

Modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Sistema Acuífero Guaraní (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay)

Hydrogeological conceptual and numerical modeling of the Guaraní Aquifer System (Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay)

Andrés Mira¹, Luis Vives¹, Leticia Rodríguez² y Gerardo Veroslavsky¹

¹Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff". Av. República de Italia 780 – 7300 Azul, Buenos Aires – Argentina
andresmira@faa.unicen.edu.ar, lvives@faa.unicen.edu.ar

²Centro de Estudios Hidro-ambientales – CENEHA. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Ciudad Universitaria CC 217 Ruta Nacional 168 Km 472.4, 3000 Santa Fe, Argentina. leticia@fich1.unl.edu.ar

³Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Iguá 4225, CP 11400, Montevideo, Uruguay. gerardo@fcien.edu.uy

ABSTRACT

A hydrogeological conceptual model of the giant Guaraní Aquifer System (GAS) is presented in order to improve its knowledge. A finite elements bi-layer model has been built to simulate the GAS interrelation with the upper aquifer through the confining basalts. The TRANSIN code was used to validate it numerically. An average hydraulic conductivity value of 6.9 m/d and a storage decrease rate equivalent to a water table of 0.14 cm/y were obtained, due to the intense pumping since 1990.

Key-words: *Guaraní Aquifer System, sedimentary basin, hydrodynamics, numerical simulation.*

Geogaceta, 64 (2018), 67-70
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

Dentro de un contexto donde el agua potable es un recurso de acceso limitado en ciertas partes del mundo, no solo por el incremento en su demanda sino por su contaminación, el Sistema Acuífero Guaraní (SAG) está siendo objeto de un incremento en su explotación para abastecimiento, uso agrícola e industrial. Esta situación se observa en las principales zonas de recarga, que coinciden con las más pobladas (LEBAC, 2008).

El SAG es un acuífero gigante (más de 1,1 millones de km²) transfronterizo de naturaleza areniscosa, con profundidad y espesor variables. La complejidad geológica y la escasez de datos hidrogeológicos, tanto

espaciales como temporales, hacen de su conocimiento un gran desafío.

Un modelo de flujo de agua subterránea se convierte en una herramienta fundamental para ayudar a comprender cómo funciona el sistema y de qué volúmenes de los componentes del balance de masas se dispone para una correcta gestión del recurso.

En este trabajo se presenta un modelo hidrogeológico conceptual del SAG mejorado y validado por un modelo numérico. El nuevo modelo mejora los precedentes (Vives *et al.*, 2008; Rodríguez *et al.*, 2013) ya que aporta más información sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero basándose en los últimos avances en el conocimiento geológico de la porción sur del SAG (Mira *et al.*, 2015).

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG), desarrollado con objeto de mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrodinámico de este extenso acuífero transfronterizo. El modelo es bicapa, y simula la interrelación del SAG con el acuífero superficial a través de los basaltos fracturados que confinan al primero. La verosimilitud del modelo se contrastó numéricamente mediante el código en elementos finitos TRANSIN. El valor medio de conductividad hidráulica estimada resultó 6,9 m/d y el descenso de niveles 0,14 cm/año, producto del intenso bombeo desde 1990.

Palabras clave: *Sistema Acuífero Guaraní, cuenca sedimentaria, hidrodinámica, simulación numérica.*

Recepción: 29 de junio de 2017
Revisión: 10 de octubre de 2017
Aceptación: 23 de octubre de 2017

Localización y contexto geológico

El SAG se localiza entre 16° S y 32° S de latitud y 47° O y 56° O de longitud (Fig. 1). La precipitación media para el periodo 1970-2000 es de 1485 mm con un gradiente negativo hacia el sur.

El SAG está formado por areniscas eólicas y fluviales de edad Triásico a Cretácico Inferior depositadas en la Cuenca de Paraná y Chacoparanense. Su espesor medio es 165 m con un máximo de 600 m en el centro de la cuenca y un mínimo de 6 m en su borde.

El SAG yace sobre una discordancia Permo-Triásica que lo separa de formaciones arenosas, arcillosas y limosas paleozoicas. Donde aflora puede definirse claramente su

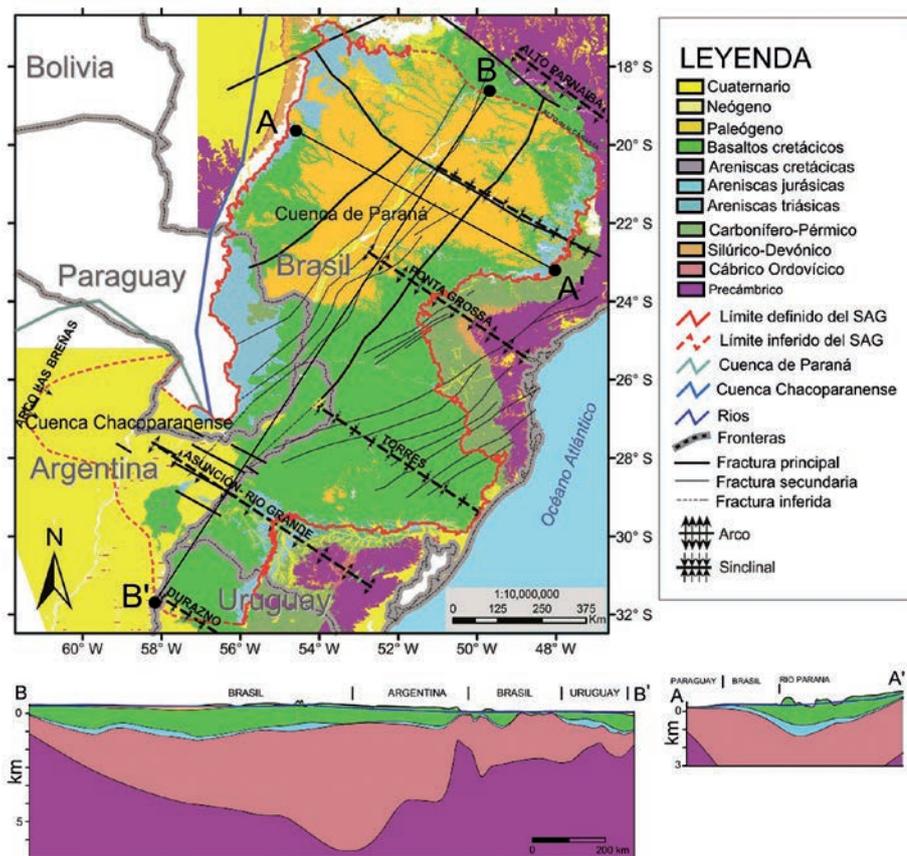


Fig. 1.- Mapa geológico simplificado del SAG y perfiles esquemáticos longitudinal y transversal y nivel piezométrico. (Elaboración propia a partir de cartografía del CPRM). Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Simplified geological map of GAS and schematic longitudinal and transverse cross-sections showing the piezometric head. (Prepared by the authors based on CPRM maps). See color figure in the web.

límite, pero al norte y oeste su límite solo puede inducirse indirectamente. Está cubierto en un 90 % de su superficie por basaltos fracturados con hasta 1500 m de espesor. Sobre los basaltos se sitúan sedimentos desde el Cretácico Superior hasta la actualidad con 300 m de espesor en la Cuenca Baurú-Cauiá y 700 m en la Cuenca Chacoparanense, que conforman sendos acuíferos superficiales.

Las direcciones tectónicas principales son NE-SO y NO-SE con fracturas muchas veces rellenas de diques volcánicos. Destacan dos grandes estructuras, el Arco de Ponta Grossa y la Dorsal Asunción – Río Grande (DARG), que tienen influencia directa sobre el espesor, profundidad e hidrodinámica del SAG. Para más información puede consultarse LEBC (2008) y Gastmans *et al.* (2012).

Modelo hidrogeológico conceptual

Desde un punto de vista regional el SAG se define como una capa de areniscas continua constituida por las formaciones: Misiones (Argentina y Paraguay), Tacuarembó e Ita-

cumbú (Uruguay) y Botucatu, Guará, Catrrita, Pirambóia y Santa Maria (Brasil). Existe una franja en el centro y sur de facies fluviales más conductivas hidráulicamente.

Se encuentra superpuesto a sedimentos arcillosos al norte y arenosos al sur, y bajo basaltos y sedimentos recientes que lo confinan excepto en las zonas de afloramiento.

El acuífero está influenciado por una tectónica de grandes sinclinales y anticlinales con numerosas fracturas que lo conectan con los acuíferos superficiales a través de los basaltos, sobre todo en las zonas con menor espesor de roca volcánica (Fernandes *et al.*, 2011 y 2012).

La recarga se produce en las áreas de afloramiento del SAG, situadas en los bordes este y oeste, y a través de los basaltos fracturados o alterados, particularmente en áreas donde exhiben espesores menores a 100 m.

La piezometría del SAG muestra una dirección regional de flujo desde las zonas de recarga hacia las zonas de descarga con un patrón este-suroeste, y de manera secundaria otra de norte a sur siguiendo el cauce del río Paraná.

A pesar de las incertidumbres en cuanto a flujos, se acepta que la descarga del SAG se produce en las zonas de afloramientos a favor de los ríos y en tramos intracuenca del Paraná, Uruguay y Pelotas, así como en la zona de los Esteros del Iberá. Se estima una salida del agua por el borde O hacia Paraguay y hacia el S en el Río Jacuí (Brasil). También habría una descarga profunda por el borde suroeste hacia las formaciones acuíferas adyacentes. Los bombeos se estiman en 988 hm³/a (LEBAC, 2008).

Las características hidroquímicas de las aguas del SAG permiten avalar la hipótesis de recarga en zonas de afloramiento y basaltos fracturados con poco espesor y descarga del acuífero en borde oeste y sur y principales ríos (Manzano y Guimaraens, 2012), especialmente en la DARG (Fig. 2).

Modelo numérico

El código utilizado para el modelo numérico es TRANSIN (Medina y Carrera, 1996), que permite simular el flujo de agua subterránea y resuelve el problema inverso.

Las simplificaciones aceptadas en el modelo hidrogeológico conceptual del SAG implican un flujo que puede considerarse fundamentalmente 2D a escala regional.

El modelo se ha construido con una malla de elementos finitos bicapa, siendo el SAG la capa 1 y el acuífero superficial la capa 2. La unión entre capas se realizó con elementos unidimensionales que simulan el acuitardo correspondiente a los basaltos de la Fm. Serra Geral.

Se ha modelado en condiciones transitorias para el periodo 1968 a 1997 con pasos de tiempo mensuales.

En este modelo se zonificó, para resolver el problema inverso (Carrera *et al.*, 2005), con base en criterios geológicos e hidrogeológicos: espesor, estructura y configuración geométrica de capas, presencia de grandes fracturas y cambios en la piezometría (gradiente hidráulico).

El dominio se ha zonificado en 24 áreas de conductividad hidráulica (K), 50 zonas con diferentes tasas de recarga proporcional a la precipitación total anual. Se utilizaron las series de precipitación de 15 estaciones meteorológicas representativas distribuidas por toda el área del SAG. El bombeo se implementó como caudal extraído en el nudo más cercano o distribuyendo el caudal entre todos los nodos de un área seleccionada. Tiene asociado la función de aumento de la explotación del acuífero, más intenso desde 1990.

simulado. Es a partir del segundo paso de tiempo cuando comienzan a trabajar las funciones de tiempo asociadas a la recarga, bombeo y salida por esteros.

Resultados y discusión

La optimización del modelo durante la calibración tiene como objetivo minimizar el error entre niveles calculados y medidos. El error medio absoluto (suma de las diferencias absolutas entre los niveles calculados y los observados dividida entre el número de observaciones totales) ha sido 26,6 m. La distribución de los errores

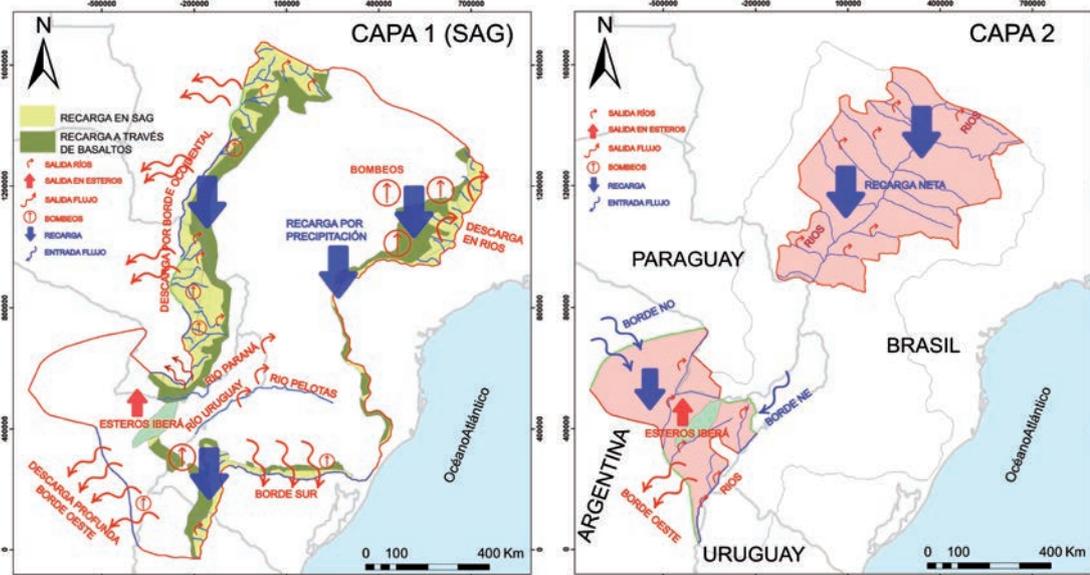


Fig. 2.- Modelo hidrogeológico conceptual del SAG (capa 1) y acuífero superficial (capa 2). Proyección LAMBERT_SAG4. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Hydrogeological conceptual model of GAS (layer 1) and upper aquifer (layer 2). LAMBERT_SAG4 coordinate projection system. See color figure in the web.

La interacción del acuífero con los ríos se ha simulado en 77 cauces con la condición de contorno mixta de Cauchy. Esta misma condición de contorno se ha asignado a la salida de agua por la zona de los Esteros del Iberá y en cinco bordes del modelo que se consideran tramos de descarga del acuífero.

Se han usado 417 datos de niveles medidos para la calibración distribuidos por toda el área modelada. En ausencia de medidas continuadas para la calibración del modelo se han asignado al último periodo de tiempo modelado.

Los parámetros utilizados para la calibración son: la conductividad hidráulica, la tasa de recarga y el coeficiente de goteo. En el inicio de la simulación se consideraron las condiciones estacionarias sin bombeo, con una recarga equivalente a un porcentaje de la precipitación media de

cada zona y una salida por la zona de los Esteros del Iberá media de todo el periodo

entre el número de observaciones totales) ha sido 26,6 m. La distribución de los errores

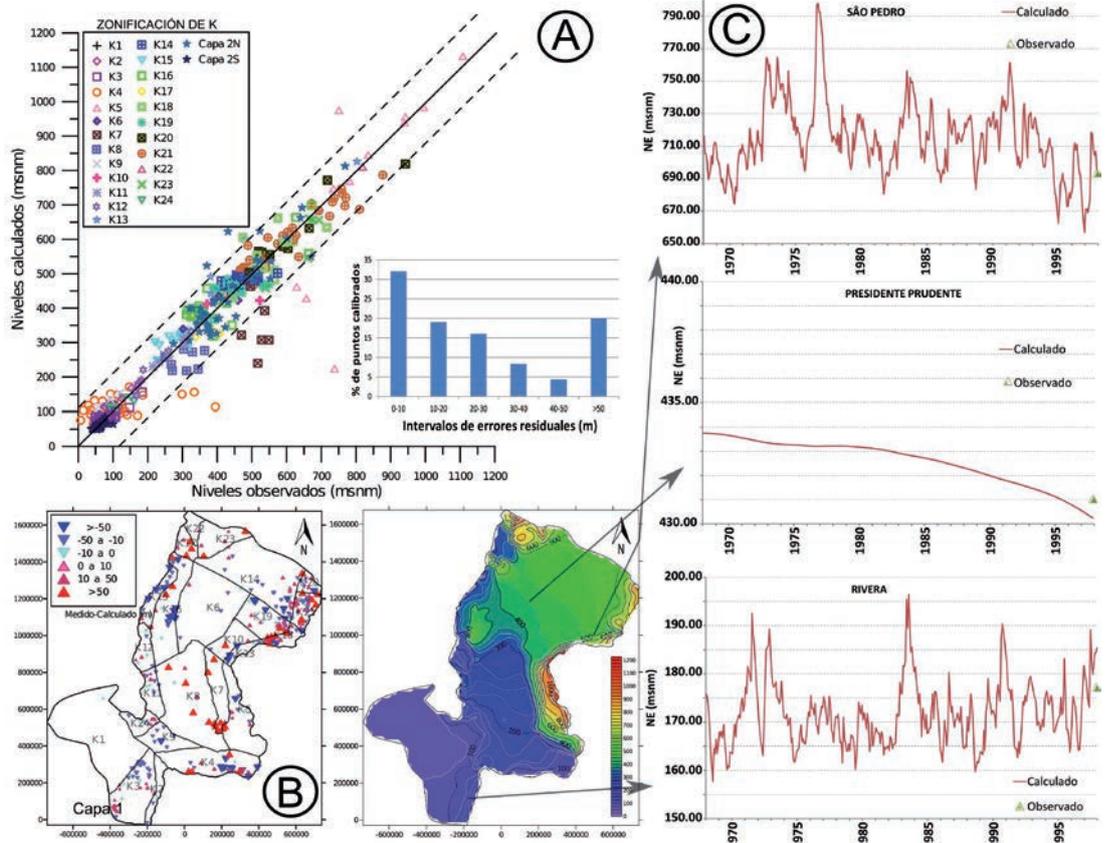


Fig. 3.- A) Ajuste entre niveles calculados y observados diferenciados por zonas de conductividad hidráulica. B) Mapa de distribución de errores de niveles medidos menos niveles calculados. C) Piezometría (Dic 1997) e hidrogramas calculados para tres pozos del SAG. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- A) Calculated vs observed levels by hydraulic conductivity zonation. B) Error map showing observed minus calculated piezometric heads. C) Piezometry (Dec 1997) and calculated hydrograms of three GAS boreholes. See color figure in the web.

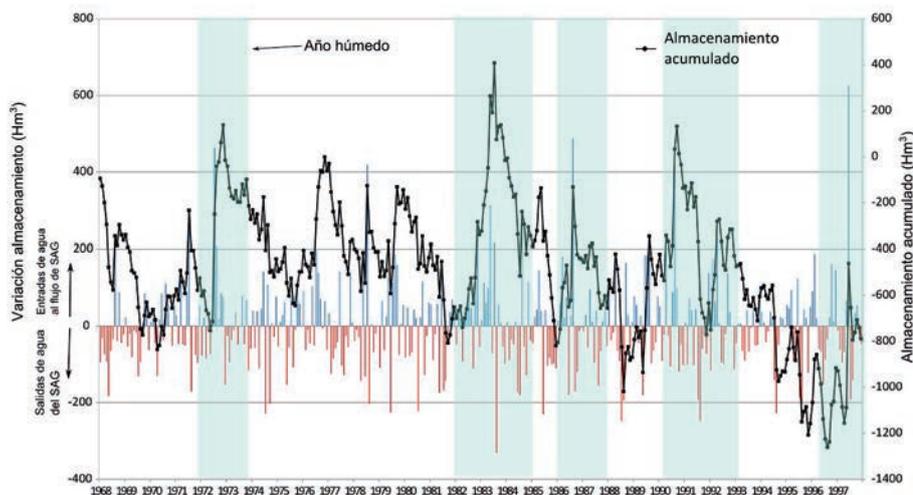


Fig. 4.- Variación del almacenamiento acumulado calculado para el SAG (línea negra continua) y almacenamiento acumulado: barras azules y rojas como aumento o descenso del almacenamiento. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- GAS variation of accumulated storage (black line) and accumulated storage (blue and red bars). See color figure in the web.

es homogénea a lo largo de la línea de ajuste teórico, aunque hay una ligera tendencia subestimar los niveles calculados a mayores cotas del acuífero (Fig. 3). Los errores se concentran al sur del acuífero y al norte del arco de Ponta Grossa, que son áreas de alta complejidad geológica (zonas de conductividad K4, K7 y K18, Fig. 3B).

La piezometría calculada mantiene el patrón de flujo del modelo conceptual propuesto. Los gradientes más elevados se dan al este pasando rápidamente a gradientes suaves en el resto del dominio. Tanto al norte como al sur el flujo converge a favor del cauce del río Paraná (Fig. 3B).

En los hidrogramas calculados se observa el funcionamiento del sistema, con decrecimiento de los niveles en las zonas con importantes bombeos (Fig. 3C arriba), con una respuesta del acuífero más variable por un posible control por precipitación en las zonas de afloramiento (Fig. 3C centro) y la respuesta más atenuada en un pozo situado en el centro de la cuenca (Fig. 3C abajo).

El valor medio de K calculado es 6,9 m/d, similar al propuesto por otros autores: entre 3 y 15 m/d (Campos, 2004; Hirata *et al.*, 2011; Gastmans *et al.*, 2012). Se han obtenido valores más elevados, 49 y 753 m/d, coincidiendo con la ubicación de las facies más conductivas. Hay una buena concordancia entre los valores de K reportados y los calibrados en el modelo. Por ejemplo, en Santana-Rivera se obtuvieron valores de K entre 0,17 y 19,92 m/d de dieciséis ensayos hidráulicos (Gómez *et al.*, 2010) y el valor modelado en la zona correspondiente es 17,7

m/d; en Riberão Preto se tiene un K modelado de 3 m/d de once ensayos hidráulicos (Sracek y Hirata, 2002), mientras que en el modelo ha sido 2,2 y 7,5 m/d.

La salida total a los ríos supone un caudal de 87,7 m³/s. Este valor resulta sensiblemente menor al caudal base mínimo registrado en el Río Uruguay, de 382 m³/s (Rodríguez *et al.*, 2013). De manera consistente con el modelo geológico, las mayores salidas se producen por el borde occidental y sur del SAG, siendo la recarga superior a las salidas en el cuadrante noreste e inferior a éstas en la mitad sur.

El almacenamiento en el SAG varía como respuesta a los aumentos y descensos de las entradas o salidas del sistema, identificándose un claro patrón de influencia de la precipitación. Se aprecia la acción de los bombeos en el descenso del almacenamiento a partir de 1991, cuando el volumen de las extracciones es ya significativo (Fig. 4). La tasa de descenso de niveles para los 30 años modelados se sitúa en 0,14 cm/año, lo que equivalente a una disminución del almacenamiento de 15,74 km³/año.

Conclusiones

En el modelo conceptual actualizado del SAG se integran datos geológicos, climáticos, hidrogeológicos, hidro-químicos e isotópicos para mejorar el conocimiento del SAG, simulándolo con la mayor cantidad de elementos del balance hídrico que se ha hecho hasta el momento.

El modelo numérico bicapa simula la conexión con los acuíferos superficiales a

través de los basaltos, logrando reproducir el comportamiento del sistema de manera razonable y coherente.

Agradecimientos

El trabajo ha sido financiado por: ANPCyT (Proyecto PICT 2008/2071) y recursos propios del Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff". Se agradece a los revisores por los comentarios que han mejorado el manuscrito.

Referencias

- Campos, H. (2004). *Geosul* 19(37), 47–65
- Carrera, J., Alcoleta, A., Medina, A., Hidalgo, J. y Slooten, L. (2005). *Hydrogeology Journal* 13, 206–222.
- Fernandes, A.J., Maldaner, C.H. y Rouleau, A. (2011). *Geologia USP. Série Científica* 11, 3-20.
- Fernandes, A.J., De Assis Negri, F., Azevedo Sobrinho, J.M. y Varnier, C. (2012). *Boletín Geológico y Minero* 123, 325-339.
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Kiang Chang, H., Caetano-Chang, M.R. y Nogueira Pressinotti, M.M. (2012). *Boletín Geológico y Minero* 123 (3), 249-265.
- Gómez, A., Rodríguez, L. y Vives, L. (2010). *Hydrogeology Journal* 18(7), 1667–1684.
- Hirata, R., Geisicki, A., Sracek, O., Bertolo, R., Giannini, P.C. y Aravena, R. (2011). *Journal of South American Earth Sciences* 31(4), 444-456.
- LEBAC (2008). *Informe Final de Hidrogeología do Projeto Aquífero Guarani*. Coord.: Gastmans, D., Chang, H.K., Equipo: Paula e Silva, F., Correa, S.F., Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 172 p.
- Manzano, M. y Guimaraens, M. (2012). *Boletín Geológico y Minero* 123(3), 281–295.
- Medina, A. y Carrera, J. (1996). *Water Resources Research* 32(10), 3063-3076.
- Mira, A., Veroslavsky, G., Rossello, E., Vives, L. y Rodríguez, L. (2015). *Journal of South American Earth Sciences* 62, 148-163.
- Rodríguez, L., Vives, L. y Gómez, A. (2013). *Hydrology and Earth System Sciences* 17(1), 295–314.
- Sracek, O. y Hirata, R. (2002). *Hydrogeology Journal* 10, 643- 655.
- Vives, L., Rodríguez, L. y Gómez, A. (2008). *Modelación numérica regional del Sistema Acuífero Guarani. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guarani*. Informe Técnico. Consorcio Guarani, Montevideo. 144 p.