedimentos presentan porosidad intergranular (primaria) y bajo condiciones hidrodinámicas naturales, transmiten agua con un régimen de tipo laminar.

Rocas. En esta unidad se pueden diferenciar dos grandes grupos. Uno compuesto por rocas cristalinas (Ígneas y metamórficas) de aspecto gnéisico, de edad precámbrica, que constituyen el cuerpo serrano, pertenecientes al basamento cristalino y que actúan como la base impermeable del sistema hidrogeológico. Sin embargo, el diaclasamiento y la esquistosidad, particularmente en las secciones someras, constituyen vías preferenciales para la circulación del agua y muy probablemente, a través de estas superficies de debilidad, se produzca parte de la recarga que recibe el acuífero en el ámbito pedemontano. Además, en algunos sitios, estas rocas presentan una importante alteración por meteorización la que hace que adopten un comportamiento respecto a la admisión y transmisión de agua, más parecido al de un medio con porosidad intergranular que a uno fisurado.

El otro grupo, corresponde a rocas sedimentarias paleozoicas integradas por cuarcitas, dolomías

ESTACION AZUL

LATITUD: 36° 45' S

LONGITUD: 59° 50' O

ALTITUD: 152 m

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
Temperatura °C	21,5	20,5	17,9	13,9	10,6	7,8	7,4	8,4	10,9	13,5	16,6	19,7	14,0
Índice calórico	8,97	8,47	6,90	4,70	5,12	1,96	1,81	2,19	3,25	4,50	6,15	7,97	59,99
Evapotranspiración pot. sin ajustar mm	3,5	3,2	2,6	1,8	1,2	0,8	0,7	0,9	1,3	1,7	2,3	2,9	
Coefficiente de ajuste	37,4	31,5	31,8	28,2	26,5	24,1	25,6	27,8	30,0	34,2	35,6	38,0	
Evapotranspiración pot. ajustada mm	123	101	83	51	32	19	18	25	39	58	82	110	741
Precipitación media mm	99	84	112	79	68	44	44	41	61	86	88	86	892
Precipitación menos E.T.P. ajustada mm	-24	-17	29	28	36	25	26	16	22	28	6	-24	
Pérdida potencial de agua acumulada mm	-48	-65											-24
Almacenaje mm	157	144	173	200	200	200	200	200	200	200	200	177	
Variación del almacenaje mm	-20	-13	29	27	0	0	0	0	0	0	0	-23	
Evapotranspiración real mm	119	97	83	51	32	19	18	25	39	58	82	109	732
Exceso mm	0	0	0	1	36	25	26	16	22	28	6	0	160
Déficit mm	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9

Cuadro 1. Balance hídrico a nivel del suelo

arcillitas y calizas, que se disponen discordantemente sobre el basamento y en general afloran en forma discontinua. De espesor variable entre 0 y más de 395 m, la mayoría de estas rocas, debido a los procesos de litificación, han perdido su porosidad primaria por lo que, su comportamiento hidrogeológico es más parecido al del basamento cristalino que al de los sedimentos sobrepuestos.

Sedimentos. Los sedimentos se caracterizan por presentar porosidad primaria o intergranular lo que permite, bajo condiciones naturales, que el flujo sea de tipo laminar y que el agua subterránea por debajo de la superficie freática ocupe la totalidad del espacio poral y por lo tanto, mantenga continuidad tanto vertical como lateral.

Teniendo en cuenta sus características granométricas y el grado de compactación se reconocen "Sedimentos Pampeanos y Postpampeanos".

Los primeros son más antiguos, abarcando el lapso Plio-pleistoceno y se caracterizan por ser de tipo loessoide (limo-arenoso), de tonalidades castañas, de origen eólico y aluvial y por presentar en su techo carbonato de calcio de tipo estratiforme (tosca) que por su espesor (alrededor de 1 m) y tenacidad, dificulta notablemente la ejecución de pozos y perforaciones.

Los sedimentos Pampeanos, constituyen la unidad de mayor interés hidrogeológico del área estudiada, pues contienen al acuífero más productivo tanto en el ámbito rural como en el urbano.

El espesor del Pampeano aumenta desde la sierra a la llanura, alcanzando unos 120 m en el subsuelo de Azul. La variación de potencia y la relación con el basamento cristalino puede apreciarse en la fig. 4.

Los Sedimentos Postpampeanos, sobreyacen al Pampeano, son de edad holocena a reciente e incluyen depósitos de diferente origen.

Los eólicos, que son los que ocupan mayor extensión areal, presentan caracteres litológicos muy similares a los Sedimentos Pampeanos, por lo que la diferenciación entre ambos es dificultosa y en algunos casos, sólo puede hacerse a partir del menor grado de compactación de los primeros. El Postpampeano eólico, está constituido por limos arenosos castaño claros, en partes blanquecinos por la presencia de CO₃Ca pulverulento; también presentan concreciones y muñecos de tosca. Los mayores espesores registrados en el área de estudio rondan 2 m, en ámbitos de piedemon-

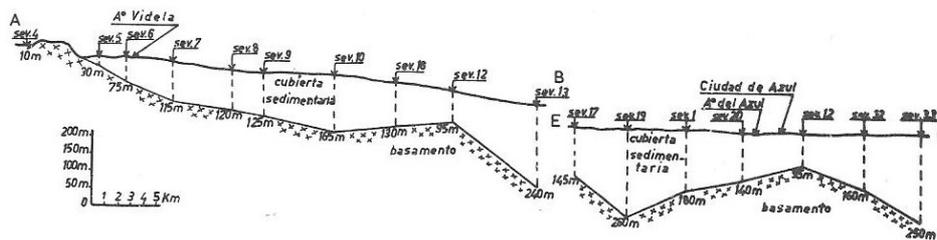


Fig. 4. Perfiles geoelectricos

te, para acuñarse hacia el sector serrano y la llanura circundante, donde es reemplazado por los horizontes edáficos. Debido a su escaso espesor y a que normalmente se ubica en la zona de aireación carece de interés hidrogeológico práctico. Sin embargo, es el primer horizonte geológico por debajo del edáfico, que atraviesa el agua al infiltrarse y es en la zona de aireación, más precisamente en la franja edáfica, donde el agua posee mayor capacidad de disolución y por ende donde incorpora mayor cantidad de sales en solución.

También al Postpampeano corresponden depósitos aluviales que rellenan las terrazas de inundación de los fluvios, particularmente la del Arroyo del Azul. Estos depósitos (limos y arenas finas) presentan un desarrollo areal variable, alcanzando unos 150 m a cada lado del cauce en la parte media de la cuenca y un espesor máximo reconocido de 2,5 m. Dentro del Postpampeano, se incluye al derrubio de falda, constituido por bloques de rocas de diferentes tamaños, cuyo agente de transporte principal es la acción gravitatoria.

Rematan la sucesión estratigráfica los horizontes formados por procesos pedogenéticos (suelos).

Geomorfología. Los caracteres geomórficos de toda región dependen de la evolución de dos factores principales (geología y clima). Dentro de los geológicos inciden litología y estructura. A su vez, el clima también ha variado y por ello, la región estudiada que actualmente es húmeda, fue árida durante los últimos períodos glaciales. Ello ha dejado su impronta en las formas y comportamiento actual, más afines con ambientes desérticos.

En la zona investigada se han reconocido cuatro tipos de formas dominantes: cerros, interfluvios, terrazas y cubetas.

Los cerros son de escasa altura, presentan formas subredondeadas y por su posición son los más expuestos a los agentes erosivos.

Los interfluvios son más bajos que los cerros, de forma alargada en dirección NE y escasa pendiente.

Las terrazas son de origen aluvial y se restringen a las llanuras de inundación de los cursos principales (Arroyo del Azul).

Las cubetas son depresiones subcirculares que cubren superficies desde cientos de metros cuadrados hasta unas 20 hectáreas. Son muy abundantes en el ambiente de interfluvios y deben su origen principalmente a la deflación eólica.

AGUA SUPERFICIAL

La red de drenaje es bastante pobre y mal integrada, particularmente fuera del ámbito serrano. Esto, como consecuencia de que el piedemonte y la llanura aledaña, tienen una forma similar a la de una superficie plana suavemente inclinada hacia el NE, con una estrecha incisión por donde corre el Arroyo del Azul.

En la zona serrana, la red de drenaje es de tipo dendrítico, ubicándose las cabeceras de la cuenca a unos 65 km al SO de la ciudad de Azul. El colector principal recibe pocos afluentes, siendo el más importante por margen derecha el Arroyo Videla.

Las depresiones subcirculares (cubetas de deflación) son particularmente abundantes en la zona llana, especialmente al norte de Azul. Estas depresiones juegan un importante rol hidrológico, pues en general actúan como reservorios en los que se acumula gran parte del escurrimiento superficial en lapsos de fuertes lluvias. Sin embargo, cuando la capacidad de almacenamiento superficial y de retención por parte del suelo son superadas por la precipitación, se origina un escurrimiento de tipo mantiforme que, junto con el encauzado y los desbordes del A° del Azul, produjeron inundaciones con graves daños en la zona rural y en la ciudad de Azul en 1980 y 1985.

En 1985, la capacidad de retención de las depresiones se encontraba muy reducida debido al exceso de precipitación ocurrido desde 1983 y especialmente en 1985/86 donde el incremento fue del 18 % (1051 mm) respecto de la media histórica (892 mm/año). Esto derivó en un apreciable ascenso de la superficie freática con una reducción en la capacidad de almacenamiento subterráneo de unos 87 hm³ (Auge, 1988) por lo que, la mayor parte del agua que ocupaba las depresiones era de origen subterráneo.

AGUA SUBTERRANEA

La mayor reserva de agua subterránea está contenida en los Sedimentos Pampeanos, que conforman un acuífero del tipo libre o freático en la sección superior del perfil, con incremento del grado de confinamiento a medida que aumenta la profundidad, debido a la carga hidrostática y a la intercalación de capas arcillosas. Por lo tanto, en las secciones media e inferior, se comporta como semiconfinado. A este sistema hidrogeológico, que en definitiva constituye un acuífero multiunitario, lo denominamos Acuífero Pampeano, incluyendo dentro del mismo a la capa freática.

La recarga de los niveles semiconfinados se produce de diferentes maneras. Por filtración vertical descendente, a partir de la capa freática, especialmente en los interfluvios; por flujo lateral del agua infiltrada en el piedemonte y también por aporte, a través de la porosidad secundaria que presentan las rocas del basamento hidrogeológico, del agua infiltrada en el ámbito serrano.

La capa freática se recarga por infiltración directa del agua de lluvia.

Hidrodinámica. En la fig. 1, se representa la red de flujo subterráneo a partir de las cotas hidráulicas de la superficie freática en la zona rural y de la superficie piezométrica en la zona urbana de Azul, en virtud de la similitud de ambos niveles pues como se expresara, pertenecen a un mismo acuífero.

La pendiente hidráulica tiene una orientación y gradientes muy similares a la topográfica en la zona llana, mientras que el gradiente hidráulico se atenúa respecto al topográfico, en la zona serrana.

Para el análisis hidrodinámico e hidroquímico, se considera sector oriental y occidental, a los ámbitos ubicados al este y oeste del Arroyo del Azul.

El flujo subterráneo dominante en el sector oriental es hacia el N, mientras que en el occidental es hacia el NE. La línea de descarga natural principal es el Arroyo del Azul, pero también se aprecian zonas de forma subcircular en Azul, que son conos de depresión generados por bombeo.

La recarga subterránea, no se manifiesta con claridad en las curvas equipotenciales (fig. 1) y solamente se insinúan ámbitos de recarga concentrada hacia la zona serrana de la cuenca. Sin embargo, la recarga de la capa freática se produce en la mayor parte del área estudiada, salvo donde existe descarga natural (Arroyo del Azul, afloramientos de agua subterránea en las cubetas).

Los gradientes hidráulicos medios en el sector oriental son: ámbito serrano $7,7 \cdot 10^{-3}$, piedemonte $2,2 \cdot 10^{-3}$ y llanura $1,8 \cdot 10^{-3}$.

En el sector occidental los gradientes hidráulicos medios de llanura y piedemonte son similares

a los del oriental, pero en el ámbito serrano disminuye a $5,9 \cdot 10^{-3}$.

Para estimar el movimiento del agua subterránea, se emplea Darcy:

$$V_e = \frac{K \cdot i}{P_e}$$

V_e : velocidad efectiva (m/día) K : permeabilidad (m/día) i : gradiente hidráulico P_e : porosidad efectiva.

La permeabilidad del Acuífero Pampeano se obtuvo de dividir la transmisividad (T) por el espesor saturado productivo y la transmisividad, se calculó a partir de 11 ensayos de bombeo realizados en la ciudad de Azul. Los valores extremos de T fueron 110 y $2.525 \text{ m}^2/\text{d}$ y el medio $660 \text{ m}^2/\text{d}$. Dado que de la sección saturada del Pampeano en Azul (115 m), un 15 % está formada por capas arcillosas de muy baja permeabilidad, queda un espesor productivo medio de 98 m. Por lo tanto la permeabilidad media del acuífero es de unos 7 m/día ($8,1 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$). La porosidad efectiva (12 %) se obtuvo de un ensayo de bombeo realizado en la capa freática en la zona rural.

Sin bien los parámetros hidráulicos citados son puntuales frente a la extensión del área estudiada, la similitud en el comportamiento hidrogeológico general permite la extrapolación de los mismos, para estimar órdenes de magnitud respecto a la velocidad del flujo subterráneo en diferentes ambientes.

Sectores oriental y occidental: piedemonte $\bar{V}_e = 0,13 \text{ m/día}$, llanura $\bar{V}_e = 0,10 \text{ m/d}$. Sector oriental serrano $\bar{V}_e = 0,45 \text{ m/d}$. Sector occidental serrano $\bar{V}_e = 0,34 \text{ m/d}$.

De lo expuesto se desprende que bajo condiciones naturales, el agua subterránea se mueve lateralmente con velocidades de alrededor de 0,5 m/d en la zona serrana y 0,1 m/d en la llanura. En la zona bajo explotación, debido al incremento del gradiente hidráulico, la velocidad aumenta notablemente.

Hidroquímica. En el mapa 1 se representan, mediante diagramas de Stiff (1951), los caracteres químicos del agua subterránea en relación a sus componentes iónicos más comunes (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , NO_3^- , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} y K^+).

La salinidad total es baja (entre 500 y 1.000 ppm), aumentando hacia la zona de descarga coincidente con el curso del Arroyo del Azul.

En los ámbitos serrano y de piedemonte, emplazados en el sector sur del área estudiada, dominan aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas con salinidades del orden de 10 meq/l, mientras que en la llanura, particularmente en el sector norte, el agua evoluciona a bicarbonatada sódica, con salinidades del orden de 20 meq/l y una disminución apreciable de Ca^{++} y de Mg^{++} . Esta evolución de tipo normal, pareciera deberse a intercambio iónico por el que el Ca^{++} en solución se fija en las arcillas desplazando al Na^+ que a su vez se incorpora a la solución. Hacia la zona de descarga, aumentan sulfatos y cloruros y fuera de ella, es notable la baja concentración de SO_4^{2-} .

El agua subterránea es potable en la mayor parte del área estudiada, en relación a la mayoría de los componentes en solución. Sin embargo, si se considera a los NO_3^- , estos se presentan en concentraciones altas (mayores de 90 ppm) en algunos sectores de Azul, debido a contaminación de origen biológico. En este sentido conviene señalar que sólo una parte de la ciudad posee red cloacal.

También se presentan tenores algo elevados de flúor (hasta 2,6 ppm) en la zona de descarga subterránea del Arroyo del Azul, aguas arriba de Azul.

Explotación. El servicio de provisión de agua potable a la ciudad de Azul se inició en 1942 a través de la empresa estatal Obras Sanitarias de la Nación, que construyó 4 pozos de entre 114 y 126 m de profundidad cada uno. A fines de 1945, la cantidad de conexiones era de 2.000 y el caudal extraído de unos $125 \text{ m}^3/\text{h}$ (35 l/s). En esa época, la mayor parte de la población se abastecía con pozos y perforaciones propios. Actualmente el servicio cubre unas 8.000 conexiones (32.000 habitantes) que son abastecidas con $5,5 \text{ hm}^3/\text{año}$ ($628 \text{ m}^3/\text{h}$ o 174 l/s) de agua subterránea extraída de 14 pozos con una producción media de $45 \text{ m}^3/\text{h}$ (12,5 l/s). Además la industria explota $1,5 \text{ hm}^3/\text{año}$ y para la población no servida, se estima un consumo de $0,5 \text{ hm}^3/\text{año}$. Por lo tanto, la extracción total de agua subterránea en Azul es de unos $7,5 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Con el objeto de comparar el flujo subterráneo natural con el volumen explotado, se calculó el caudal que atraviesa la equipotencial de 130 m en toda su extensión (28 km). El gradiente hidráulico medio sobre dicha equipotencial es de $1,7 \cdot 10^{-3}$. Para ello, se consideró la distancia y la diferencia de potencial entre las curvas de 135 y 125 m. Aplicando Darcy se tiene:

$$Q = T \cdot i \cdot L \quad Q = 660 \text{ m}^2/\text{d} \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 28.000 \text{ m} \sim 31.400 \text{ m}^3/\text{d} \quad (363 \text{ l/s}) \sim 11,5 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Q : caudal L : longitud (m)

Como se aprecia, este caudal supera en un 53 % al extraído por bombeo. Sin embargo, la concentración de pozos en un área reducida (15 km²) y la impermeabilización de la zona urbana, debido a las construcciones, disminuyen la magnitud de la recarga por infiltración, cuyo valor se estima en 1,5 hm³/año. Sin embargo, los niveles piezométricos estáticos prácticamente no han variado desde el inicio de la explotación (1943) a la actualidad, lo que indica claramente que no existe sobreexplotación. Por lo tanto, la diferencia entre extracción y recarga (6 hm³/año) debe ser suplida por flujo subterráneo al ámbito bajo bombeo.

En algunos pozos, se observa una apreciable reducción de sus caudales específicos a través del tiempo, que en casos extremos llega al 77%. Esto, en virtud de lo expresado precedentemente no se debe a una disminución de la reserva, sino a la obturación de las rejillas y probablemente de los prefiltros por precipitados; entre los que se supone como más comunes a los óxidos de hierro y de silicio, teniendo en cuenta la composición de la cañería y del agua. También existe interferencia entre pozos debido a la escasa distancia que los separa, especialmente en el sector más deprimido del cono, dentro de la equipotencial de 115 m (fig. 1). En este sitio, la separación entre pozos varía entre 200 y 500 m, agrupándose en una superficie de 140 hectáreas 9 perforaciones.

Considerando los parámetros hidráulicos medios de la sección semiconfinada ($T = 660 \text{ m}^2/\text{d}$ y almacenamiento $S = 5 \cdot 10^{-4}$), se tiene que para un caudal de 100 m³/h (28 l/s), la depresión (s) en un pozo ideal de \emptyset 8" debería ser de 7,3 m al cabo de 1 año de extracción continuada:

$$s = \frac{2,3 \cdot 2.400 \text{ m}^3/\text{d}}{4 \cdot \pi \cdot 660 \text{ m}^2/\text{d}} \log 2,25 \cdot \frac{660 \text{ m}^2/\text{d} \cdot 365 \text{ d}}{(0,1 \text{ m})^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 7,3 \text{ m}$$

Pero si se considera un pozo real con una eficiencia del 70 %, la depresión crecería a 10,4 m bajo las mismas condiciones de explotación.

El distanciamiento óptimo entre pozos depende de factores artificiales (condiciones de explotación) y naturales (características hidrogeológicas) que son diferentes en cada emplazamiento. Por ejemplo, el exceso de costo en el bombeo por interferencia puede ser absorbido en algunos sitios y en otros no o a veces, el costo en el tendido de cañerías para comunicar al pozo con la red, hace más económico un menor distanciamiento pese a la interferencia. Entre los factores naturales pueden destacarse: extensión areal de los acuíferos, comportamiento hidráulico de los mismos (libre, confinado, semiconfinado), invasión de agua salada, subsidencia, etc.

En el caso que nos ocupa, se asume que hasta un 15 % de exceso de depresión debido a interferencia es aceptable tanto en lo referente al incremento del costo de bombeo, como a la alteración hidrodinámica del sistema subterráneo producida por la extracción. Por lo tanto, el distanciamiento propuesto a continuación se basa en un exceso de depresión por interferencia de 1,6 m.

Empleando Theis (1935) se tiene:

$$W(u) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 660 \text{ m}^2/\text{d} \cdot 1,6 \text{ m}}{2.400 \text{ m}^3/\text{d}} = 5,53 \quad \text{y} \quad u = 2,2 \cdot 10^{-3}$$

$$r = \sqrt{\frac{4 \cdot 365 \cdot 660 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}}} \sim 2.000 \text{ m}$$

Este distanciamiento (2.000 m) es significativamente mayor que el existente en algunos lugares de la ciudad donde en 2.300 m hay 9 pozos en funcionamiento.

CONCLUSION

El balance hídrico de la región estudiada arroja un excedente medio de 160 mm/año de los cuales sólo 14 mm/año se transforma en escurrimiento superficial y el resto (146 mm/año) se infiltra. La mayor parte de esta recarga de origen pluvial, llega a la capa freática desde donde puede transmitirse a niveles inferiores por filtración vertical descendente, debido a que el sistema se comporta como un acuífero multiunitario, con aumento del grado de confinamiento en profundidad. Otra parte de la recarga se produce a través de las fisuras que poseen las rocas que forman el basamento hidrogeológico del Acuífero Pampeano sobrepuesto, que se caracteriza por presentar porosidad primaria (intergranular).

El flujo subterráneo natural en la sección que pasa por Azul, a lo largo de 28 km y en un espesor saturado de 115 m, es de 11,5 hm³/año. La explotación en Azul asciende a 7,5 hm³/año y se concentra en una superficie de 15 km². Sin embargo, los niveles piezométricos estáticos no han variado desde el inicio de la extracción en 1943, por lo que el acuífero no manifiesta signos de sobreexplotación. Sí, se presenta una marcada reducción en el rendimiento de algunos pozos que en casos extremos llega al 77%. Esto se debe a la obturación de filtros y prefiltros. También existe interferencia debido a la escasa distancia que separa a los pozos entre sí (de 200 a 500 m). En este sentido, para mejorar la eficiencia de las captaciones se considera conveniente que todo nuevo pozo no se ubique a menos de 2.000 m de otro existente. De esta forma, el exceso de depresión por interferencia individual no superará el 15 %.

El agua subterránea es potable para la mayoría de los iones en solución. Sin embargo, algunos sectores de la ciudad presentan tenores elevados de NO₃⁻ debido a contaminación biológica. Por ello, se recomienda que los nuevos pozos se ubiquen fuera de la zona urbana y aguas arriba respecto al flujo subterráneo.

BIBLIOGRAFIA

- Auge, M.P. (1988). Variación de agua subterránea almacenada en la cuenca del Arroyo del Azul. IHLA, inéd., 1-7.
- Holmberg, E. (1972). Tandilia. Geología Regional Argentina. Acad. Nac. Cienc., 364-393.
- Stiff, H.A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Jour. of Petrol. Tech., 3, N° 10. 15-16.
- Teruggi, M.E. y Kilmurray, J.O. (1975). Tandilia. Relatorio VI Cong. Geol. Arg., 54-77.
- Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Trans. Am. Geoph. Union, 16, 519-524.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geog. Rev., 38, 55-94.
- Thornthwaite, C.W. y Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance. Climate Drexel Inst. of Tech., 10, N° 3, 185-311.