

Contaminación natural por sulfatos en el sistema multiacuífero de la ciudad de Santiago del Estero, Argentina

A. P. Martín⁽¹⁾ y R. Palazzo⁽²⁾

(1) Ente Regulador de los Servicios de Agua y Cloacas de Santiago del Estero. C/ Formosa n° 32. 4.200-Santiago del Estero, Argentina.
alfredopmartin@gmail.com

(2) Asesor de la Cámara de Senadores de la Provincia de Santa Fe. C/ Estrada n° 6.844 3.000-Santa Fe, Argentina
rodygeol@yahoo.com

RESUMEN

El estudio contempla un complejo de figuras y gráficos que definen la progresión de la contaminación en los pozos de bombeo, como así también se considera una revisión detallada y actualizada de la evolución físico – química del agua subterránea, con resultados que justifican la importancia de encontrar una solución válida a los problemas de la degradación de los acuíferos en todo el ámbito de la ciudad capital. Por tal motivo, se deberá perforar en la zona de recarga un total de 11 pozos, de los cuales cinco de ellos serán perforaciones someras de 70 m que estarán enclavadas en la cuña gravosa (acuífero II) y seis pozos de 150 m de profundidad que se insertarán en las márgenes del río Dulce. Por otra parte, los estudios llevados a cabo en el área de fuente, indican que todos los pozos obtendrán agua directamente de la fuentes superficial mediante una recarga inducida, ya que el 81 % de su caudal será absorbido desde el río y el 19 % restante lo tomarán del acuífero, por tal motivo se evitará el progresivo avance de la cuña salina y no se engendrará deterioro alguno en la calidad química del área de recarga, debido a que la batería de pozos suministrará al sistema interconectado 1.500.000 L/h de agua en inmejorables condiciones de potabilidad.

Palabras clave: contaminación natural por sulfatos, ensayos de bombeo, Hidrogeología, hidroquímica

Natural sulphate contamination in the multi aquifer system in Santiago del Estero city, Argentina

ABSTRACT

The study observed a complex of figures and graphics that reveal the progressive pollution in the pumping wells. Also, it is made a detailed and current review of the underground physics - chemistry evolution, which results justify the importance of finding a real solution to the degradation's problem of the aquifers in Santiago del Estero. For that reason, it is strictly necessary to build a total of eleven wells in the recharge's zone, so five of them will be diggings 70 m in the gravel wedge (aquifer II) and six wells of 150 m of depth in the margins of the river Dulce. On the other hand, the studies carried out in the area indicate that all the wells will obtain water directly from the river to a direct recharge, so 81% of its flow will be absorb from the river and the rest, 19% would be taken from the aquifer. This reason will avoid the progressive advance of the saline wedge and there won't harm the chemical quality of the recharge area. The batteries of the wells will supply 1.500.000 L/hour to the interconnected system on the top most potable conditions.

Key words: hydrochemistry, hydrogeology, natural contamination by sulphate, pumping test

Introducción

Los grandes abanicos aluviales de llanuras contienen enormes cantidades de materiales sueltos y por lo general son suficientemente porosos y muy permeables, ya que suelen almacenar fabulosas reservas de agua subterránea en inmejorables condiciones de potabilidad. Pero las megafracturas que se encuentran asociadas a estos depósitos tienen una importancia extraordinaria, debido a que originan barreras

o límites naturales que transfieren agua con sales muy concentradas a los terrenos más porosos y además, ponen en contacto capas de distintas permeabilidades y diferentes constituciones litológicas (Figuras 1 y 3). Las aguas provenientes de las arcillas verdes del Mioceno medio, originan sostenidos fenómenos de absorción o cambios de bases y le confieren al agua contenida en el bloque elevado de la fractura, grandes cantidades de sulfatos. Este proceso de contaminación natural, se origina desde el borde del

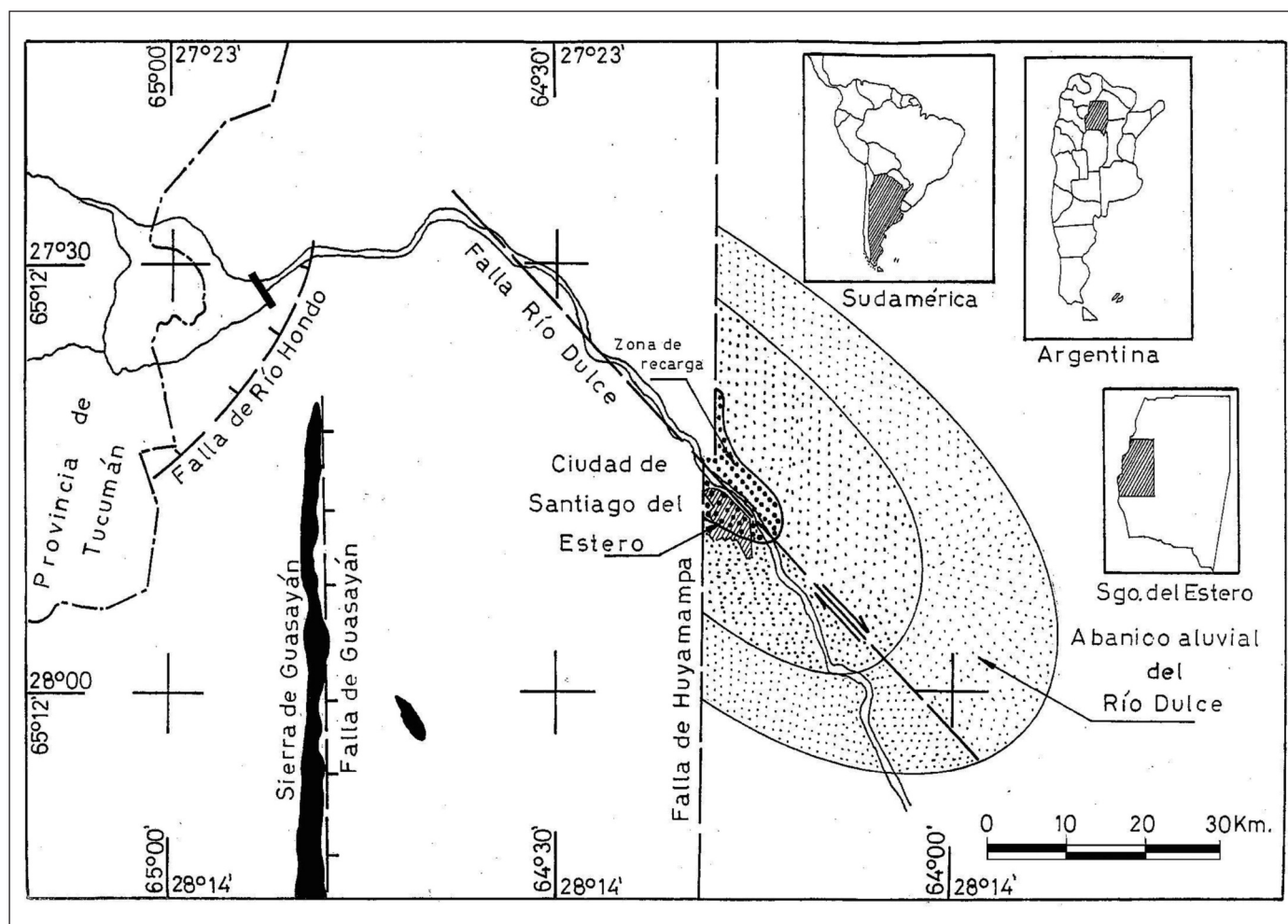


Figura 1. Principales lineamientos estructurales de la provincia de Santiago del Estero (R.A) que fueron interpretados en base a imágenes satélite

Figure 1. Main structural guidelines in Santiago del Estero province that were interpreted based on satellite images

zócalo y atraviesa el plano de falla de la fractura de Huyamampa, de tal manera que las líneas de flujo penetran en la zona de mayor permeabilidad y contaminan severamente a los acuíferos productores de agua dulce del abanico aluvial del Río Dulce.

Geología regional

Según Buitrago (1964), la provincia de Santiago del Estero tiene una pendiente regional promedio de 45 cm/km, por tal motivo en superficie los sedimentos suelen ser horizontales, pero en profundidad se encuentran una serie de bloques fallados diferencialmente y hundidos hacia el centro de la cuenca. Se puede decir que el subsuelo está constituido por un

profundo graben que dispone de miles de metros de espesor de sedimentos, y su eje axial se ubica sobre el centro de la cuenca, de tal manera que está conformada por el hundimiento lento de la misma como consecuencia del fallamiento de bloques inclinados hacia el centro (downwarp). En la Figura 1, se distinguen el predominio de grandes megafacturas que están relacionadas con el cauce del Río Dulce, tal es el caso de la fallas meridianas de rumbo Norte – Sur como la falla de Huyamampa y de Guasayán. Además, existen otras de rumbo Noroeste 45° Sudeste como la falla transcurrente del Río Dulce, que ha engendrado grandes modificaciones a lo largo del curso fluvial y cuyos lineamientos son un fiel reflejo de una tectónica profunda que afectó la génesis del subsuelo de toda la provincia de Santiago del Estero.

Ámbito de la geología local

El río Dulce, discurre por una garganta estrecha y profunda y adquiere una elevada dinámica, de tal manera que al salir de su cauce angosto (intersección entre la megafractura de Huyamampa y el río Dulce), el agua pierde velocidad y comienza a desarrollarse un abanico aluvial de llanura de grandes dimensiones (ver Figura 2). Es precisamente en el sector proximal del abanico aluvial (ápice del abanico), en donde el depósito adquiere un gran espesor y dispone de texturas gruesas a muy gruesas que se distinguen por su elevada permeabilidad. Las facies aluviales dentro del abanico pueden dividirse en proximales, medias y distales o llamadas también como zonas de elevada, media y baja permeabilidad (Figuras 1 y 2). El depó-

sito del abanico aluvial del río Dulce en la zona de estudio se distingue por las siguientes particularidades:

- La acrecentada esfericidad de los granos que constituyen la cuña gravosa se debe a un transporte muy largo, y estos depósitos, según Martín (1994) se caracterizan por su elevada porosidad, de tal manera que infiltran por gravedad grandes volúmenes de agua a los niveles inferiores en inmejorables condiciones de potabilidad.
- Alta energía de flujo en el sector proximal (ápice del abanico), con proveniencia lejana de los granos que constituyen los acuíferos, ya que la elevada energía de flujo se debe al cambio abrupto de pendiente debido a la actividad sostenida de la megafractura y los cuerpos gravosos son escasamente

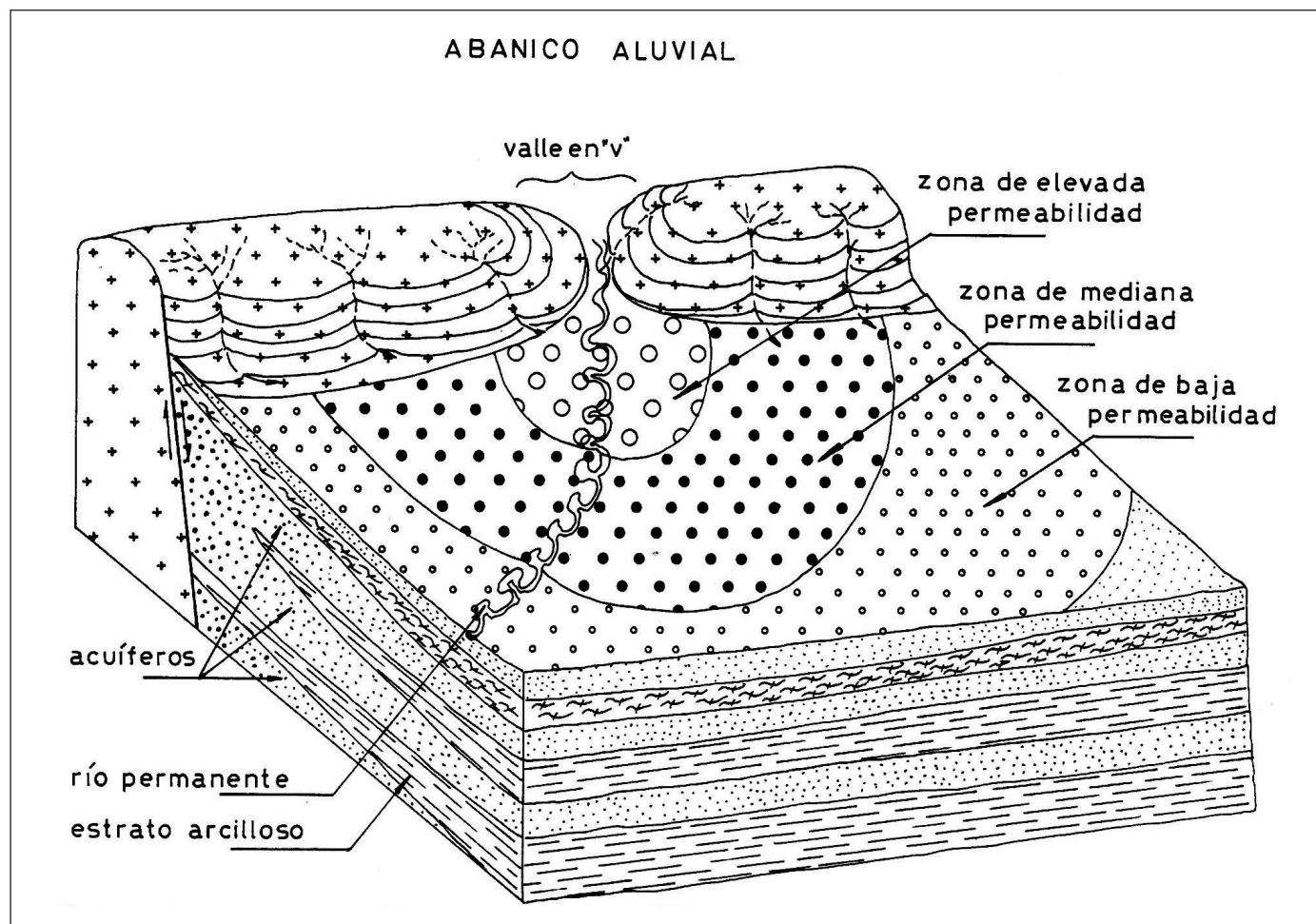


Figura 2. Bloc diagrama de un cono aluvial de llanura en donde se observa las distintas zonas que lo componen y la secuencia estratigráfica en profundidad

Figure 2. Block diagram of a plain alluvial cone where the different areas that make it up are observed, and the sequence stratigraphic in depth coverage

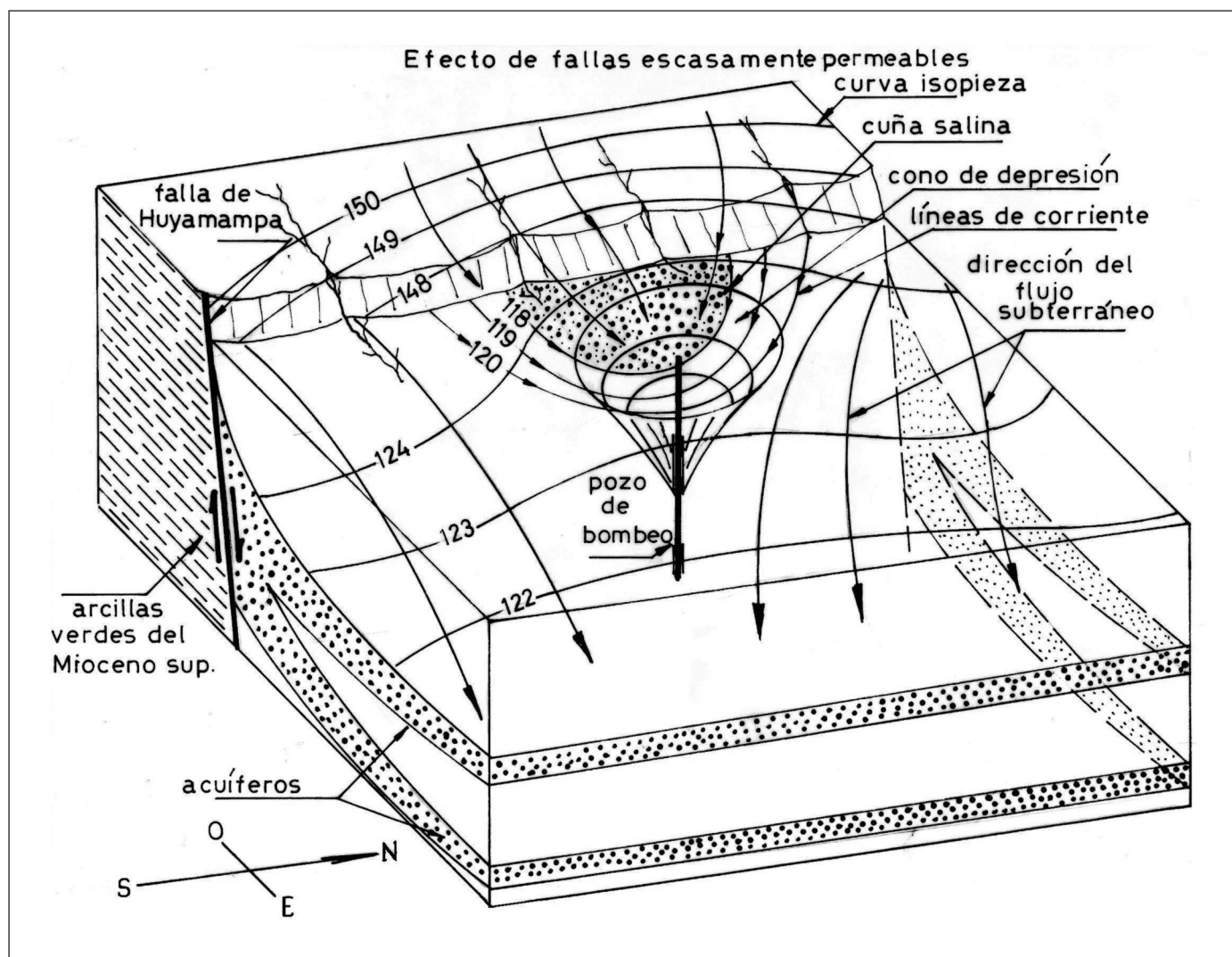


Figura 3. En el Bloc – diagrama se percibe la penetración de la cuña salina debido al intenso bombeo que se origina a través de la falla de Huyamampa y que explica la caracterización hidroquímica del sistema multiacuífero

Figure 3. The block diagram illustrates the saline wedge penetration caused by the intense pumping originated throughout the Huyamampa Fault, explaining, as a result, the hydrodynamic characterization of the multi aquifer system

estratificados en el área de recarga (sector proximal) que están unidos verticalmente a los otros acuíferos mas profundos, en consecuencia son los encargados de percolar el agua hacia los niveles inferiores, Martín (1994) y Martín *et al* (1997).

Los humbrales hidráulicos

En la ciudad de Santiago del Estero, se puede observar este tipo particular de estructuras, que Castany (1975) la denominó con el nombre de umbrales hidráulicos, y se manifiestan en el labio levantado de la fractura mediante una severa disminución del espa-

ciamiento de las curvas isopiezas. Pero, el rasgo más importante se encuentra evidenciado en el bloc – diagrama de la Figura 3, en donde las curvas isopiezas de mayor presión, surgen como un agrupamiento brusco que se encuentran en el labio levantado de la fractura. Por ese motivo, las líneas de corriente se desplazan por gravedad hacia la zona de elevada permeabilidad y llevan consigo elevados tenores salinos. Los terrenos ubicados en el bloque levantado de la falla, alimentan por vertido subterráneo a las gravas y arenas porosas del labio hundido, de tal manera que las curvas isopiezas se mantienen paralelas a la megafractura regional, lo cual denota que existe una fuerte conexión salina entre los diferentes ambientes geológicos.

El desplazamiento de la interfase agua dulce – agua salada de la Figura 3, ha engendrado una contaminación difusa que está provocada por la explotación intensiva del sistema multiacuífero, ya que excesivo bombeo ha facilitado enormemente la invasión de las aguas salinas en aquellas zonas altamente permeables donde se encontraba ubicada el agua dulce y ha engendrado una contaminación de difícil solución. En ese sentido, las aguas provenientes de las arcillas verdes del Mioceno medio de la formación Paraná, según Frengüelli (1920), originan sostenidos fenómenos de cambios de bases que le confieren al agua contenida en el bloque elevado de la fractura, grandes cantidades de sulfatos y cloruros, ya que el proceso de contaminación, se origina desde el borde del zócalo y atraviesa el plano de falla de la fractura de Huyamampa, de tal manera que las líneas de flujo penetran en la zona de mayor permeabilidad y contaminan severamente a los acuíferos productores de agua dulce.

Hidroquímica de las aguas subterráneas

Cada uno de los pozos estudiados se encuentran ubicados dentro del ejido de la ciudad de Santiago del Estero y con los resultados de los análisis químicos de la Tabla 1, se volcaron los resultados en un diagrama de Piper (1944) de la Figura 4. De tal manera que se pudo constatar que en el abanico aluvial del Río Dulce, se encuentran tres tipos de aguas: A) Aguas Bicarbonatadas Sódicas de la zona de recarga, B) Aguas Cloruradas Magnésicas de la zona intermedia y, C) Aguas Sulfatadas Cálcidas de la zona proximal, cercanas a la falla de Huyamampa (ver Figura 4).

A) Aguas Bicarbonatadas Sódicas: Los factores más importantes del enriquecimiento salino dependen del agua de la fuente que se combina químicamente con los componentes solubles del suelo, y al penetrar en la zona de recarga se insumen las aguas de escasa mineralización y adquieren características bicarbonatadas sódicas. En ese sentido,

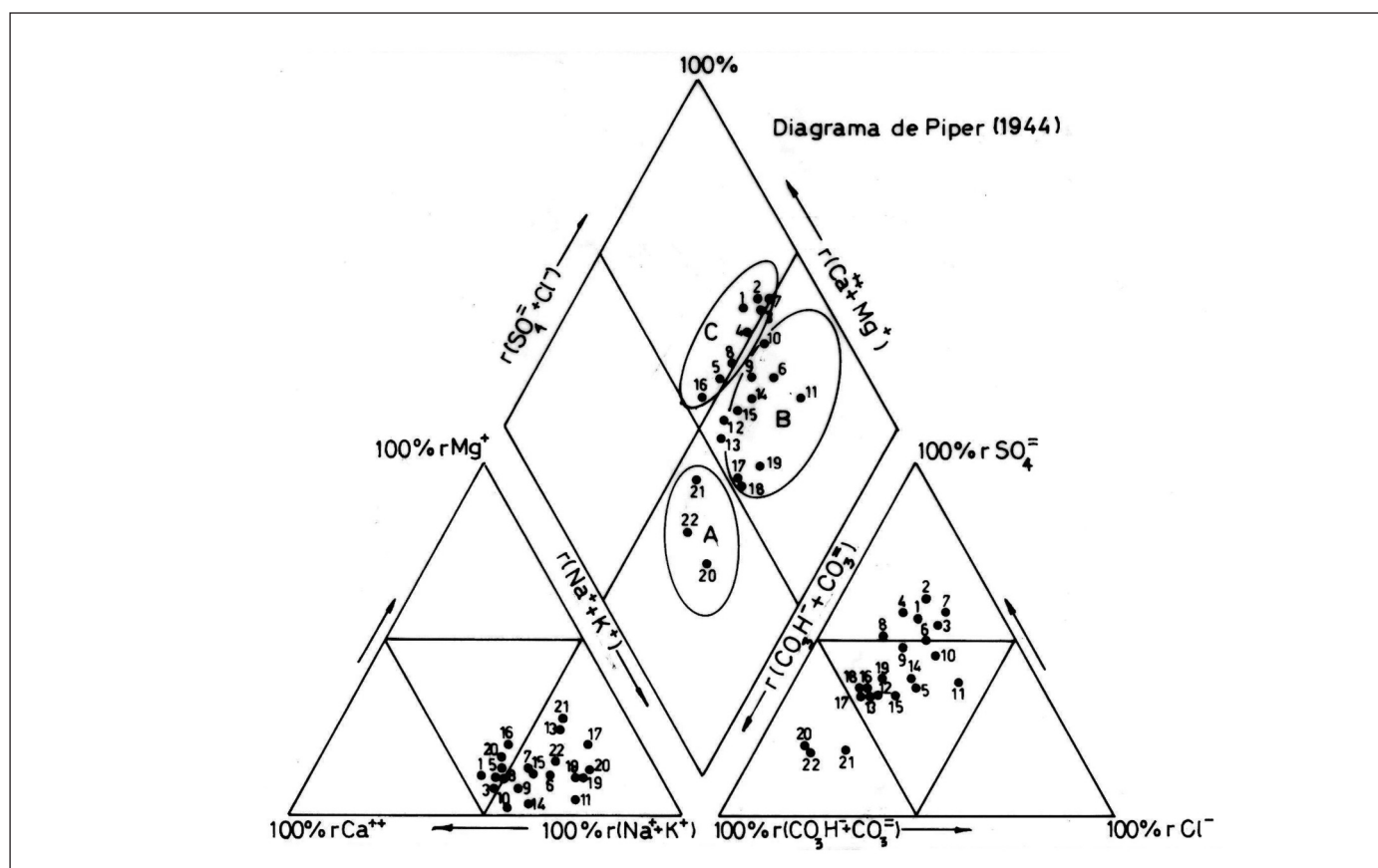


Figura 4. Diagrama de Piper (1944) en donde se percibe tres tipos de aguas de diferentes composiciones químicas que imperan en el subsuelo de la ciudad de Santiago del Estero

Figure 4. Water analyses plotted on a Piper Diagram (1944) showing three types of water with different chemical compositions prevailing in Santiago del Estero City's subsoil

| Miliequivalentes en porcentajes | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|--|-----------------------------------|--------------------|--------------------|----------|-----------|
| Nº de muestra | rSO ₄ ⁻ | r Cl ⁻ | rCO ₃ ²⁻ +CO ₃ H ⁻ | r Na ⁺ +K ⁺ | r Ca ⁺⁺ | r Mg ⁺⁺ | Σaniones | Σcationes |
| 1 | 55,64 | 21,85 | 22,49 | 44,90 | 44,30 | 10,70 | 21,78 | 21,76 |
| 2 | 61,32 | 22,05 | 16,62 | 46,34 | 36,13 | 17,51 | 27,07 | 27,12 |
| 3 | 54,20 | 28,44 | 17,20 | 48,96 | 42,53 | 8,49 | 25,52 | 25,50 |
| 4 | 57,68 | 24,55 | 17,75 | 48,88 | 36,93 | 14,18 | 27,64 | 27,61 |
| 5 | 34,22 | 38,06 | 27,77 | 47,99 | 40,91 | 11,09 | 11,98 | 12,71 |
| 6 | 50,05 | 27,23 | 22,70 | 61,43 | 28,53 | 10,03 | 20,47 | 22,47 |
| 7 | 57,49 | 28,17 | 14,43 | 49,66 | 33,29 | 17,03 | 26,87 | 26,88 |
| 8 | 51,02 | 31,35 | 17,61 | 50,45 | 39,53 | 10,01 | 23,26 | 23,27 |
| 9 | 47,94 | 28,22 | 23,83 | 56,34 | 36,36 | 9,838 | 21,15 | 21,17 |
| 10 | 46,74 | 31,24 | 22,01 | 54,16 | 43,26 | 2,57 | 19,65 | 20,91 |
| 11 | 36,92 | 20,43 | 42,62 | 70,82 | 23,65 | 5,527 | 7,717 | 7,526 |
| 12 | 32,75 | 23,64 | 43,60 | 55,60 | 31,51 | 12,88 | 8,458 | 8,408 |
| 13 | 32,83 | 23,88 | 43,27 | 58,15 | 24,08 | 17,93 | 9,197 | 9,01 |
| 14 | 39,54 | 29,34 | 31,11 | 59,20 | 35,98 | 4,82 | 15,646 | 15,563 |
| 15 | 35,93 | 32,45 | 31,60 | 56,42 | 31,84 | 11,73 | 16,57 | 16,329 |
| 16 | 34,90 | 22,72 | 42,37 | 46,52 | 33,16 | 20,30 | 9,670 | 9,437 |
| 17 | 30,17 | 17,40 | 52,43 | 66,37 | 20,36 | 13,27 | 5,660 | 5,65 |
| 18 | 34,20 | 19,23 | 46,56 | 68,57 | 21,48 | 11,93 | 8,344 | 8,379 |
| 19 | 39,31 | 21,51 | 39,17 | 69,54 | 19,36 | 11,08 | 8,368 | 8,262 |
| 20 | 20,01 | 12,10 | 67,89 | 70,2 | 17,30 | 12,50 | 7,366 | 7,371 |
| 21 | 23,12 | 18,88 | 58,00 | 57,02 | 27,40 | 15,58 | 7,418 | 7,420 |
| 22 | 18,60 | 14,80 | 66,6 | 62,31 | 23,18 | 14,51 | 7,512 | 7,510 |

Tabla 1. Censo de pozos de la ciudad de Santiago del Estero para el año 2.008

Table 1. Census of pumping well systems in Santiago del Estero City for year 2.008

la zona de recarga queda identificada por la curva de residuo seco de 350 mg/L, de tal manera que la isolínea se ubica siguiendo una franja paralela al río Dulce. La zona de recarga o ápice del abanico, se caracteriza por ofrecer una elevada porosidad eficaz como consecuencia de que en ese punto se encuentran las máximas permeabilidades y la relación entre ambos parámetros es directa por lo que se presume que al tener una elevada porosidad, es también el área de máxima infiltración de las aguas del río Dulce, que es el único cuerpo de agua superficial que recarga a los acuíferos infra-yacentes (Figura 5).

B) Aguas Sulfatadas Sódicas: ocupan la parte central de la ciudad y se caracterizan por poseer buenos rangos de potabilidad, pero están sujetas a una posible vulnerabilidad por el avance de la cuña salina. En general se identifican porque el residuo

seco varía entre los 570 mg/L y los 1.500 mg/L y se las utilizan para todo uso pero preferentemente para la ingestión humana (Figura 5).

C) Aguas Sulfatadas Cálcicas: En el labio ascendido de la falla de Huyamampa, se encuentran las arcillas verdes del Mioceno medio y tienen en toda su extensión tanto horizontal como vertical, elevados contenidos de yeso y anhidrita, por tal motivo sus aguas disponen de grandes concentraciones de sulfato que superan holgadamente los 4.000 mg/l. Windhausen (1931), indica que la ingresión marina del paranaense (IMP) fue la de mayor extensión ocurrida durante el Cenozoico en territorio argentino; penetró desde el océano Atlántico y cubrió el 70% de la superficie en la provincia de Santiago del Estero, de tal manera que dejó vastos espesores de arcillas yesíferas, también denominadas como facies de fangos verdes azulados. Por tal motivo, los

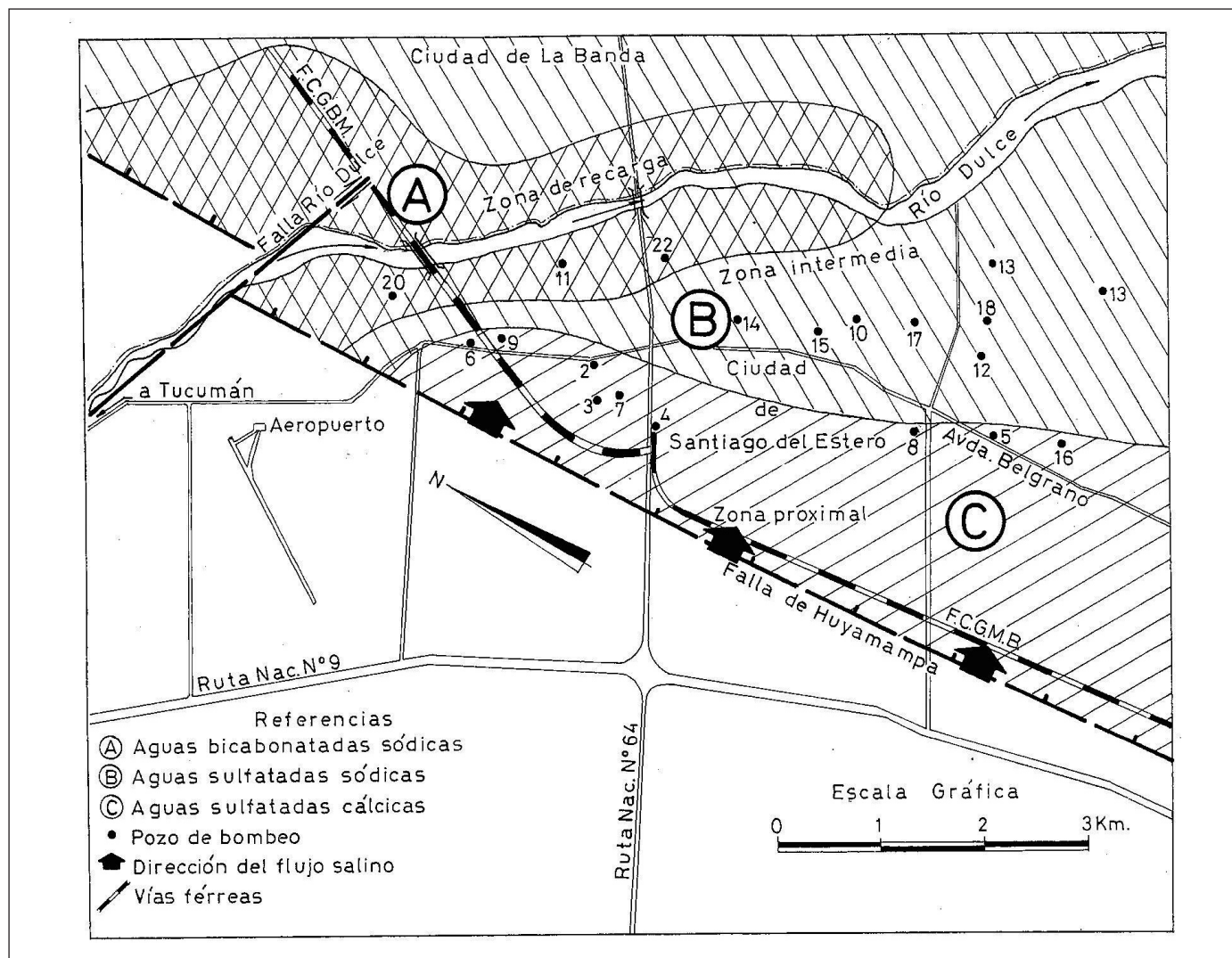


Figura 5. Mapa esquemático de la ciudad de Santiago del Estero, en donde se advierte tres tipos de agua que imperan en el subsuelo: A) Aguas Bicarbonatadas Sódicas que corresponden a la zona de recarga, B) Aguas Sulfatadas Sódicas de la zona intermedia y C) Aguas Sulfatadas Cálcicas de fuerte mineralización en la zona proximal a la falla de Huyamampa

Figure 5. Hydrochemicals facies of Santiago del Estero City where three types of water are present in the subsoil: a) sodium bicarbonate waters corresponding to the recharging area; b) sodium sulphate waters in the intermediate zone; and c) calcic sulphate waters with strong mineralization in the area next to the Huyamampa Fault

pozos que se encuentran ubicados en la zona proximal y cercanos a la falla de Huyamampa, adquieren una acrecentada salinización debido al pasaje sostenido de sulfatos a través del plano de falla (área semipermeable) y su desplazamiento originado por el bombeo provoca una contaminación creciente en los depósitos de gran permeabilidad. Además, se puede observar en la Figura 5, que el borde salino se ha aproximado enérgicamente hacia el centro de la ciudad, ya que el movimiento de las aguas subterráneas está inducido por la sobreexplotación de los pozos que se encuentran cercanos a la fractura

debido a la mayor dinámica que adquieren las aguas subterráneas.

Detección del tiempo de contaminación por sulfatos en los pozos de bombeo

Para la confección de la Figura 6, se ha utilizado el pozo N° 2 (ex 35) del Barrio Centenario, cuyos valores de sulfatos se encuentran consignados en la Tabla 2, lo cual posibilitó confeccionar dicha figura. En el diagrama, se colocó en el eje de las ordenadas el conte-

| fecha | C.E. en $\mu\text{S}/\text{cm}$ | Residuo Seco en mg/l | Dureza en mg/l | Alcal. en mg/l | Ca^{++} en mg/l | Mg^{++} en mg/l | Na^+ en mg/l | K^+ en mg/l | HCO_3^- en mg/l | $\text{CO}_3^{=}$ en mg/l | Cl^- en mg/l | $\text{SO}_4^{=}$ en mg/l |
|----------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|--|---------------------------------------|--------------------------------------|--|---|---------------------------------------|---|
| 10/05/01 | 1570 | 1150 | 401 | 226 | 132 | 16 | 177 | 30 | 275 | 0 | 176 | 337 |
| 10/02/03 | 1802 | 1290 | 403 | 215 | 126 | 21 | 202 | 62 | 260 | 0 | 205 | 403 |
| 5/11/04 | 1828 | 1424 | 474 | 251 | 151 | 23 | 255 | 7 | 306 | 0 | 205 | 477 |
| 11/12/04 | 1906 | 1482 | 479 | 282 | 143 | 29 | 264 | 14 | 344 | 0 | 223 | 456 |
| 2/16/05 | 1960 | 1540 | 509 | 252 | 190 | 8 | 270 | 15 | 307 | 0 | 242 | 502 |
| 11/05/05 | 1960 | 1380 | 489 | 246 | 141 | 33 | 208 | 9 | 300 | 0 | 52 | 610 |
| 11/08/05 | 1936 | 1335 | 477 | 255 | 154 | 22 | 205 | 12 | 310 | 0 | 66 | 566 |
| 4/03/06 | 1890 | 1255 | 472 | 256 | 147 | 25 | 198 | 13 | 312 | 0 | 219 | 341 |
| 5/05/06 | 1879 | 1230 | 412 | 236 | 138 | 16 | 198 | 12 | 287 | 0 | 73 | 500 |
| 11/09/06 | 1882 | 1429 | 477 | 256 | 135 | 33 | 255 | 11 | 312 | 0 | 212 | 473 |
| 5/04/07 | 1745 | 1453 | 490 | 253 | 154 | 25 | 255 | 12 | 306 | 0 | 212 | 487 |

Tabla 2. Contenido de sulfato del pozo N° 2 (ex 35) y su relación con el tiempo de bombeo
Table 2. Sulphate content in the pumping well N° 2 and relation with the pumping time

nido en sulfatos (mg/L) y en las abscisas el tiempo (años) y por la sucesión de los diferentes puntos quedó configurada una recta. Este diagrama tiene la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\text{SO}_4^{2-} - b}{\text{tg } \alpha} \quad (1)$$

Donde:

SO_4^{2-} = Contenido máximo de sulfato permitido por la Organización Mundial de la Salud en mg/L para las aguas de bebidas, cuyo valor es 400 mg/L .

b = 20 mg/L = Distancia existente entre la recta y el eje de las abscisas.

$\text{tg } \alpha$ = 50,52 (mg/L)/año

t = Tiempo en años.

Pero, es importante destacar que el pozo N° 2 (ver ubicación del pozo en la Figura 5) está funcionado desde el mes de Diciembre del año 1996, de tal manera que se detectó que a partir del año 1998 (punto A), aumentaba sostenidamente el sulfato comenzando con 115 mg/L y los puntos A, B, C y D permitieron trazar la recta hasta el punto (E), de tal manera que se ha utilizado la fórmula (1):

$$t = \frac{400\text{mg/l} - 20\text{mg/l}}{50,52 \frac{\text{mg/l}}{\text{año}}} = 7,52\text{años}$$

Pero es importante destacar que este método se basa en los siguientes supuestos y generalidades:

a) Entre los punto (A) y (E) del diagrama de la Figura

6, el caudal del pozo se mantuvo constante, debido a que no se había producido el cambio de la electrobomba sumergible y además, no existía interferencia de conos de depresión con los pozos cercanos.

- b) El muestreo físico – químico fue sistemático, de tal manera que permitió obtener una adecuada información referente al contenido de sulfato, cuyos valores se encuentran consignados en la Tabla 2.
- c) Se ha comprobado en una serie de pozos que se encuentran ubicados paralelos a la fractura de Huyamampa, que todas las pendientes tienen el mismo valor de 50,52 $\text{mg}/\text{L}/\text{año}$.
- d) Se ha podido predecir el tiempo que tardó en contaminarse la perforación N° 2 el cual fue de 7,5 años, hasta alcanzar el límite máximo permitido de sulfato que es de 400 mg/L , según la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- e) De acuerdo al tiempo calculado (de 7,5 años) y al medirse la distancia existente entre el pozo de bombeo y la falla de Huyamampa que es de 1.150 m, se ha podido calcular la velocidad promedio de la interfase agua dulce – agua salada, que fue de 152,9 $\text{m}/\text{año}$.

Detección rápida del ión sulfato

Como consecuencia de que se ha producido en estos últimos 15 años un crecimiento exponencial de la población, se han generado intensos bombeos de los pozos que se encuentran ubicados en la ciudad capital, y por esta causa empeoró notablemente la calidad

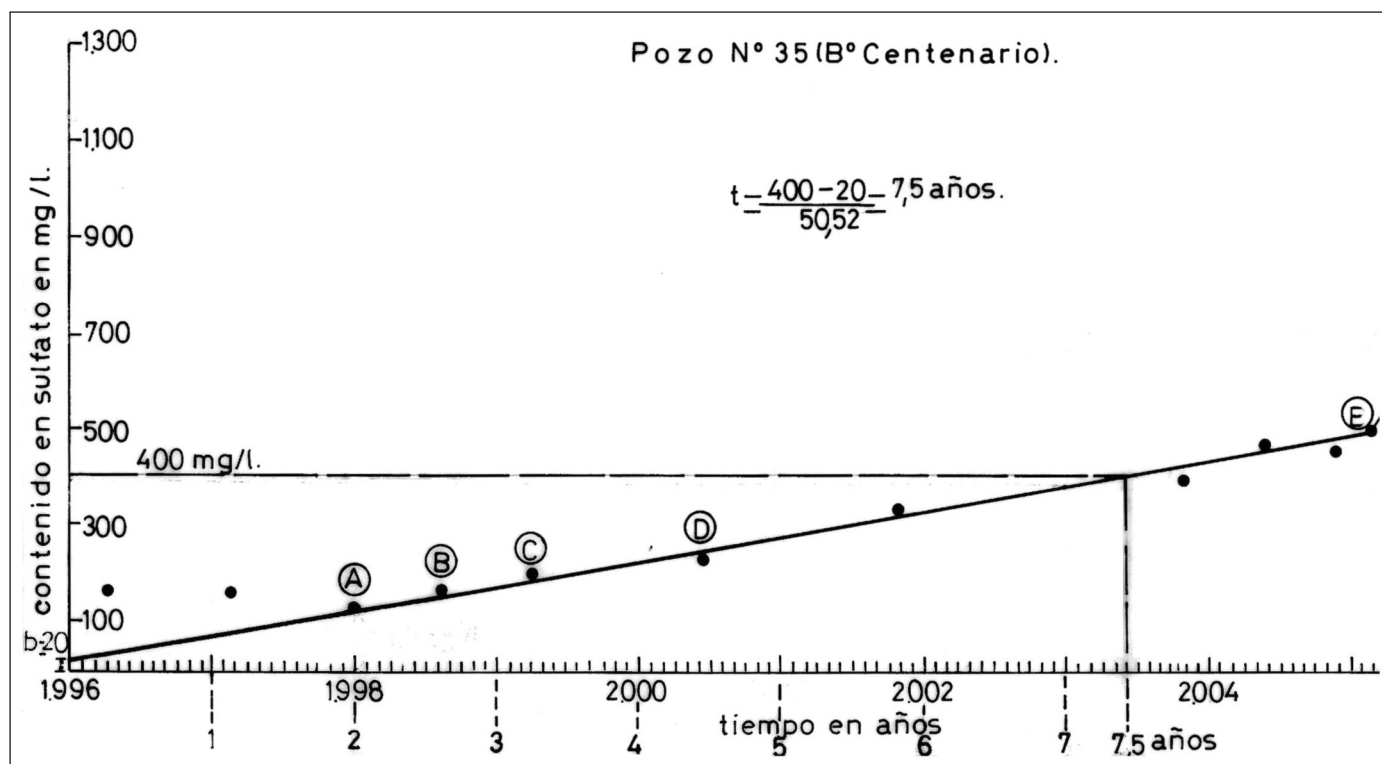


Figura 6. Pozo de bombeo N° 2 (ex 35) del Barrio Centenario, en donde se ha medido el tiempo de contaminación que es de 7,5 años
 Figure 6. Pumping well N° 2 (ex 35) in "Barrio Centenario" where the 7.5-year contamination time was measured

química del agua subterránea debido a una severa concentración de los sulfatos y a un aumento considerable de la conductividad eléctrica. Pero, es importante destacar que los monitoreos llevados a cabo mediante análisis físico – químicos seriados no han tenido hasta ahora una respuesta rápida, en razón de que se debe recoger las muestras, acondicionarlas, trasladarla al laboratorio, depositarlas y esperar el correspondiente turno para analizadas, de tal manera que a la postre se pierden alrededor de 7 a 9 días como mínimo para la ejecución del análisis. Por tal motivo, se necesita una solución expeditiva a los problemas de las altas concentraciones de los sulfatos y si el contenido en el agua supera los 250 mg/L, adquiere un sabor amargo que es bastante desagradable y además, no quita la sed.

Por otra parte, la disolución de agua con altas concentraciones de sulfatos, mezcladas con agua dulce dentro de la red de distribución, puede ayudar a evitar inconvenientes de diarreas y deshidratación. Pero el problema se presenta cuando el pozo de agua dulce se detiene debido a frecuentes cortes de corriente en el verano y, se envía al sistema interconectado, agua con elevados contenidos en sulfatos, de tal manera que no se produce la combinación

esperada; por tal motivo se engendran severos problemas de disentería de difícil solución. En ese sentido, los controladores que se encuentran en "boca de pozo" pueden aplicar el método de la Figura 7, que consiste en tomar la conductividad eléctrica (CE) en $\mu\text{S/cm}$ mediante un conductímetro portátil, posteriormente se debe realizar una corrección de la temperatura y una vez obtenida la conductividad eléctrica corregida, se procede a aplicar la fórmula (2). Además, la Tabla 3, ha permitido ejecutar la figura 7, cuya ecuación corresponde a una parábola:

$$Y = X^2/p$$

reemplazando, se tiene:

$$SO_4^{2-} = \frac{(C.E.)^2}{P} \quad (2)$$

Donde:

C.E. = Conductividad Eléctrica en $\mu\text{S/cm}$

K = Constante medida es de 8.203,2 ($\mu\text{S/cm}^2$)/(mg/L)

SO_4^{2-} = Concentración de sulfatos en mg/L.

Ejemplo: Se ha medido la conductividad eléctrica

correspondiente al mes de Mayo del año 2.009 en el pozo N° 2 (ex 35) que fue de 1.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se desea determinar en forma expeditiva la concentración de sulfatos, aplicando la (2):

$$SO_4^{2-} = \frac{(C.E)^2}{K} = \frac{(1.800)^2 (\mu\text{S}/\text{cm})^2}{8.750 \frac{(\mu\text{S}/\text{cm})^2}{\text{mg/l}}} = 370,2 \text{ mg/l}$$

Tal se puede recurrir a la Figura 7, de manera que se coloca 1.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el eje de las abscisas, se traza una vertical hasta que toque la curva y posteriormente se esboza una horizontal, hasta encontrar la concentración de sulfatos que es de 370 mg/l, de tal manera que le permita al encargado de la instalación, detener el pozo de bombeo de acuerdo a los tenores que presenta.

Ensayos de bombeo en la zona de recarga

La fórmula de Theis (1935) de no equilibrio, fue la primera que tuvo en cuenta el tiempo de bombeo y su aplicación constituyó un avance significativo en el campo de la hidráulica subterránea. Por tal motivo, los parámetros hidráulicos del acuífero se pueden determinar a partir de las mediciones de tiempo vs. abatimiento realizadas con un solo pozo de observación, en ves de utilizar dos o más pozos de observación como lo exigen cualquiera de las fórmulas de equilibrio. El pozo de bombeo ensayado está ubicado en las márgenes del río Dulce en la zona de recarga y tiene un diámetro de 305 mm (12 pulgadas) y 20 metros de filtros ranura continua que están insertado en la cuña gravosa, bombea un caudal de 220 m^3/hora y el pozo de observación está ubicado a 178,3 metros del pozo de bombeo que se encuentra implantado en el mismo acuífero. En base a los datos obtenidos en el pozo de observación que figuran en la Tabla 4, se confeccionó la Figura 8 que tiene dos valores de fundamental importancia:

ΔS = inclinación de la recta, expresada por la variación de la depresión tomada entre dos instan-

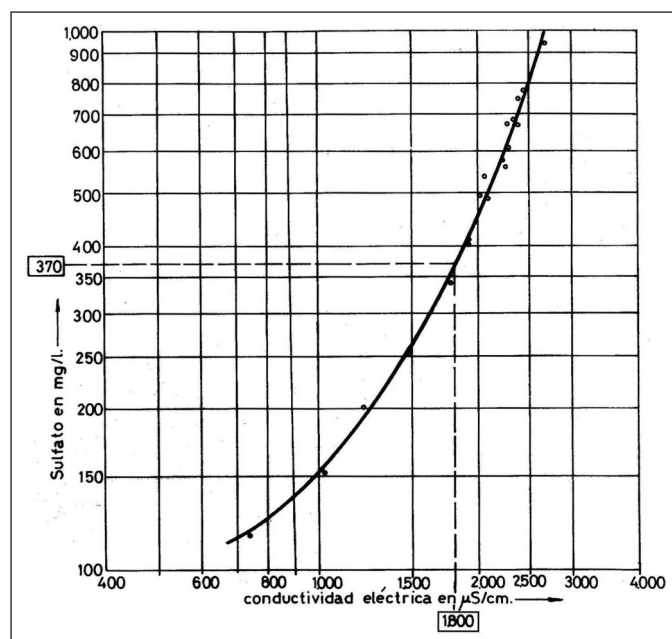


Figura 7. Relación existente entre el sulfato y la conductividad eléctrica que se observan en las muestras de agua de la ciudad de Santiago del Estero

Figure 7. Existing relation between sulphate and electrical conductivity observed in water samples taken in Santiago del Estero City

tes cualesquiera cuya relación sea 10 (un ciclo logarítmico). En este caso $\Delta S = 0,89$ metros, que es la variación de depresión entre 10 minutos y 100 minutos.

T_0 = Tiempo correspondiente a la intersección de la prolongación de la recta del diagrama con la horizontal de la depresión cero, en días. Para el caso considerado se tiene:

$$t_0 = \frac{2,2}{1.440} = \text{días}$$

1º) Se calcula la transmisividad en base al gráfico de depresión Vs. tiempo, según Jacob (1963)

$$T = \frac{4,4 \times Q}{\Delta S} = \frac{4,4 \times 220 \text{ m}^3/\text{h}}{0,89 \text{ m}} = 1.087,6 \text{ m}^2/\text{d}$$

| | | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|-------|-------|---------|---------|---------|
| CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 1.000 | 1250 | 1635 | 1900 | 2100 | 2250 | 2400 | 2500 |
| SO_4^{2-} mg/L | 152 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| K en $\frac{(\mu\text{S}/\text{cm})^2}{(\text{mg/L})}$ | 6.578,9 | 7.812,5 | 8.910,7 | 9.025 | 8.820 | 8.437,5 | 8.228,6 | 7.812,5 |

Tabla 3. Parámetros matemáticos de una parábola
Table 3. Mathematical parameters of a parabola

| Tiempo de Bombeo (min) | Profundidad del agua (m) | Depresión (m) | Caudal de Bombeo (m³/hora) | Conductividad (μS/cm) |
|------------------------|--------------------------|---------------|----------------------------|-----------------------|
| 0,00 | 8,830 | 0,000 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 1 | 8,905 | 0,075 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 2 | 8,970 | 0,140 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 3 | 9,030 | 0,200 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 4 | 9,130 | 0,300 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 6 | 9,225 | 0,395 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 8 | 9,320 | 0,490 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 10 | 9,400 | 0,570 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 15 | 9,550 | 0,720 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 20 | 9,665 | 0,835 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 30 | 9,082 | 0,990 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 40 | 9,935 | 1,105 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 60 | 10,10 | 1,270 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 90 | 10,27 | 1,440 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 120 | 10,36 | 1,530 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 150 | 10,435 | 1,605 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 180 | 10,50 | 1,670 | 220 m³/hora | 677μS/cm |
| 200 | 10,50 | 1,670 | 220 m³/hora | 677μS/cm |

Tabla 4. Depresiones y tiempo medidos en el pozo de observación que se encuentra ubicado a 178,3 metros del pozo de bombeo
 Table 4. Depressions and time measured in the observation well placed at 178.3 meters from the pumping well

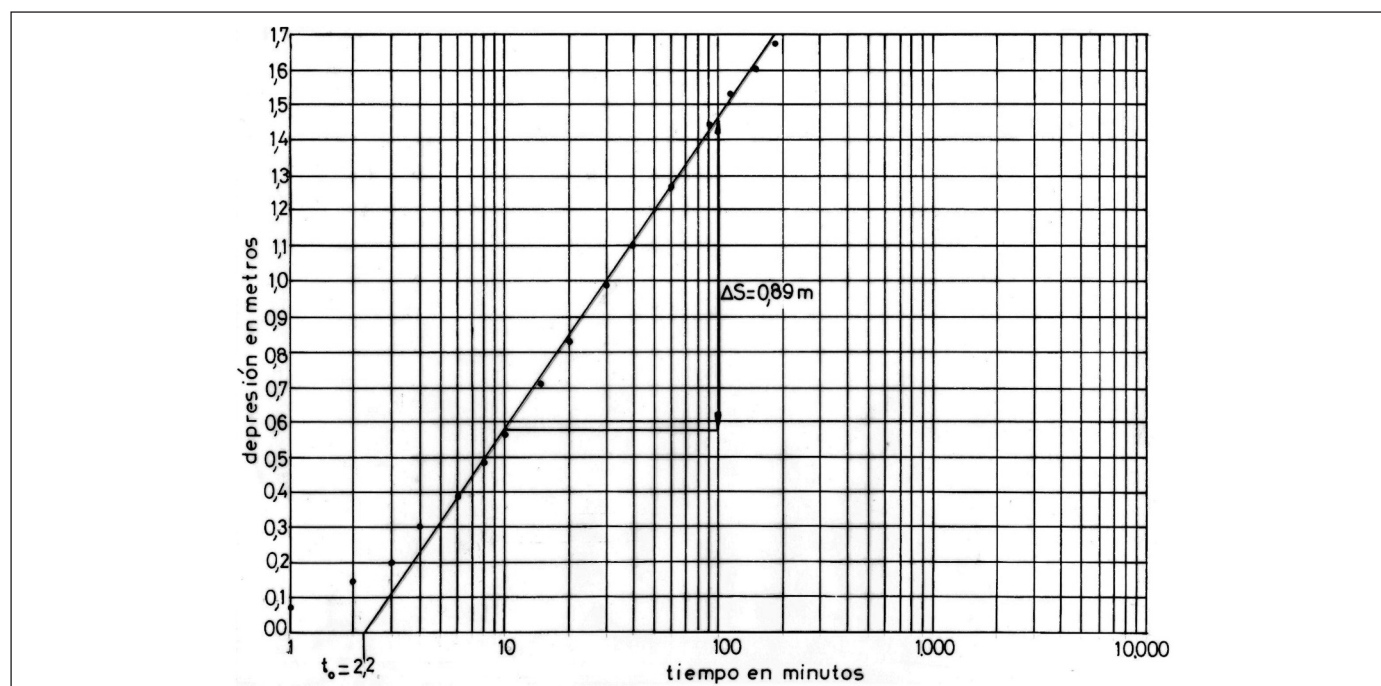


Figura 8. Diagrama de depresiones vs. tiempos para un piezómetro ubicado a 178,3 metros del pozo de bombeo y sirvió para determinar los parámetros hidráulicos de la cuña gravosa
 Figure 8. Depression diagram vs. Time according to a piezometer reading placed 178.3 meters from the pumping well used to determine the hydraulic parameters in the gravelly wedge

2º) Se calcula el coeficiente de almacenamiento (S) en base al gráfico de depresión Vs. tiempo.

$$S = \frac{2,25 \times T \times t_0}{r^2} = \frac{2,25 \times 1.087,6 \text{ m}^2/\text{d} \times 2,2}{(178,3)^2 \text{ m}^2} \times \frac{2,2}{1.440} = 1,19 \times 10^{-4}$$

Donde:

t = Tiempo desde la iniciación del bombeo en días.

t₀ = Tiempo correspondiente a la intersección de la prolongación de la recta depresión - tiempo con la depresión cero, en días.

r = Distancia desde el eje del pozo de bombeo hasta el lugar donde se toma la depresión, en metros.

Q = Caudal en m³/hora.

T = Transmisividad en m²/día.

ΔS = inclinación de la recta, expresada por la variación de la depresión tomada entre dos instantes cualesquiera cuya relación sea 10 (un ciclo logarítmico).

S = Coeficiente de almacenamiento (adimensional).

Recarga inducida por el bombeo en la cuña gravosa (acuífero II) del abanico aluvial del río Dulce

Los parámetros obtenidos por el método de Jacob (1963) de transmisividad (m²/d) y coeficiente de almacenamiento, han permitido utilizar el diagrama de Jenkins (1968) de la Figura 9, de tal manera que se ha determinado el volumen bombeado que procede del río durante 365 días.

Primero se calcula el valor sdf, sabiendo que la transmisividad es de 1.087,6 m²/d, el Coeficiente de almacenamiento = 1,19 x 10⁻⁴, el tiempo es de 365 (1 año) y la distancia entre el pozo de bombeo y el río es de 3.200 metros. De tal manera que se reemplaza en la siguiente fórmula:

$$sdf = \frac{t \times T}{a^2 \times S} = \frac{365 \text{ d} \times 1.087,6 \text{ m}^2/\text{d}}{(3.200)^2 \text{ m}^2 \times 1,19 \times 10^{-4}} = 32,3$$

Donde:

t = Tiempo desde que comenzó el bombeo en días.

a = Distancia del pozo al río en metros.

T = Transmisividad en m²/d.

S = Coeficiente de almacenamiento (adimensional)

Una vez obtenido el valor de 32,3, se lo ubica en el eje de las abscisas del diagrama de Jenkins (1963) de

la Figura 9. Posteriormente se traza una vertical hasta interceptar a las curvas A y B, subsiguientemente se traza una horizontal y se obtienen el siguiente valor:

$$\frac{q}{Q} = 0,897(\text{Curva A}), \text{ despejando } q = 0,897 \times 5.280 \text{ m}^3/\text{d} = 4.736,1 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\frac{V}{Q \times t} = 0,81(\text{Curva B}), \text{ despejando } V = 0,81 \times 365 \text{ d} \times 5.280 \text{ m}^3/\text{d} = 1.561.032 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\% = \frac{1.561.032}{5.280 \text{ m}^3/\text{d} \times 365 \text{ d}} = \frac{1.561.032}{1.927.200} = 0,81 \times 100 = 81\%$$

Donde:

Q = Caudal de bombeo en m³/día

q = Disminución del caudal en el río en m³/día.

t = Tiempo desde que comenzó el bombeo en días.

V = Volumen bombeado que procede del río durante 365 días.

Q = Caudal de bombeo en m³/día

Se ha llegado a la conclusión que el 81 % del volumen bombeado procede del río Dulce y el 19 % restante proviene del almacenamiento del propio acuífero. Resumiendo, se puede decir que el acuífero es un mero transmisor de la recarga, de tal manera que al bombearse grandes cantidades de agua procedentes desde de la fuente superficial que es de 4.736,1 m³/d, se evita el avance de la cuña salina. Pero, además, se obtendrán los siguiente beneficios:

- Los pozos que se construyan en el acuífero (II) ubicado entre los 15 y 70 m de profundidad) recibirán agua de una barrera positiva debido a la intercomunicación entre el acuífero y el río.
- Cuando el pozo esté sometido a un bombeo intenso, el cono de depresión llegará al río y se estabilizarán los niveles piezométricos de la perforación, como consecuencia de recibir agua directamente de la fuente (recarga inducida), la cual es de excelente calidad físico - química, tal como se observa en la Tabla 5.

Descensos y perfiles de descensos

Para el acuífero mencionado precedentemente se ha dibujado un gráfico de depresión Vs. tiempo en papel doble - logarítmico. De tal manera que se quiere determinar la depresión que se origina dentro del pozo de bombeo cuando actúa la recarga inducida, sabiendo que el radio del pozo es de r_p = 0,15 m.

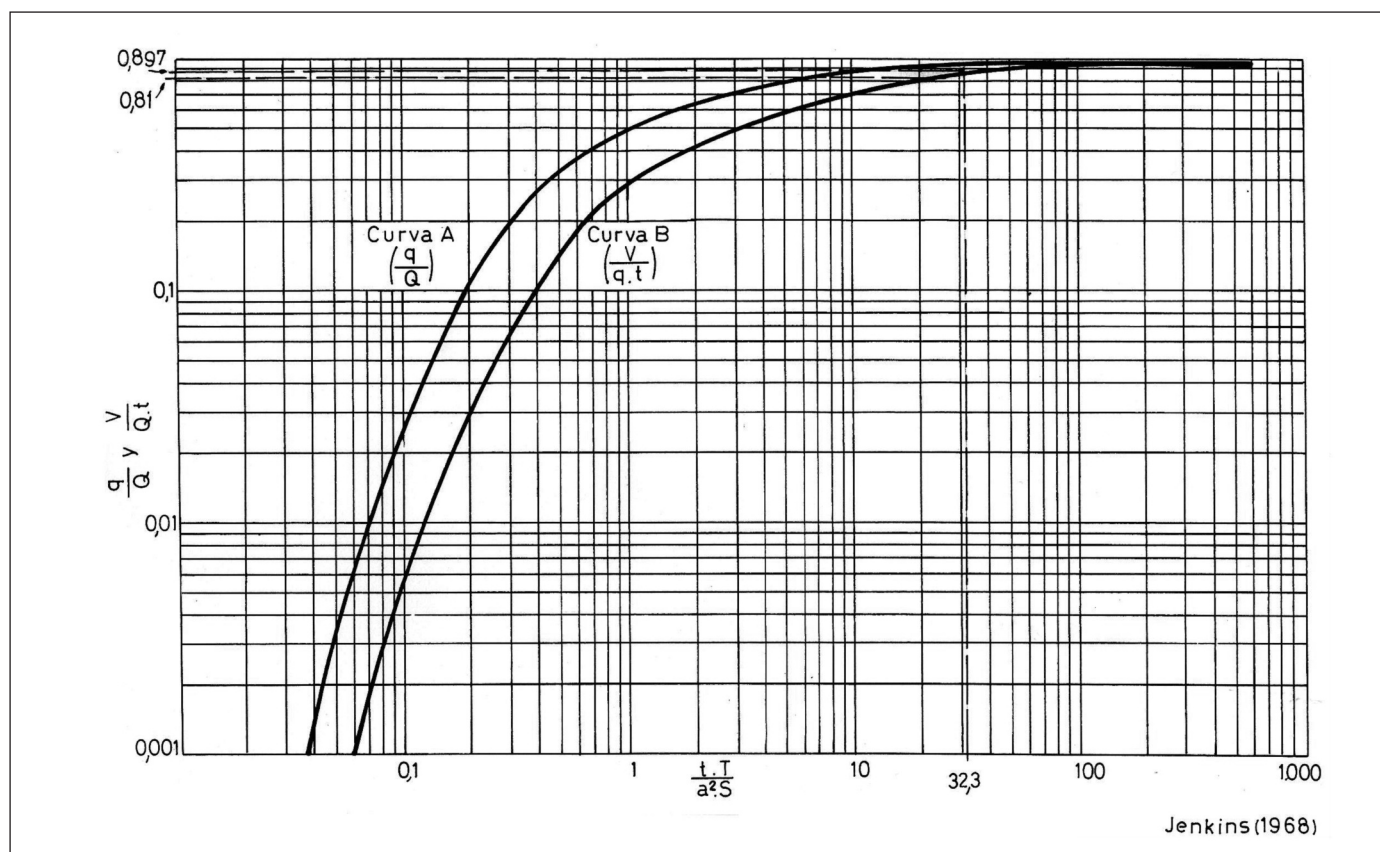


Figura 9. Diagrama de Jenkins (1963) que permite determinar el volumen de agua que aporta el acuífero y el río por recarga inducida
Figure 9. Jenkins diagram (1968) allows determining water volume flowing from the aquifer and from the river by induced recharge

$$u = \frac{1,19 \times 10^{-4} \times (0,15)^2 m^2}{4 \times 1.087,6 m^2 / d \times t} = \frac{2,67 \times 10^{-5} m^2}{4.350 m^2 / día} = \frac{6,15 \times 10^{-9}}{t}$$

$$s = \frac{5.280 m^3 / d}{4 \times 3,14 \times 1.087,6 m^2 / día} \times W_{(u)} =$$

$$\frac{5.280 m^3 / día}{13.660,25 m^2 / día} \times W_{(u)} = 0,386 \times W_{(u)}$$

$$s = 0,386 m \times W_{(u)}$$

Todos los valores de "u", $W_{(u)}$ que se encuentran contenidos en la Tabla 6 para el pozo de bombeo, fueron extraídos de la tabla de Ferris et al (1962), por ejemplo para "u" = $6,15 \times 10^{-7}$ le corresponde un valor de $W_{(u)} = 13,73$. Con los valores de la Tabla 6, se obtiene la curva (A) de la Figura 10, que representa la función de logaritmos depresión Vs. logaritmos de tiempos, como si el cono de depresión no estuviera

influenciado por ningunos de los tipos de barreras, es decir como si fuera un acuífero infinito. De acuerdo a los datos que proporciona la Tabla 7, se puede dibujar la curva B, perteneciente de la Figura 10. Para el pozo imagen de recarga, se calcula el valor de "u" con los siguientes valores:

$$u = \frac{1,19 \times 10^{-4} (2 \times 3.200)^2 m^2}{4 \times 1.087,6 m^2 / d \times t} = \frac{48.742,4 m^2}{4.350 m^2 / d \times día} = \frac{11,2}{t}$$

Para la confección de la curva A + B (barrera negativa), se utiliza la Tabla 8, se suman algebraicamente los valores de depresión de la curva A (Tabla 6), mas los valores correspondientes al pozo imagen de la curva B que pertenecen a la Tabla 7 y se obtiene una curva influenciada por efecto de una barrera negativa, como por ejemplo si se estuviera en presencia de una falla geológica que intercepta al cono de depresión. Para la confección de la curva A - B (ver Tabla 9), se restan algebraicamente los valores de la curva

A de los correspondientes valores de la curva B y se obtiene una curva que representa la estabilización de los niveles como consecuencia de la recarga inducida, tal como lo indica la Figura 10. Esto permite determinar el caudal específico (Q/s_p) del pozo de bombeo, suponiendo que las pérdidas de cargas dentro del pozo de bombeo son despreciables, se aplica la siguiente fórmula:

$$\frac{Q}{s_p} = \frac{4 \times \pi \times T}{W(u)} = \frac{4 \times 3,14 \times 1.087,6 m^2/d}{22,94} = 595,77 m^3/d \times m = 24,82 m^3/h \times m$$

Donde:

- s_p = Depresión producida en el pozo de bombeo, en metros.
 Q = Caudal, en $m^3/hora$.
 T = Transmisividad, en m^2/d .
 X_0 = Distancia desde el pozo de bombeo hasta el borde de recarga, en metros.
 r_p = Radio del pozo de bombeo, en metros.

Cuando el pozo está sometido a un bombeo intensivo, el cono de depresión llegará al río, se estabilizarán los niveles piezométricos en la perforación, como consecuencia de recibir agua directamente de la fuente (ver curva A – B de la Figura 10). Resumiendo, se

| ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE AGUA | | | | | |
|--|------|--------|--|---------------|-------|
| Análisis N°: 777 | | | Nombre del operador: Gobierno de Santiago del Estero | | |
| Muestra N°: Pozo N° 11 | | | Muestra tomada por: Alfredo Martín | | |
| Fuente: Perforación | | | Profundidad de la perforación: 70 m | | |
| Ubicación: Calle Chaco y Avenida Costanera | | | Nivel Piezométrico: - 15 m | | |
| Ciudad de Santiago del Estero | | | Fecha de recolección: 7/07/2.009 | | |
| T. del Aire = 14° C - T. del Agua 22° C | | | Hora: 8 ⁵⁰ | | |
| Color: No contiene | | | C.E.a 25° C: 1.130 μ mhos/cm | | |
| Olor: No contiene | | | Residuo Seco a 105° C: 758 mg/L | | |
| Turbiedad: 0,09 UTN | | | Alcalinidad Total: 230 p.p.m. CO ₃ Ca | | |
| Ph: 7,6 | | | Dureza Total: 259 p.p.m. CO ₃ Ca | | |
| Cationes | mg/L | mq/L | Aniones | mg/L | mq/L |
| Ca ⁺⁺ | 90 | 4,499 | H ⁺ CO ₃ | 290 | 4,754 |
| Mg ⁺⁺ | 16 | 1,3158 | CO ₃ ⁼ | No se detectó | — |
| Na ⁺ | 128 | 5,568 | SO ₄ ⁼ | 140 | 2,912 |
| K ⁺ | — | — | Cl ⁻ | 133 | 3,750 |
| Total | — | 11,38 | Total | — | 11,41 |
| Arsénico ⁺³⁺⁵ : < 0,01 mg/L | | | Clasificación del Agua Subterránea | | |
| Flúor: 0,37 mg/L | | | AGUA HIPOTERMAL DE MINERALIZACIÓN MEDIA, BICARBONATADA SÓDICA | | |
| Hierro: 0,05 mg/L | | | | | |
| Manganeso: 0,11 mg/L | | | | | |
| Nitrato: 1,2 mg/L | | | | | |
| Nitrito: No se detectó | | | Observaciones: | | |
| Cianuro: No se detectó | | | Agua física y químicamente APTA para consumo humano, según los análisis practicados y para la fecha de ejecución de acuerdo a las normas de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y Código Alimentario Argentino (CAA) | | |
| Cobre: No se detectó | | | | | |
| Biocidas: No se detectó | | | | | |
| Amonio: No se detectó | | | | | |

Tabla 5. Análisis físico – químico de un agua extraída del pozo de bombeo N° 11 que se encuentra en la zona de recarga de la ciudad de Santiago del Estero. En él se puede observar que el agua extraída mediante una perforación, indica que la misma tiene excelentes propiedades físico – químicas y el Nitrato y el Nitrito se encuentran por debajo de los tenores exigidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y Código Alimentario Argentino (CAA)

Table 5. Physical -chemical analysis of water obtained from pumping well N° 11 placed in the recharge zone in the city of Santiago del Estero. It is possible to observe that water pumped by perforation has excellent physicochemical properties, and the nitrate and nitrite concentration are below those demanded by the World Health Organization (WHO) and the Argentine Food Code (AFC)

| Tiempo (días) | (u) | $W_{(u)}$ | s (m) |
|---------------|--|----------------------|-------|
| 0,1 | $6,15 \times 10^{-9} / 0,1 = 6,15 \times 10^{-7}$ | $13,73 \times 0,386$ | 5,29 |
| 1 | $6,15 \times 10^{-9} / 1 = 6,15 \times 10^{-9}$ | $16,03 \times 0,386$ | 6,18 |
| 10 | $6,15 \times 10^{-9} / 10 = 6,15 \times 10^{-10}$ | $18,33 \times 0,386$ | 7,07 |
| 100 | $6,15 \times 10^{-9} / 100 = 6,15 \times 10^{-11}$ | $20,64 \times 0,386$ | 7,96 |
| 1.000 | $6,15 \times 10^{-9} / 1.000 = 6,15 \times 10^{-12}$ | $22,94 \times 0,386$ | 8,85 |

Tabla 6. Curva A. Curva de descensos Vs. tiempo, para un pozo como si el mismo estuviera en un acuífero infinito

Table 6. Curve A. Descending curves Vs. Time, in a pumping well as if it were in an infinite aquifer

| Tiempo (días) | (u) | $W_{(u)}$ | s (m) |
|---------------|-------------------------|----------------------|-------|
| 0,1 | $11,2 / 0,1 = 112$ | $0,000 \times 0,386$ | 0,000 |
| 1 | $11,2 / 1 = 11,2$ | $0,186 \times 0,386$ | 0,071 |
| 10 | $11,2 / 10 = 1,12$ | $1,73 \times 0,386$ | 0,667 |
| 100 | $11,2 / 100 = 0,112$ | $3,94 \times 0,386$ | 1,520 |
| 1.000 | $11,2 / 1.000 = 0,0112$ | $6,23 \times 0,386$ | 2,400 |

Tabla 7. Curva B. Curva de ascensos y descensos provocados por el pozo imagen

Table 7. Curve B. Ascending and descending curves provoked by the image well

obtienen caudales específicos excepcionales de 24,82 m³/h x m de depresión.

Relación existente entre el coeficiente de uniformidad (Cu), la permeabilidad y la profundidad

El coeficiente de uniformidad (CU) en la cuña gravosa aumenta en el área de fuente y su granulometría se llama uniforme cuando el (CU) varía entre 1 y 2 y heterométrica cuando el (CU) se ubica entre 2 y 5 (ver Figura 11). Estadísticamente el coeficiente de uniformidad (d_{40}/d_{90}), cuando tiene la tendencia de acercarse a uno, representa la máxima porosidad e indica que la geometría de la cuña gravosa permite filtrar elevados volúmenes de agua a los niveles inferiores. La Figura 11 muestra que las permeabilidades, disminuyen con la profundidad y las comparaciones de los datos presentados aquí demuestran que la permeabi-

lidad de los acuíferos profundos, también disminuye conjuntamente con el coeficiente de uniformidad (CU). Ejemplo: Para una profundidad de 62 m, se desea saber: 1º) el coeficiente de uniformidad (CU), y 2º) la permeabilidad (m/d) que tiene un estrato constituido por arenas gruesas y gravas. Por tal motivo, se recurre al diagrama de doble entrada de la Figura 11, y en eje de las ordenadas, se coloca los 62 m y se traza una horizontal hasta interceptar la recta, posteriormente se esboza una vertical hasta interceptar las abscisas en donde se encuentra el valor del coeficiente de uniformidad (CU) que es de 3,2. Para determinar el valor de la permeabilidad, se esboza una horizontal que parte de los 62 m de profundidad, hasta interceptar la recta de la relación permeabilidad vs. profundidad y posteriormente se proyecta una vertical hasta interceptar las abscisas en donde se obtiene el valor de la permeabilidad que es de 110 m/día.

| Tiempo (días) | 0,1 | 1 | 10 | 100 | 1.000 |
|---------------|------|-------|-------|------|-------|
| Curva A | 5,29 | 6,18 | 7,07 | 7,96 | 8,85 |
| Curva B | 0,00 | 0,071 | 0,667 | 1,52 | 2,40 |
| Curva A + B | 5,29 | 6,251 | 7,737 | 9,48 | 11,25 |

Tabla 8. Sumatoria de las Curvas A + B por efecto de una barrera impermeable

Table 8. Curve A + B Sumatory by the effect of an impermeable barrier

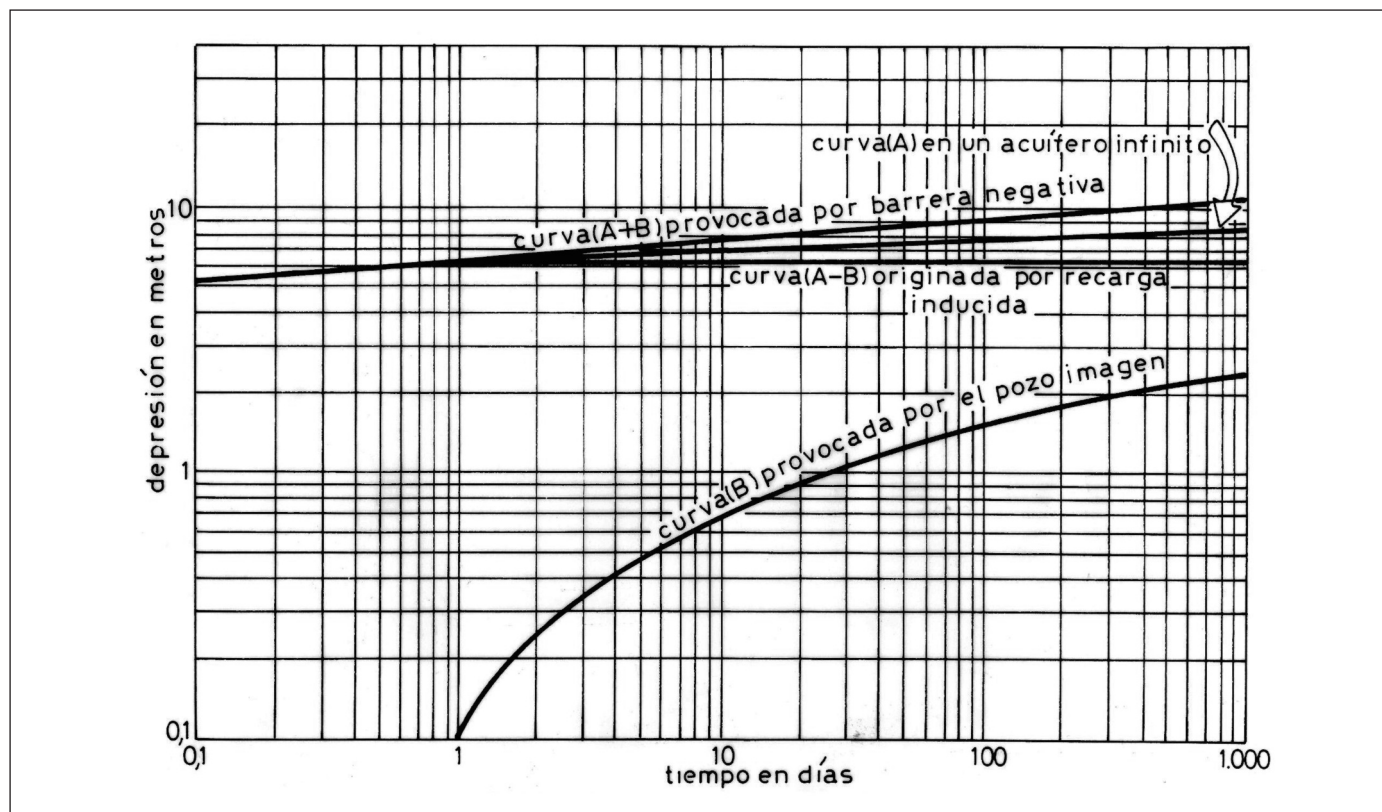


Figura 10. Diagrama doble – logarítmico de depresión Vs. Tiempo para el pozo de bombeo que se encuentra insertado en la Cuña Gravosa ya que el pozo está localizado en las márgenes del río Dulce

Figure 10. Double diagram- logarithmic from the depression vs. Time for the pumping well that is placed in the Gravelly Wedge as the pumping well is located in the Rio Dulce banks

De acuerdo al diagrama de la Figura 11 se extraen los siguientes resultados:

- La permeabilidad del sistema multicasas disminuye con la profundidad (por debajo de los - 85 m) y se debe al peso de los materiales suprayacentes que comprimieron vigorosamente a las capas más profundas, de tal manera que desalojan el agua intersticial y reducen la permeabilidad a valores sorprendentemente bajos (< de 37 m/d).
- En el gráfico de la Figura 11, (profundidad vs. coeficiente de uniformidad) se observa un "quiebre" a entre los - 85 m de profundidad, se engendrará en los acuíferos profundos una disminución de la permeabilidad y aumento del coeficiente de uniformidad que se ubicaría entre 1,2 y 2, lo que denota una mayor homogeneidad de los sedimentos infrayacentes.

Discusión

El crecimiento exponencial de la población que se ha evidenciado en estos últimos 15 años en la ciudad de

Santiago del Estero, es una de las causas del incremento de la contaminación antrópica, debido a que el agua utilizada para fines domésticos e industriales produce la evacuación del mismo volumen pero con sus características físico químicas y bacteriológicas cambiadas, ya que estas mismas aguas se dirigen directamente o indirectamente a la única fuente de recarga que es el río Dulce.

Por tal motivo, fue importante delimitar un área ecológicamente protegida en donde se impedirá la deposición de cualquier tipo de deshecho ya sea biológico o industrial que se pueda alojar en la cuña gravosa. Si bien es cierto que en los análisis físico – químicos (ver Tabla 5) no se detectaron Nitratos y Nitritos, no menos cierto es el hecho que esta zona se tiene que salvaguardar para que se continúe extrayendo agua en condiciones prístinas. En ese sentido la Municipalidad de Santiago del Estero con fecha 17 de Marzo de 1998, sancionó la Ordenanza N° 2.996/98, mediante la cual se crea una zona protegida, denominada "Área de Reserva Hidrogeológica", mediante la cual se prohíbe la eliminación de desechos cloacales, como así también el relleno sanitario de sólidos

| Tiempo (días) | 0,1 | 1 | 10 | 100 | 1.000 |
|---------------|------|-------|-------|------|-------|
| Curva A | 5,29 | 6,18 | 7,07 | 7,96 | 8,85 |
| Curva B | 0,00 | 0,071 | 0,667 | 1,52 | 2,40 |
| Curva A - B | 5,29 | 6,109 | 6,40 | 6,44 | 6,45 |

Tabla 9. Sustracción de las Curvas A – B por efecto de una barrera positiva

Table 9. Subtraction of Curves A- B by the effect of a positive barrier

pertenecientes a las actividades antrópicas que puedan degradar al acuífero. La instauración del “Área de Reserva Hidrogeológica”, como es de suponer, contribuirá en su propósito específico de proteger a los recursos hídricos subterráneos como así también evitará la insumisión de los desechos humanos en la zona de elevada permeabilidad.

Los estudios hidrogeológicos que ha ejecutado Martín (1994), Martín *et al* (1997) y Martín (2000) han permitido determinar la existencia de grandes espesores saturados con agua dulce y su vez con elevados rangos de potabilidad en la *cuña gravosa* (ver Tabla 5), de tal manera que este proyecto pretende contri-

buir con una alternativa concreta para la provisión de agua potable en cantidades considerables y a bajo costo operativo y para su realización, se propone la ejecución de una *batería de pozos* en una zona protegida que disminuya los peligros de contaminación salina y bacteriana, al punto que se inyecte en la red un caudal > de 1.500.000 litros por hora.

Conclusiones

La génesis de la *cuña gravosa* está ligada a la abundante tracción de fondo durante las crecientes, de tal

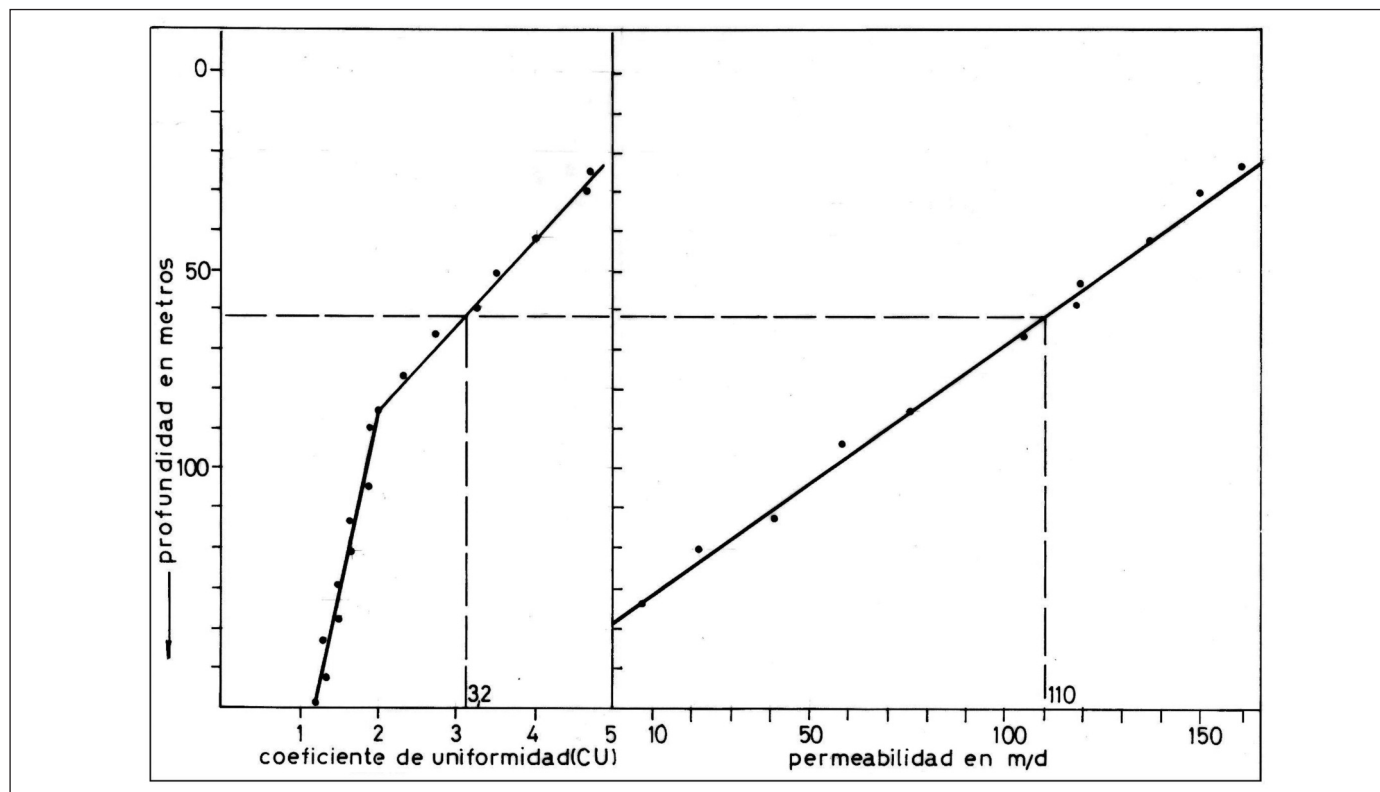


Figura 11. Relación existen entre la profundidad (m), el coeficiente de uniformidad (mm) y la permeabilidad de los acuíferos del abanico aluvial del Río Dulce en Santiago del Estero

Figure 11. Existing relation between depth (m), uniformity coefficient (mm) and permeability in the aquifers of the Rio Dulce alluvial fan in Santiago del Estero

manera que estos cuerpos migran lateralmente y conforman un depósito elongado aguas abajo y paralelo al cauce principal, y la corriente deja un enjambre de paleocanales divagantes y coalescentes que constituyen un conjunto de sedimentos de elevada granulometría. Al ser cuerpos subsuperficiales ubicados entre los -15 y -70 metros de profundidad y por el hecho de tener los granos un elevado diámetro medio (d_{50}), se presentan como estratos de elevada permeabilidad que superan holgadamente los 80 m/d. El acuífero II (cuña gravosa) presenta las siguientes particularidades:

- 1º) Ofrece una elevada permeabilidad producto de la elevada esfericidad de los granos que constituyen los acuíferos.
- 2º) Constituye el elemento de recarga del abanico aluvial del río Dulce.
- 3º) El agua a utilizar mediante los pozos de bombeo es de excelente calidad físico - química y bacteriológica (ver Tabla 5).
- 4º) Las perforaciones someras acelerarían notablemente la recarga y se obtendría un agua limpia, con un escaso contenido salino y libre de gérmenes porque las arenas del acuífero la depurarían bacteriológicamente y a su vez con mejores temperaturas que el agua de la fuente superficial, ya que los estudios llevados a cabo en el área de recarga, indican que todos los pozos obtendrán agua directamente de la fuentes superficial mediante una recarga inducida, porque el 81 % de su caudal será absorbido desde el río y el 19 % restante lo tomarán del acuífero, por tal motivo se evitará el progresivo avance de la cuña salina y no se engendrará deterioro alguno en la calidad físico - química del agua subterránea.
- 5º) Los rendimientos que se obtendrían de los 5 pozos someros de 70 m de profundidad, dispondrán de 20 m de filtro ranura continua en un diámetro de 12", y se obtendría un caudal mínimo de 0,30 m³/seg. (1.080 m³/h) y esta cifra fuertemente significativa, indica la presencia de un cuerpo sedimentario con grandes posibilidades para ser explotado intensamente, debido a que se puede construir un campo de bombeo donde los pozos estén enclavados paralelos al río Dulce e interconectados entre sí por medio de una cañería colectora que permitirá recoger el caudal de cada uno de ellos y enviarlos al sistema interconectado.
- 6º) El modelo hidrogeológico es complejo y el agua retenida en el abanico se caracteriza por presentar las siguientes particularidades: a) en el ápice del abanico, las curvas isopiezas engendran una campana freática propia de áreas de recarga que favorece la expansión de los acuíferos inferiores y

evita el acercamiento del borde salino que se ha percolado a través de la falla de Huyamampa, b) El río Dulce infiltra substanciales volúmenes de agua hacia la cuña gravosa (acuífero II) y éste cuerpo sedimentario facilita la acumulación en los acuíferos inferiores, c) el agua se deposita en las capas infrayacentes que tienen menores permeabilidades estratificadas en sentido vertical, y que se encuentran entre los - 85 y los - 150 m de profundidad, de tal manera que se genera una considerable disminución de los rendimientos de los acuíferos por una severa restricción del tamaño del grano y de los espacios intersticiales (Figura 11), y de estos acuíferos profundos se obtendrían > de 500 m³/h restantes.

- 7º) La reducción granular se debe a una atenuación de la energía en las corrientes de transporte como factor exógeno, y la disminución de los espacios interporales se genera por el peso de los sedimentos suprayacentes como factor endógeno, ambos agentes geológicos originan una severa amortiguación de la permeabilidad en profundidad, d) los acuíferos que constituyen el abanico aluvial del río Dulce, son cuerpos granodecrecientes en profundidad y su piso se ubica en los 150 m (Figura 11), por debajo de esta profundidad continúan las arenas finas, pero con una disminución exponencial del tamaño del grano, lo que haría muy peligrosa la realización de cualquier tipo de captación que involucre a estas capas, debido a que sería imposible contener el paso del grano fino hacia el interior del pozo, y este fenómeno traería aparejado una rigurosa disminución de los caudales a explotar.
- 8º) El método propuesto para la detección temprana del ión sulfato, ha contribuido enormemente a solucionar estos problemas, ya que permite detectar rápidamente el contenido de sulfato que tiene algún pozo problema y se evitan las enfermedades gastrointestinales. El procedimiento, consiste en medir la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) corregida de acuerdo a su temperatura mediante el empleo de un conductivímetro portátil y posteriormente se procede a utilizar la Figura 7. Al punto que el operario, solo tiene que introducir el valor obtenido en el eje de las abscisas y automáticamente determina en el eje de ordenadas el tenor de los sulfatos del agua que extrae el pozo de bombeo. Tan es así que el método fue utilizado en reiteradas oportunidades y ha dado excelentes resultados, además, es económico porque solamente se necesita un conductivímetro que en cualquier laboratorio de análisis químicos se lo puede encontrar y es rápido por que en cuestión de escasos minutos se determina el contenido de sulfato, de tal manera

que el pozo de bombeo puede ser desconectado a la brevedad.

Referencias

- Buitrago, D. 1964. Reconocimiento geológico y agroecológico en la zona de influencia del canal de Santiago del Estero en las provincias de Santiago del Estero y Santa Fe. *Comisión Nacional del Río Bermejo - Publicación N° 99 - AC*.
- Bull; W.B. 1972. Recognition of Alluvial Fans Deposit in Testratigraphic Record. In Hamblin W.K, and Rigby. J.K. *Recognition of ancients Sedimentary Environments Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication* 63-68.
- Castany; G. 1975. *Prospección y Explotación de las Agua Subterráneas*. Ediciones Omega S.A. 674 pp. Barcelona, España.
- Ferris, J.G., Knowles, D.B, Brown, R.H. y Stallman, R.W. 1962. *Theory of Aquifer Tests*, U.S. Geological Survey Water – Supply. Paper 153: 69-174.
- Frengüelli, J. 1920. Contribución al conocimiento de la geología de Entre Ríos. *Boletín de la Academia de Ciencias de Córdoba* 24: 55-57. Cordoba, Argentina.
- Jacob, C.E. 1963. Determining the Permeability of Water – table Aquifers. En *Bentall Method for Determining the Permeability, Transmissibility and Drawdown*. U. S. Geological Survey, Water Supply. Paper 1536 - I. U.S. Geological Survey. Washington. 245 - 271.
- Jenkins, C.T. 1968. Technical for computing rate and volume of stream depletion by wells. *Ground Water*. Vol. 6 - N° 2: 37-46. Washington.
- Martín, A.P. 1994. Hidrogeología del abanico aluvial del río Dulce en las ciudades de Santiago del Estero y La Banda. *XXIV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria. A.I.D.I.S. Tomo II - Diagua N° 44: 22*. Buenos Aires, Argentina.
- Martín, A.P., Storniolo, A.R. y Schejtman, W. 1997. Predicción de los Parámetros Hidráulicos de un Pozo de Bombeo en el Abanico Aluvial del Río Dulce. Primer Simposio Internacional de Hidrología Aplicada, Saneamiento e Impacto Ambiental. *Boletín Geoindustrial*. Año 4 - N° 6-7: 25-29. Tucumán, Argentina.
- Martín, A.P. 2000. *Hidrogeología de la Provincia de Santiago del Estero*. Universidad Nacional de Tucumán. Ediciones del Rectorado de la Universidad Nacional de Tucumán. 7 pp. Tucumán. Argentina.
- OMS 1995. *Guías para la calidad del agua potable*. Segunda Edición. Volumen 1. Recomendaciones. Ginebra - Suiza.
- Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Am. Geophysical Union Trans.* 25: 914 - 923.
- Theis, C.V.1935. The relation between the Lowering of the Piezometric Surface and The Rate and Duration of Discharge of Well Using Ground - Water Storage. *Trans Am Geophysical Union* 16: 516- 524. Washington D.C. EEUU.
- Windhausen, A. 1931. *Geología Argentina*. 2ª Parte: Geología Histórica y Regional del Territorio Argentino. Casa Jacobo Peuser Ltda., 646 pp. Buenos Aires.

Recibido: mayo 2009

Revisado: agosto 2009

Aceptado: agosto 2009

Publicado: diciembre 2009

