

Comportamiento del Sistema Acuífero Guaraní en la frontera uruguayo-brasilera

L. Rodríguez⁽¹⁾, A. Gómez⁽¹⁾, A. Oleaga⁽²⁾, F. Pacheco⁽²⁾, G. Roullier⁽³⁾, N. Seoane⁽³⁾, A. Silva Busso⁽³⁾ y L. Vives⁽⁴⁾

(1) Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, UNL
Ciudad Universitaria, Pje. El Pozo, C.C. 217, Santa Fe, Argentina. Tel/Fax: +54 342 4575233, int. 198.
E-mail: leticia@fich1.unl.edu.ar

(2) Dirección Nacional de Medio Ambiente, DINAMA. Rincón. 575/EP, 11000, Montevideo, Uruguay.

(3) Instituto Nacional del Agua, INA. Empalme J. Newbery, Autopista Ezeiza - Cañuelas km 1.620, Ezeiza, Argentina.

(4) Instituto de Hidrología de Llanuras. CC 44, B7300, Azul, Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) es un reservorio subterráneo transfronterizo distribuido en Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay. El estudio que se presenta se realizó en una región del SAG, de una extensión de 650 km² en la frontera uruguayo - brasilera, centrada en las localidades de Rivera (Uruguay) y Santana do Livramento (Brasil). En dicha zona afloran las areniscas de la Formación Tacuarembó / Rivera que conforman el SAG y como tal, recibe recarga directamente de las precipitaciones, e indirectamente de los basaltos fracturados que la confinan localmente. La piezometría, el análisis geológico/estructural y el análisis hidrogeoquímico, conjuntamente con todos los antecedentes de la zona, se utilizaron para elaborar el modelo conceptual de funcionamiento del sistema. La modelación numérica permitió validar el modelo hidrogeológico conceptual; reproducir el funcionamiento actual del sistema y estimar un valor aproximado de recarga de las areniscas, que resultó de 1,3 mm/año, y 140,2 mm/año sobre basaltos y areniscas, respectivamente, equivalente a 0,08 % y 8,55 % de la precipitación media anual. El modelo indicaría la existencia de un flujo descendente, esto es recarga desde el basalto fracturado hacia el acuífero somero, y desde éste hacia el acuífero profundo, resultado que verificaría la hipótesis de trabajo acerca de un sistema multicapa con diferentes niveles de aporte, sustentada en mediciones de campo realizadas por el grupo de trabajo.

Palabras clave: hidrogeoquímica, modelación, recarga, Sistema Acuífero Guaraní

Behavior of the Guaraní Aquifer System on the uruguayan-brazilian border

ABSTRACT

The Guaraní Aquifer System (GAS) is a transboundary groundwater reservoir shared by Brazil, Argentina, Paraguay and Uruguay. The study presented here was performed in an area of the GAS covering an area of 650 km², centered in the cities of Rivera (Uruguay) and Santana do Livramento (Brazil). In that region the sandstones of the Tacuarembó / Rivera Formation that forms the GAS outcrop to the surface receiving direct recharge from precipitation and indirect recharge from fractured basalts that locally overlie the sandstones. Piezometric levels, geologic/structural analysis and hydrogeochemical analyses, along with background information of the area, were used to construct the conceptual model of the system hydraulic behavior. Numerical simulations allowed to validate the hydrogeologic conceptual model, to reproduce the current system behavior, and to estimate an approximate recharge rate. Recharge rates resulted in 1.3 mm/year, and 140.2 mm/year over basalts and sandstones, respectively, equivalent to 0.08 % and 8.55 % of the mean annual precipitation. The model would indicate the presence of downward vertical flow, i.e. recharge between fractured basalt toward shallow sandstones, and from shallow sandstone to deep sandstones, verifying the working hypothesis regarding the multilayer nature of the aquifer. This hypothesis was postulated based on field data surveyed by the working group.

Key words: Guaraní Aquifer system, hydrogeochemistry, numerical modeling, recharge

Introducción

En las dos últimas décadas, la comunidad científica comenzó a desarrollar un mayor interés en las aguas subterráneas transfronterizas. Como resultado de las primeras reuniones mantenidas surgió la inquietud de conformar un programa internacional dedicado al

manejo de recursos subterráneos transfronterizos, dando origen al programa ISARM (Internationally Shared Aquifer Resources Management) (Puri *et al.*, 2001). En 1999, el World-wide Hydrogeological Mapping Assessment Program (WHYMAP), bajo el patrocinio de numerosas organizaciones internacionales, publicó un inventario mundial de sistemas acu-

íferos transfronterizos (SAT) (<http://www.whymap.org/whymap/EN/Home/>).

Uno de los SAT identificados es el Sistema Acuífero Guaraní SAG, que constituye uno de los reservorios de agua subterránea más grandes del mundo y el mayor de América Latina, con un área de aproximadamente 1,2 millones de km² (Figura 1) y una capacidad de almacenamiento estimada en 45.000 km³ (Araújo *et al.*, 1995). Dicha extensión se reparte en los cuatro países que conforman el MER-

COSUR de la siguiente forma: 840.000 km² en Brasil, 255.000 km² en Argentina, 71.700 km² en Paraguay y 58.500 km² en Uruguay.

El SAG está contenido en las areniscas de la Formación Tacuarembó que, en general, subyacen a la formación basáltica Arapey. Se comporta como un acuífero confinado o semi-confinado y en menor medida como libre en las áreas de afloramiento o sus cercanías (Montaño *et al.*, 1998; Bossi y Schipilov, 1998).

El área circundante a las ciudades de Rivera (Uruguay) y Santana do Livramento (Brasil) se caracteriza por ser una zona de afloramiento de las areniscas del SAG y por la presencia del frente de coladas basálticas. Esta zona ha sido objeto de análisis en diversos estudios hidrogeológicos como ser los trabajos de Decoud y Rocha (2000), Pérez y Rocha (2002), Pessi y Hardy (1998) y Pacheco (2004), entre otros. En esta región el SAG se comporta como un acuífero multicapa (Rodríguez *et al.*, 2006). Sin embargo, aún existen ciertas incertidumbres acerca de la conectividad hidráulica entre las diversas capas que conforman y/o confinan el mismo y los flujos asociados.

La zona de recarga ha sido generalmente circunscrita solamente a las áreas de afloramientos del SAG. Diversos autores calcularon la recarga directa proveniente de las precipitaciones con resultados del orden del 3 al 5 % de la precipitación media (Montaño y Carrión, 1990; Pérez y Rocha, 2002; Pacheco, 2004). Por otro lado, Silva Busso (1999) y Oleaga (2002) han indicado que en sectores de poco espesor de basalto y con importante fisuración, es posible que este acuífero suprayacente recargue al SAG. Por tal razón, uno de los objetivos de este trabajo fue estimar la recarga indirecta al acuífero luego de su paso por los basaltos fracturados suprayacentes en la zona perimetral de afloramiento del SAG.

Para definir el modelo conceptual se emplearon técnicas de hidrogeoquímica a partir de la presencia ya comprobada de trazas en el acuífero fracturado en la región Argentino-Uruguaya y Uruguayo-Brasileña; el análisis estructural de las formaciones involucradas; la estimación de la recarga del acuífero fracturado a partir de diferentes metodologías; el análisis de la posible relación entre el acuífero fracturado y el SAG. Finalmente se realizó una simulación numérica para validar la recarga estimada previamente y el modelo hidrogeológico.

Este artículo es una breve síntesis de los resultados alcanzados en el proyecto "Desarrollo Metodológico para la Evaluación de la Recarga y la Vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní en Argentina y Uruguay" (Rodríguez *et al.*, 2006), finan-

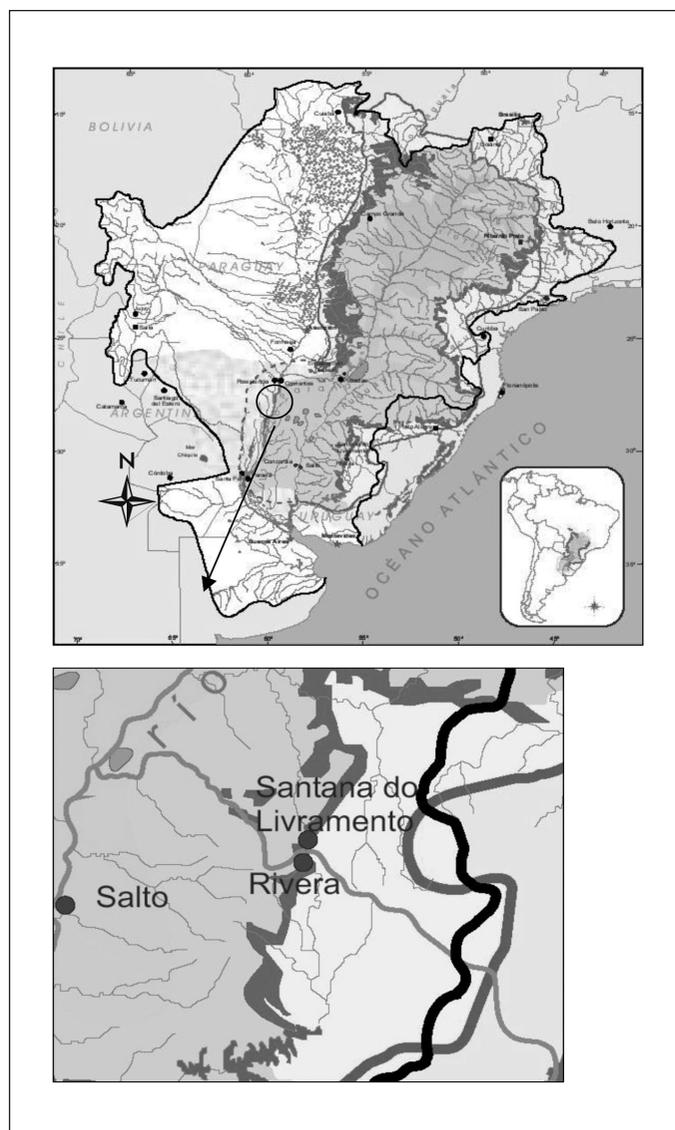


Figura 1. Mapa esquemático del Sistema Acuífero Guaraní y del sector de estudio. Las áreas color gris oscuro indican las zonas de afloramiento y de recarga directa. Fuente: www.sg-guarani.org
Figure 1. Schematic map of the Guaraní Aquifer System and study area. Dark grey areas indicate sandstones outcropping and direct recharge zones. From: www.sg-guarani.org

ciado por el Fondo del Guaraní para Universidades. Este Fondo es un complemento del "Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní" patrocinado por el Banco Mundial, el Global Environment Facility (GEF) y la Organización de Estados Americanos.

Descripción del área de estudio

La región se caracteriza por un predominio de las areniscas de la Formación Tacuarembó (Formación Botucatu en Brasil), cerros de basaltos de la Formación Arapey (Formación Serra Geral en Brasil) y sedimentos recientes próximos a los cauces principales. Topográficamente el área presenta, en general, pendientes suaves, con alturas máximas de 400 m sobre el nivel del mar. Sin embargo, el pasaje entre los basaltos y las areniscas subyacentes puede identificarse rápidamente en campo o en la cartografía a partir de curvas de nivel de pronunciadas pendientes. En la transición basaltos/areniscas suelen identificarse morros de basaltos que interrumpen el paisaje.

Desde el punto de vista regional, el SAG está constituido por un conjunto de acuíferos clásticos y fisurados con control estructural somero y profundo. Se reconocen dos tipos de fracturación importantes: una más somera relacionada con el diaclasamiento de la roca basáltica de poca profundidad, mayor dispersión de sus rumbos, interconexión entre fracturas y de poca expresión regional que controlaría acuíferos más superficiales; un segundo grupo de fracturas se relacionaría con los fallamientos directos que involucran desplazamiento vertical y horizontal de unidades geológicas, de alcance más regional y más profundas que las anteriores que controlarían no sólo las unidades basálticas sino también las unidades clásticas del acuífero en profundidad.

La precipitación media en Rivera es de 1639 mm/año, y las temperaturas medias, máximas y mínimas son 18°C, 41°C y -5°C, respectivamente (DNM, 2006).

Análisis geológico-estructural

Este análisis se apoyó en la interpretación de la cartografía básica, las fotografías aéreas y las imágenes satelitales con el fin de detectar lineamientos de decenas y hasta centenares de kilómetros de largo, interpretados como zonas de fracturación.

Considerando los lineamientos más someros en los basaltos de la Fm. Arapey en Uruguay, sobre un total de 366 lineamientos mapeados, predominaron

aquellos que presentan una dirección dominante E-O. La roseta de lineamientos trazada sobre la base de la frecuencia, presenta un rumbo medio de 81,3° y una distribución que se asemeja a la normal. El histograma de la longitud de los lineamientos mostró una distribución asimétrica de media 340 m, y un elevado desvío estándar de 300 m.

En la fotointerpretación de gabinete se identificaron formas del relieve, materiales geológicos, zonas de fracturas, áreas con tonalidades más oscuras, red hidrográfica y cuerpos de agua, y se delimitaron áreas de afloramientos de basaltos, correspondientes al Grupo Arapey, de areniscas de la Formación Tacuarembó - Rivera y zonas correspondientes a los valles aluviales. La delimitación de las dos formaciones fue completada con el mapeo de la Formación Serra Geral en territorio brasileiro. Esta información constituyó uno de los elementos utilizados en la construcción del modelo conceptual.

Piezometría-Parámetros hidráulicos

Un primer análisis de la piezometría de diciembre de 2005 permitió identificar en vertical dos sectores del SAG hidráulicamente diferentes, lo que motivó trabajar con la hipótesis de un acuífero somero y otro profundo dentro del mismo SAG.

El acuífero "profundo" es el que tiene mayor espesor y se extiende a ambos lados de la frontera. Este acuífero es la principal fuente de agua de Rivera - Santana do Livramento. La piezometría muestra una dirección de flujo mayormente hacia Brasil, detectándose sectores con importantes descensos por bombeo (Figura 2). En el lado uruguayo, la dirección de flujo es mayormente NE, con un gradiente de $3,5 \times 10^{-4}$ en dirección de la frontera. En la frontera noroeste se observa un flujo Oeste-Este con un gradiente levemente mayor, 5×10^{-4} , mientras que al norte se observa un flujo SSE en dirección de Santana con un gradiente de aproximadamente 1×10^{-2} , posiblemente influido por el intenso bombeo para la ciudad.

En los pozos que sólo explotan la parte más somera del SAG la información es escasa y permite estimar direcciones de flujo pero no realizar una piezometría muy bien ajustada. Este nivel acuífero no estaría presente en toda el área de estudio, ubicándose sólo en territorio uruguayo y en la parte brasileña más elevada cercana a la frontera. Las líneas de flujo del lado uruguayo son hacia el Arroyo Cuñapirú, el que sería la descarga natural del sector somero en la zona de Rivera. Del lado brasileño, las cotas topográficas son más bajas, y tendría poca extensión, no pudiéndose identificar un sitio de descarga natural.

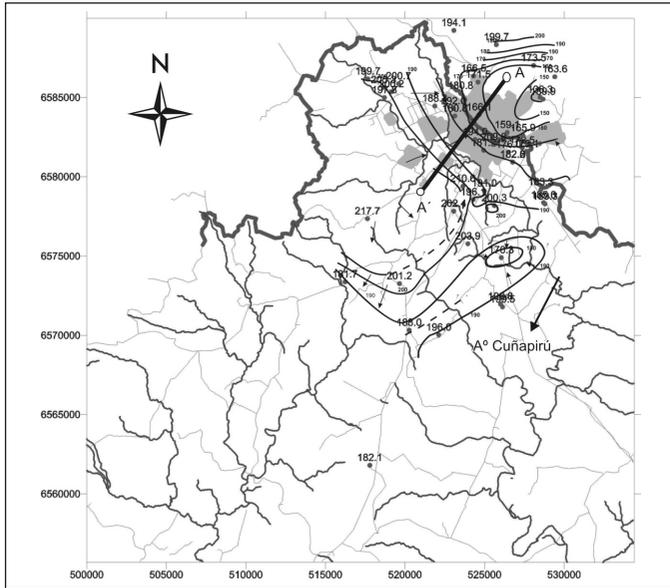


Figura 2. Piezometría del acuífero profundo diciembre 2005
 Figure 2. Deep aquifer water levels December 2005

La información piezométrica de pozos en basaltos no es suficiente para estimar direcciones de flujo, sólo se puede indicar que el agua en éstos tiene potencial suficiente para ser fuente de recarga a las areniscas.

Respecto a la conductividad hidráulica se reinterpretaron los ensayos de bombeo y de recuperación disponibles, tanto de pozos de la localidad de Rivera como de Santana do Livramento. En total se analizaron 24 ensayos en 17 perforaciones de Rivera y 7 de Santana. En la mayoría de los casos los ensayos fueron realizados en el momento de la construcción del pozo, por lo tanto los resultados son representativos de ese momento. En la Tabla 1 se incluye la conductividad hidráulica de la Formación Serra Geral (Flores Machado 2005) y los valores promedio de conductividad hidráulica estimados durante el proyecto y en pozos someros y profundos en areniscas.

Formaciones / Sectores acuíferos	K (m/d)
Arapey	0.00864 - 8.64
SAG (areniscas del somero)	0.48
SAG (areniscas del profundo)	1.66

Tabla 1. Conductividades hidráulicas
 Table 1. Hydraulic conductivities

En resumen, se identificaron tres niveles hidráulicos que pueden tener intercambio de flujo entre sí. Se observó un nivel de agua en basaltos por encima del nivel hidráulico del sector somero del SAG, con diferencias de nivel muy importantes, de más de decenas de metros. En los sectores más permeables del SAG, se observaron dos niveles donde el superior tiene niveles por encima del inferior apoyando la hipótesis de recarga y flujo descendente.

Hidroquímica

Como resultado del muestreo realizado en noviembre de 2004, las aguas se pudieron clasificar en general como Bicarbonatadas-Cálcicas. Se observaron diferencias químicas importantes entre los pozos situados en areniscas y los pozos situados en cerros de basalto o próximos a ellos.

En diciembre de 2005 se realizó un muestreo hidroquímico, con el objetivo de encontrar una respuesta a las diferencias advertidas en la salida a campo anterior y comprender la evolución hidroquímica. El análisis hidrogeoquímico permitió separar el agua subterránea en cuatro grandes grupos de pozos: A) extraen agua exclusivamente del basalto; B) extraen del sector más somero de las areniscas; C) extraen del sector más profundo de las areniscas y D) extraen del sector más somero de las areniscas pero que se encuentran muy cerca de la cresta basáltica.

La relación entre Na-Cl (Figura 3) muestra que el grupo A presenta concentraciones de Sodio de más del doble que el resto y valores bajos de cloruros. El grupo B muestra muy bajas concentraciones de ambos elementos, con valores muy próximos al agua de lluvia, mientras que el grupo D se encuentra en una posición intermedia. La relación entre Ca-Mg permite apoyar dicha separación, mostrando que aquellos pozos con agua de basaltos o cercanos a éstos presentan enriquecimiento en magnesio, mientras que aquellos pozos que se encuentran alejados del basalto muestran bajos valores, incrementándose en mayor medida el contenido de calcio con respecto al magnesio a medida que se avanza en dirección del flujo.

Las perforaciones en basalto presentan los mayores valores de conductividad eléctrica y pH (Figura 4), descendiendo a medida que reciben recarga de agua de lluvia. Esto produce que al avanzar en la dirección de flujo del acuífero somero disminuya tanto la conductividad eléctrica como el pH, reflejando el gran volumen de agua de lluvia que recarga el acuífero somero, diluyendo el agua recargada a través de basaltos. A medida que el flujo comienza a descender

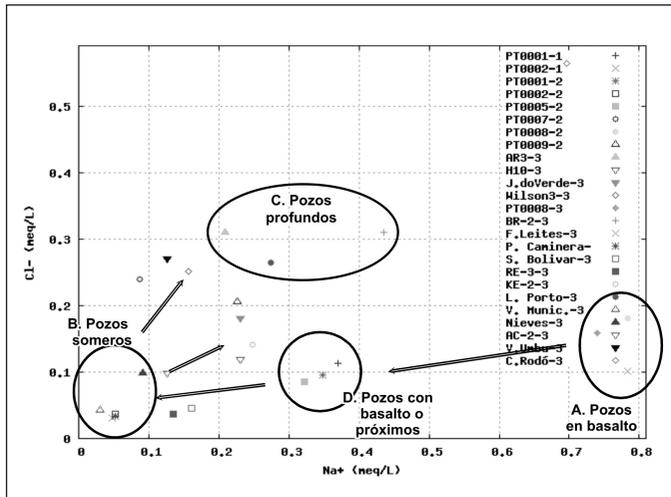


Figura 3. Concentraciones de Na vs. Cl
Figure 3. Na vs. Cl concentrations

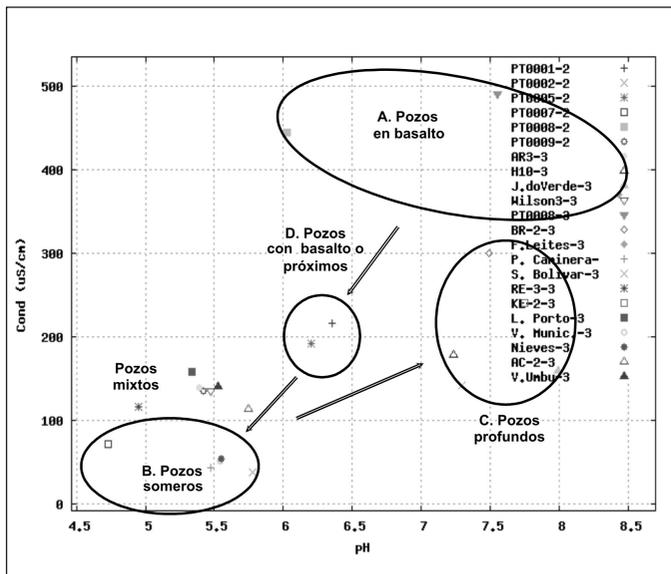


Figura 4. Relación entre especies medidas en campo, pH vs. Conductividad
Figure 4. Relationship between field measured species, pH vs. Conductivity

y alcanzar sectores más profundos que no reciben recarga directa, comienza a subir tanto el pH como la conductividad eléctrica, mostrando una evolución hidroquímica usual.

Finalmente, analizando la hidroquímica en conjunto con la piezometría, se puede inferir que el agua recarga en basaltos y circula en dirección de las ciudades, recibiendo en las areniscas recarga de muy baja salinidad. El agua que fluye en dirección de las

zonas topográficamente más bajas (Ej. Arroyo Cuñapirú) va disminuyendo su pH y conductividad eléctrica al recibir la recarga, alcanzándose valores de pH entre 5 y 6, con conductividades tan bajas como 100 a 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos valores son muy similares a los del agua de lluvia, mostrando la escasa capacidad buffer y de modificación de la calidad del agua que tiene el suelo. A medida que el agua comienza a descender al acuífero profundo, ésta comienza a incrementar su contenido iónico.

Estimaciones de la recarga

Respecto a la recarga a través de las areniscas aflorantes, existen estimaciones presentadas por diferentes autores. Montañó y Carrión (1990) estimaron un valor global de 3% de la precipitación media anual (39 mm/año) para toda el área aflorante (3700 km²), asumiendo una precipitación media de 1300 mm/año. Silva Busso (1999) sugiere un valor del 3,5 % de la precipitación media como tasa de recarga. Pérez y Rocha (2002) realizaron un análisis cualitativo de la recarga en la zona de Rivera, puntualizando la incidencia del cordón de cerros en el incremento de la recarga debido a las grandes pendientes que originan concentraciones de flujo. Pacheco (2004) realizó un sencillo balance considerando como área "ejemplo" de recarga un sector comprendido entre las curvas piezométricas de 170 m y 190 m, delimitada lateralmente por dos líneas de corriente, calculando un valor resultante de 50,2 mm/año (3,6 % asumiendo 1400 mm/año de precipitación).

Modelo hidrogeológico conceptual

Si bien existían modelos hidrogeológicos conceptuales previamente definidos por Silva Busso (1999) y Oleaga (2002), ambos eran de carácter regional. El modelo conceptual de funcionamiento del SAG en la zona de estudio que se propone, fundamentado en los estudios de detalle de geología, piezometría e hidroquímica, en algunos aspectos contradice las presunciones existentes de acuífero libre, monocapa, con direcciones de flujo hacia el oeste y comportamiento hidrogeológico simple. El nuevo modelo es el siguiente:

- Acuífero superior, constituido por sectores superiores alterados de los derrames basálticos, con agua de alto pH y conductividad eléctrica.
- Acuífero inferior, Guaraní, contenido en areniscas de edad Triásico-Jurásico, incluido en las formaciones (Rivera,) Tacuarembó y Buena Vista.

Muestra un comportamiento de tipo multicapa, dentro del cual se detecta:

- Sector acuífero granular superior “somero”, constituido por areniscas, de un espesor de decenas de metros, de transmisividad hidráulica media, con agua de pH y conductividad eléctrica bajos, de características similares al agua de lluvia.
- Acuitardo, constituido por areniscas de alto contenido arcilloso, que con algunas decenas de metros, constituye un medio poco permeable que regula el flujo entre acuíferos granulares.
- Sector Acuífero granular inferior “profundo”, constituido por areniscas, de un espesor de más de cien metros, el cual presenta a su vez varios sectores permeables. Es el que posee mayor transmisividad hidráulica, y se caracteriza por valores de pH próximos a la neutralidad y conductividad eléctrica de menos de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Acuitardo inferior, constituido por rocas sedimentarias poco permeables, de edad Devónico-pérmicas.

En la Figura 5 se muestra en forma esquemática el modelo conceptual desarrollado a través de un corte o perfil suroeste-noreste.

Modelo numérico

La modelación numérica del área de estudio mediante MODFLOW (Harbaugh *et al.* 2000), bajo la interfase GMS (Groundwater Modeling System, 2002), per-

mitió validar adecuadamente el modelo hidrogeológico conceptual propuesto; reproducir el funcionamiento actual del sistema y estimar un valor aproximado de recarga de las areniscas, ya sea proveniente de los basaltos suprayacentes, ya sea proveniente de la precipitación. Se modeló la situación observada en diciembre del 2005 bajo la suposición de un estado estacionario. El área total modelada es de aproximadamente 650 km², extendiéndose los límites fuera del complejo urbano.

La información estratigráfica disponible y el mapa geológico desarrollado se utilizaron para la representación tridimensional de la estratigrafía (Figura 6), la que reproduce adecuadamente el modelo conceptual propuesto. Asimismo, esa información se empleó para la generación de la malla de diferencias finitas. El modelo numérico consta de tres capas coincidentes con las formaciones definidas en el modelo conceptual. El tamaño de las celdas de la grilla es regular en las tres capas, de 250 x 250 m, siendo diferente el número de celdas activas en cada capa.

La recarga se introdujo en dos áreas diferenciadas, una sobre los basaltos y otra sobre todas las areniscas aflorantes sin definir una tasa de recarga diferente entre acuífero somero y profundo (ver Figura 6 para identificación de área aflorante de cada uno). La tasa inicial de recarga en cada capa fue ajustada durante la calibración. La tasa resultante sobre los basaltos fue de 1,3 mm/año y sobre areniscas de 140,2 mm/año, equivalente a 0,08 % y 8,55 %, respectivamente, de la precipitación media anual de 1639 mm estimada en la estación Rivera por la Dirección Nacional de Meteorología de Uruguay.

Los ríos representados en el interior y en los bor-

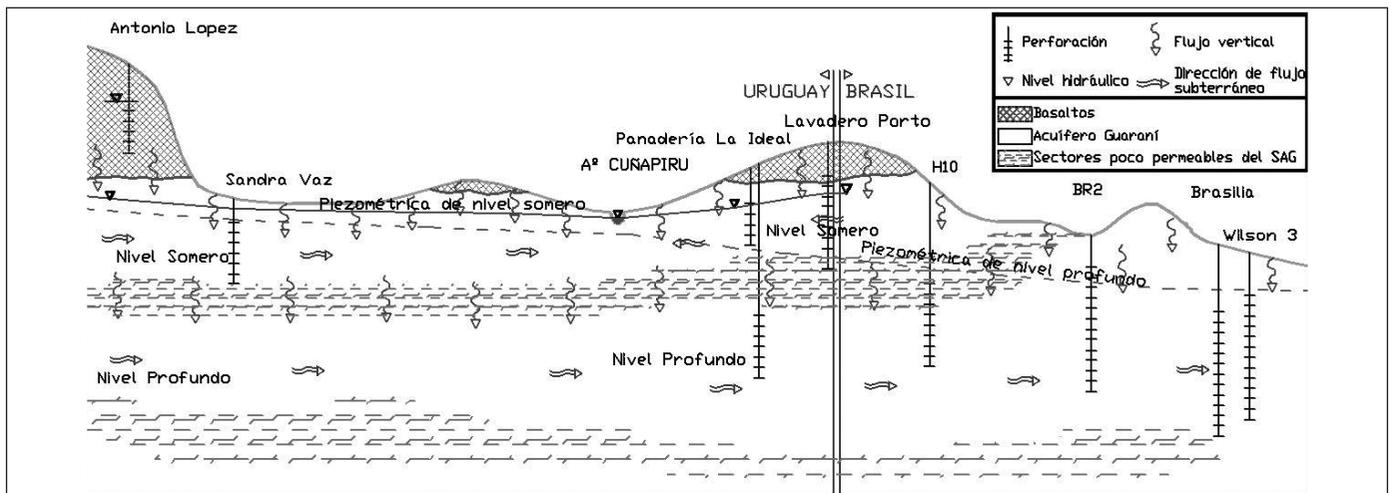


Figura 5. Perfil esquemático de funcionamiento sur-norte con la localización de los perfiles de pozos utilizados (Rodríguez *et al.*, 2006)
 Figure 5. Profile of the aquifer behavior in the South - North direction showing boreholes location (Rodríguez *et al.*, 2006)

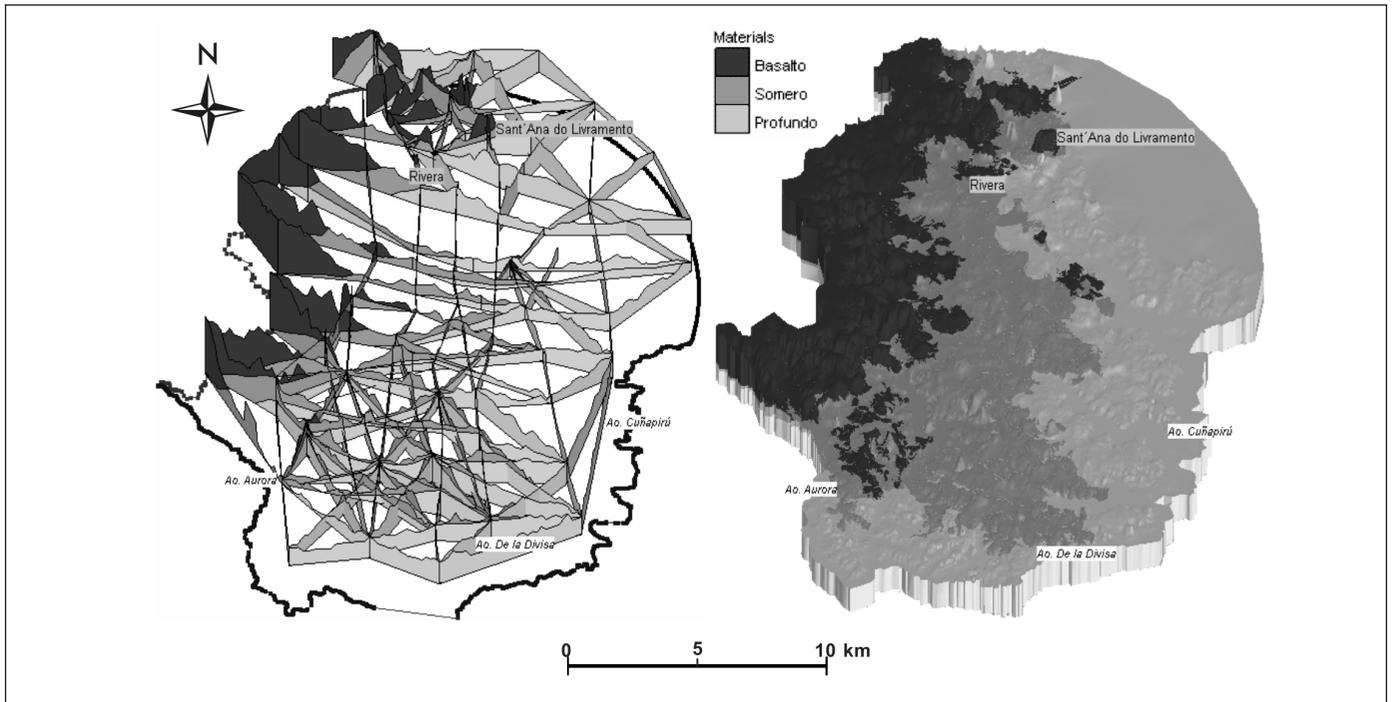


Figura 6. Vista tridimensional de la estratigrafía simulada, con los perfiles interiores
 Figure 6. Simulated 3D stratigraphy showing the inner cross sections

des del área modelada simularon el efecto de la interacción entre las aguas subterráneas y las superficiales, mientras que los pozos de bombeo fueron asignados a la capa somera o profunda según correspondiera.

El proceso de calibración se realizó por el método de prueba y error, comparando la carga hidráulica simulada y observada. Para ello se contó con la piezometría relevada tanto por el grupo de trabajo como por otro grupo del Fondo de Universidades. Durante la calibración se ajustaron distintos parámetros buscando mantener la coherencia entre lo observado y lo simulado.

El acuífero somero resultó con una conductividad hidráulica horizontal K_h homogénea e igual a 1,68 m/d, mientras que para el acuífero profundo se definió una K_h igual a 0,72 m/d en la mayor parte del área, excepto en una zona de dimensiones reducidas al sur del cono de bombeo, donde se utilizó un valor de 1,92 m/d, valores consistentes con el modelo conceptual y los estimados por diversos autores.

La calibración arrojó resultados aceptables. La Figura 7 muestra la piezometría simulada en el acuífero profundo, donde se observa la presencia de un incipiente cono de dimensiones apreciables en torno a las dos ciudades, en tanto que la Figura 8 muestra

una comparación entre valores simulados y observados para dicha capa. En términos generales, la dirección de los flujos simulados está de acuerdo con las relevadas en campo y el modelo conceptual.

El modelo indicaría la existencia de un flujo descendente (recarga) desde el basalto fracturado hacia el acuífero somero y desde éste hacia el acuífero profundo, resultado que verificaría la hipótesis de trabajo del proyecto.

A pesar de los buenos resultados alcanzados, persisten incertidumbres en las condiciones de borde. Tanto las direcciones como las magnitudes de todos los términos de flujos deberían verificarse con información adicional y mejoras futuras del modelo.

Conclusiones

Se propuso un modelo conceptual de funcionamiento del Sistema Acuífero Guaraní en un área centrada en el complejo urbano de Rivera-Santana do Livramento y sus alrededores, en la frontera uruguayo-brasilera, donde el SAG aflora y presenta un sector confinado por la formación basáltica Arapey. Las areniscas del SAG correspondientes a las formaciones Tacuarembó y Rivera se analizaron como dos

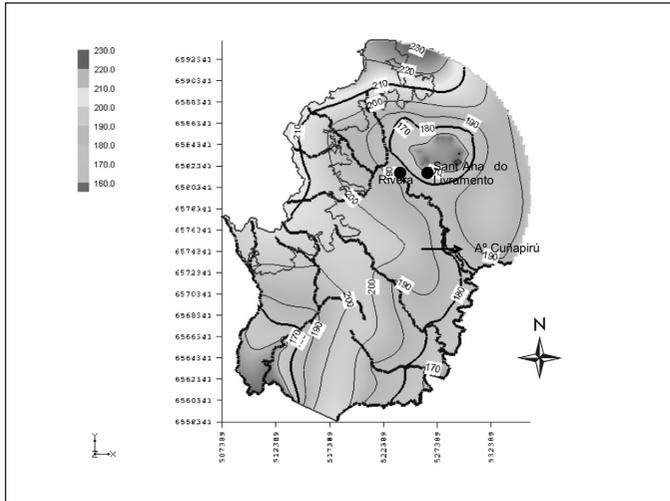


Figura 7. Niveles piezométricos simulados en el acuífero profundo, expresados en metros
 Figure 7. Deep aquifer simulated hydraulic head, in meters

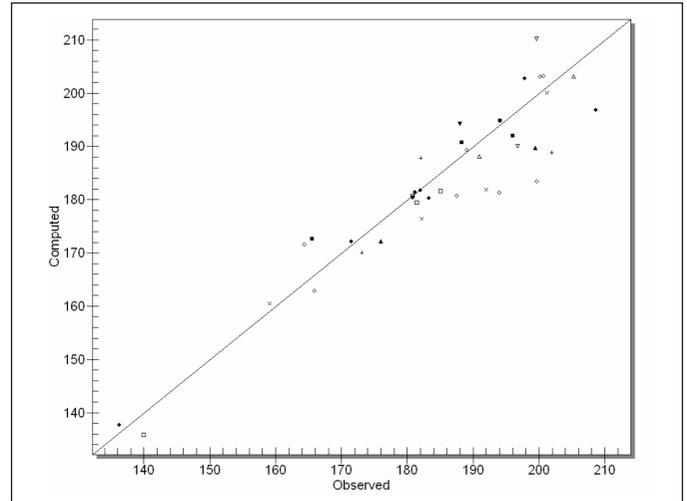


Figura 8. Niveles observados vs. calculados en el acuífero profundo
 Figure 8. Observed vs. Calculated heads in the deep aquifer

zonas con comportamientos hidráulicos e hidroquímicos diferentes: somera (superior) y profunda (inferior), ambas zonas están separadas por una capa de menor permeabilidad, no explícitamente representada en el modelo numérico. La formación basáltica se encuentra bastante fracturada donde los lineamientos tienen un rumbo medio de $81,3^\circ$ y una longitud media de 340 m, con predominio de lineamientos en dirección E-O.

La modelación numérica del área de estudio permitió validar adecuadamente el modelo hidrogeológico conceptual propuesto; reproducir el funcionamiento actual del sistema y estimar un valor aproximado de recarga de las areniscas, ya sea proveniente de los basaltos suprayacentes, ya sea proveniente de la precipitación. La tasa de recarga directa sobre las areniscas resultó en 140,2 mm/año, esto es 8,55 % de la precipitación media anual medida en la estación meteorológica de Rivera.

El modelo indicaría la existencia de un flujo descendente, esto es recarga desde el basalto fracturado hacia el acuífero somero de 1,3 mm/año (0.08 % de la precipitación media anual), y desde éste hacia el acuífero profundo, resultado que verificaría la hipótesis de trabajo del proyecto.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría General del Proyecto Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero

Guaraní. Gracias a su apoyo fue posible la formulación del proyecto y la concreción de esta propuesta. El apoyo de la Secretaría General se realizó a través del Fondo Guaraní de Universidades, Fondo de Cooperación entre el Banco Mundial y el Gobierno de los Países Bajos (BNPP).

Referencias

- Araújo, L.M., Franca, A.B., y Potter, P.E. 1995. Acuífero Gigante del Mercosur (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay) Mapas Hidrogeológicos de las Formaciones Botucatu, Piramboia, Rosario do Sul, Buena Vista, Misiones y Tacuarembó. PETROBRAS-UFPR., Brasil.
- Bossi, J. and Schipilov, A. 1998. The Arapey Group: confining basalts of the Guaraní Aquifer in Uruguay, *Revista Agrociencia*, Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay, Vol II - 1, pp 12-25.
- Decoud, P. y Rocha, L. 2000. Aportes a la hidráulica subterránea del Acuífero Guaraní en el NW del Uruguay. 1º Encuentro Mundial de Hidrogeología. Fortaleza, Brasil.
- Dirección Nacional de Meteorología, DNM. Uruguay. 05/2006. <http://www.meteorologia.com.uy>.
- Flores Machado, J.L. 2005. Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Acuífero Guaraní no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Sao Leopoldo, Brasil.
- Groundwater Modeling System - GMS V. 6.0 - 2006 Brigham Young University. EMS, Inc. Utah, USA.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C. and McDonald, M.G. 2000. Modflow 2000, the U.S.G.S. Modular groundwater model - User guide to modularization concepts

- and the ground water flow process. USGS Open file report 00-92.
- Montaño, J. y Carrión, R. 1990. Optimización de la explotación del sistema acuífero Jurásico Triásico Tacuarembó-Buena Vista. *Anais 6º Congreso Brasileiro de Aguas Subterráneas*. Trabajo N° 44, pp. 181-189.
- Montaño, J. y Pessi, M. 1985. Estudio hidrogeológico de Rivera. O.S.E. Montevideo, Uruguay.
- Montaño, J., Tujchneider, O., Auge, M., Fili, M., Paris, M., D'Elía, M., Pérez, M., Naghi, M., Collazo, P. y Decoud, P. 1998. Acuíferos regionales en América Latina, Sistema Acuífero Guaraní, Capítulo Argentino-Uruguayo. Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión, U.N.L., Santa Fe, Argentina. 217 pp.
- Oleaga, A. 2002. Contribución a la Hidrogeología del Acuífero Guaraní en el Sector Uruguay. Un enfoque Integral. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra (Aguas Subterráneas). Instituto de Geología. UNAM. México D.F., México.
- Pacheco, V.F. 2004. Informe Final: Estudio Hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en la zona Rivera - Santana do Livramento. II Curso Internacional de Hidrología Subterránea (Versión a Distancia). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Pérez, A. y Rocha, L. 2002. Aportes al conocimiento del acuífero Guaraní. Área Ciudad de Rivera - Uruguay. Groundwater and Human Development Conference. *XXXII International Congress of the International Association of Hydrogeologists*. Oct/02. Mar del Plata, Argentina.
- Pessi, M. y Hardy, G. 1998. El Sistema Acuífero Tacuarembó en la ciudad de Rivera, Uruguay. *4º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. ALHSUD*. Montevideo, Uruguay. pp. 460-468.
- Puri S., B. Appelgren, G. Arnold, A. Aureli, S. Burchi, J. Burke, J. Margat, P. Pallas, and W. von Igel. 2001. Internationally shared (transboundary) aquifer resources management, their significance and sustainable management: A framework document. IHP-VI, International Hydrological Programme, Non Serial Publications in Hydrology SC-2001/WS/40. Paris, France: UNESCO.
- Rodríguez, L., Gómez, A., Oleaga, A., Pacheco, F., Roullier, G., Seoane, N., Silva Busso, A., Vives, L. 2006. Informe Final del proyecto "Desarrollo Metodológico para la Evaluación de la Recarga y la Vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní en Argentina y Uruguay", Fondo de Universidades, Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.
- Silva Busso, A. 1999. Contribución al Conocimiento Geológico e Hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanaense Oriental Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Cs. Exactas y Naturales, UBA.

Recibido: enero 2008
Aceptado: abril 2008