

Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión

D. Gastmans⁽¹⁾, G. Veroslavsky⁽²⁾, H. Kiang Chang⁽¹⁾, M. R. Caetano-Chang⁽¹⁾ y M. M. Nogueira Pressinotti⁽³⁾

(1) LEBAC, Laboratório de Estudos de Bacias, UNESP Campus de Rio Claro, Av 24A, 1515 Bela Vista, Rio Claro (SP), Brazil
gastmans@rc.unesp.br; chang@rc.unesp.br; mrchang@rc.unesp.br

(2) Facultad de Ciencias, Universidad de la Republica, UDELAR Iguá, 4225, CP 11400, Montevideo, Uruguay
gerardo@fcien.edu.uy

(3) Instituto Geológico, IG/SMA-SP, Av. Miguel Stefano, 3900, São Paulo (SP), - Brazil
marciapressinotti@hotmail.com

RESUMEN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) se extiende por los territorios de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, constituyendo un típico ejemplo de acuífero transfronterizo. Representa una importante fuente de suministro de agua potable para la población que vive en su área de ocurrencia, por lo cual mecanismos de gestión compartida están siendo consolidados, en virtud de que las legislaciones relativas a los recursos hídricos subterráneos son distintas en los cuatro países. En este sentido, el modelo hidrogeológico conceptual regional debe constituir una herramienta a ser considerada en la toma de decisiones, principalmente en las áreas donde el flujo de las aguas subterráneas sobrepasa los límites territoriales. El SAG es considerado un acuífero continuo, constituido por rocas sedimentarias arenosas de las cuencas del Paraná y Chacoparanense comprendidas entre la discordancia permo-eotriásica y los derrames basálticos del Cretácico Inferior. El flujo de las aguas subterráneas es fundamentalmente de Norte a Sur, acompañando el eje principal de las cuencas. Varias estructuras geológicas regionales, como el Arco de Ponta Grossa y la Dorsal Asunción – Río Grande, influyen directamente en las condiciones de flujo, distinguiéndose cuatro compartimientos de flujo. Áreas de recarga regional están asociadas principalmente a las fajas de afloramiento al Este y Norte, mientras que las fajas al Oeste representan áreas de recarga local y, también, áreas de descarga regional, principalmente en Mato Grosso do Sul. Flujo transfronterizo se observa en áreas restringidas de las fronteras de los cuatro países; sin embargo, en función del tiempo de permanencia de las aguas en el acuífero, el mismo merece cuidados especiales en relación a una sobreexplotación, principalmente sus áreas confinadas.

Palabras clave: acuífero, agua subterránea, hidrodinámica, modelo hidrogeológico conceptual, Sistema Acuífero Guaraní

Hydrogeological conceptual model for Guaraní Aquifer System: A tool for management

ABSTRACT

The Guaraní aquifer system (GAS) extends beneath the territories of Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay and thus represents a typical example of a transboundary aquifer. The GAS is an important source of drinking water for the population living within its area. Because of differences in the legal norms concerning water resources in these four countries, an urgently required legal framework for the shared management of the groundwater is currently being drawn up. Within this context, the conceptual regional hydrogeological model should be used as an important tool to delineate shared actions, particularly in regions where the groundwater flow is transboundary. The GAS is considered to be a continuous aquifer made up of Mesozoic continental clastic sedimentary rocks that occur in the Parana and Chacoparanense sedimentary basins, and is bounded at its base by a Permo-Eotriassic regional unconformity and at the top by lower-Cretaceous basaltic lava. The groundwater flow shows a regional trend from N to S along the main axis of these basins. With regard to the major tectonic structures of these sedimentary basins, various main hydrodynamic domains can be

distinguished, such as the Ponta Grossa arch and the Asuncion-Rio Grande dorsal. Regional recharge areas are primarily located in the eastern and northern outcrop areas, whilst the western end of the GAS, the Mato Grosso do Sul, contains zones of local recharge and regional discharge. Transboundary flow is observed in areas confined to the national borders of the four countries. Nevertheless, due to the groundwater residence times in the GAS special management actions are called for to prevent over-exploitation, particularly in the confined zones of the aquifer.

Key words: aquifer, groundwater, Guarani Aquifer System, hydrodynamic, hydrogeological conceptual model

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and Methods

The Guarani Aquifer System (GAS) is a transboundary aquifer located on the western edge of the South America continent (lat. 16° to 32°S; long. 47° to 60°W) and extends for 1,087,879.5 Km² beneath the four countries of the southern cone (Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay), home to over 90 million people, all of whom share its groundwater resources (Figure 1).

The GAS has been studied since 1970, although the first work based on a complete well dataset was only conducted in 1995 and 1999 by Araújo and colleagues. These authors constructed the first conceptual hydrogeological model for the aquifer, using isopach, structural contour, isothermal and potentiometric mapping.

Due to the importance of the GAS for this region, however, a GEF funded project, the Guarani Aquifer Program for groundwater resource sustainability and environmental protection (PSAG), was undertaken to produce a technical basis for its management. One of the most important tasks of the PSAG was to construct a conceptual hydrogeological model to support management actions. Using a dataset of over 600 wells, containing hydrogeological, hydrochemical and stratigraphic information (Fig. 1), together with the information collected by geological, geophysical and hydrochemical surveys carried out during the project, it has been possible to construct the model presented in this paper.

Results and Discussion

The GAS lithostratigraphic units are represented by the Mesozoic rocks of the Paraná and Chacoparanaense sedimentary basins. The depositional history and geometry of these units are directly related to the geological evolution of this vast sedimentary accumulation area, laid down since the Ordovician. At the end of the Permian, several significant orogenic events took place at the border of Gondwana, originating the continentalization of the basin, as a result of which a regional unconformity can be distinguished throughout the basin. During this period a complex palaeogeographic framework was established, resulting in a mosaic of lithostratigraphic units (Fig. 2), on top of which were deposited the fluvial and aeolian sediments of the GAS lithostratigraphic units (Fig. 3). The upper limit of the GAS is represented by the lava flows that covered these sedimentary basins at the beginning of the Cretaceous, which may be over 1,500 metres thick (Fig. 4). Its geometry is controlled by tectonic structures that match those determining the configuration of the Parana and Chacoparanaense basins. These structures reflect several post-Paleozoic tectonic events that occurred in the South-American continent and are responsible for significant erosion of the previously deposited sediments. The most important structures are: to the north, the Canastra and São Vicente arches; to the west, the Assuncion and Pampeano arches; and to the south, the Rio de la Plata arch. The GAS is on average up to 250 m thick, varying from 640 m at the centre of Mato Grosso do Sul state (BR) to 8 m near the border of Santa Catarina (BR), Rio Grande do Sul (BR) and Argentina (Figs. 5 and 6).

The geological framework of the Paraná and Chacoparanaense basins is responsible for controlling the groundwater flow in the GAS. The aquifer is recharged at outcrops along the eastern and northern borders, which were lifted by reactivation during the break-up of Gondwana, and the groundwater tends to flow from north to south, following the axis of the Paraná Basin. On the basis of the groundwater patterns four hydrodynamic domains have been recognised within the GAS: N.E, E, W and S (Fig. 7). The N.E domain is characterized by a significant recharge zone related to the high outcropping of some units of the aquifer, with groundwater flowing toward the Paraná River. The hydraulic gradients vary from 3 to 5 m/km near outcrop areas and decrease to around 0.1 m/km in the deeper parts of the GAS. Groundwater flows mainly from east to west through the E domain, which is separated from the N.E domain by the Ponta Grossa arch. This flow direction is driven by the uplift of the GAS border, which is also affected by a large number of di-basic dykes. The outcrop zone, running from the south of the Lages dome to the town of Torres (RS-BR), is a no-flow region in which the hydraulic gradients are very uniform (from 2 to 3 m/km). A regional discharge zone exists along the E-W outcrop in the Rio Grande do Sul state (BR), discharging the water charged at the

Lages Dome. The western border of the GAS (W domain) contains a potentiometric divide associated with recharge and discharge areas. The main recharge area, to the north, presents radial flow towards the centre of the basin and also to the outcrop region. Regional discharge of the GAS groundwater occurs along the outcrop area in Mato Grosso do Sul state and in Paraguay. The hydraulic gradients are higher in the north of this division (1.5 to 2 m/km), whilst toward the confined zone of the GAS the gradients decrease to 0.8 to 0.5 m/km.

The groundwater flow deriving from these three domains (NE, E and W) converges along the central axis of the basin, connecting the northern area of the GAS to the S. domain. There is an important artesian zone along the central axis of the basin.

The S domain is located below the Assuncion-Rio Grande dorsal. Here the groundwater flows from east to west from recharge areas associated with the outcrops in Uruguay. The region of Mercedes, in Corrientes Province in Argentina, seems to represent a local recharge area. There is no evidence regarding the presence of discharge areas in this domain.

The quality of the groundwater is generally very good for human consumption, containing very low mineralization levels in most areas. Four hydrochemical zones can be distinguished throughout the aquifer, related to geochemical evolution of groundwater recharged in the outcrops towards its deep central areas (Fig. 8). The main hydrochemical zone (Zone I) is characterized by the Ca-Mg-HCO₃ content of the water, although its overall mineral content is low. The groundwater in Zone II contains essentially Na-HCO₃, its solid concentrations in solution increasing concomitantly with an increase in electrical conductivity. The groundwaters along the border of Argentina and Uruguay contain chloride, probably due to a contribution from underlying aquifer units.

The groundwater classified in Zone III, coinciding more or less with the central axis of the Parana Basin, is classified as Na-SO₄-Cl-HCO₃ type; its electric conductivity is high and its mineral content is quite considerable. Problems related to natural modifications of the water quality are found in this zone, mainly with regard to high concentrations of fluoride and sulphate. In Zone IV, in the area of Entre Rios, Chaco, Formosa and Santiago del Estero provinces (AR), direct observations of the composition of GAS groundwater have not been possible, although geoelectric loggings from oil wells drilled in this zone suggest Na-Cl groundwater types, presenting high dissolved salt contents, as revealed by the low resistivity values of < 2 Ωm registered.

The hydrochemical evolution of the groundwaters along the main flow lines in the aquifer can be put down to several reactions and geochemical processes: carbonate and silicate dissolution occurs at the outcrop areas due to recharge by meteoric waters rich in dissolved CO₂; ion-exchange processes are responsible for the evolution of groundwaters from Ca-HCO₃ to Na-HCO₃ type; and ascending flows deriving from underlying aquifers may well be responsible for the hydrochemical changes in groundwaters from Zone II to Zone III. GAS groundwaters present a δ¹⁸O content varying from -4.3‰ to -10.2‰ V-SMOW, and a δ²H content from -31‰ to -72‰ V-SMOW. In most of the recharge areas the stable-isotope composition of the precipitation matches the stable-isotope values of present-day precipitation. Nevertheless, several zones in the confined part of the aquifer, such as Sao Paulo state (BR), are characterized by a higher negative-isotope content than present-day precipitation (up to 3‰ in δ¹⁸O). These unusual isotope values are not found in the southern part of the aquifer and are still a topic of debate as far as possible changes since the palaeoclimate are concerned. The available 14C results confirm the presence of recently recharged waters in the outcrop areas. A rapid decline of 14C activity has been found along the flow paths towards the confined part of aquifer. Groundwater depleted in δ¹⁸O correlated to low 14C contents could indicate corrected ages of over 35,000 years BP.

Introducción

En los acuíferos someros y de pequeña extensión la disponibilidad hídrica está generalmente controlada en forma directa por las tasas de recarga y descarga en los cursos de agua superficial. En cambio, en los grandes sistemas acuíferos regionales las características del reservorio, controladas por los rasgos geológicos, poseen mayor importancia en la disponibilidad hídrica que las tasas de recarga, ya que las mismas influyen directamente en la distribución de las conductividades hidráulicas y en los patrones de flujo (Folch *et al.*, 2011). De esta forma, la gestión de las aguas subterráneas en estos acuíferos debería estar susten-

tada en el conocimiento de la arquitectura geológica y de los posibles efectos sobre las condiciones de flujo y recarga derivadas de las condiciones geológicas en esas unidades.

En este contexto, debe dedicarse especial atención a la comprensión de la arquitectura geológica y su relación con el flujo de aguas subterráneas en los acuíferos transfronterizos, ya que las líneas de flujo traspasan las fronteras políticas, promoviendo la transferencia de agua desde un país o estado a otro, aún cuando estas sean marcadas por importantes rasgos geomorfológicos. El establecimiento de cualquier protocolo legal para la gestión del recurso debe pasar,

necesariamente, por la comprensión de la dinámica del agua en el reservorio (Puri *et al.*, 2001).

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) es un acuífero transfronterizo, localizado en la región occidental del continente Sudamericano, entre los paralelos 16°S y 32°S y los meridianos 47°W y 60°W, abarcando un área total de 1.087.879,5 km². Sus recursos hídricos son compartidos por una población estimada en 90 millones en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (Figura 1). Este enorme acuífero representa, para buena parte de su población, el principal reservorio de agua subterránea actualmente en explotación, siendo utilizado en el abastecimiento público de agua de diversas ciudades, así como en la producción agroindustrial y el turismo (OEA, 2009).

El SAG es objeto de estudio de investigadores de los cuatro países desde la década de 1970. Entre las contribuciones pioneras se destacan los trabajos de Maack (1970), DAEE (1974) Gilboa *et al.*(1976) y Rebouças (1976). Posteriormente, siguieron otros estudios hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos como los de Gallo y Sinelli (1980), Silva (1983), Rosa Filho *et al.* (1987), Kimmelman *et al.* (1989), Montañón *et al.* (1998), Silva-Busso (1999), Meng y Maynard (2001), Sraceck y Hirata (2002), Oleaga (2002), Rosa

Filho *et al.* (2003), Fariña *et al.* (2004), Machado (2005), Larroza *et al.* (2005), Bonotto (2006), Gastmans (2007), Hindi (2007), y Gastmans *et al.*(2010a), entre otros.

Entre estos estudios se destacan los encabezados por Araújo *et al.* (1995 y 1999), los cuales pueden considerarse como los primeros trabajos sistemáticos de compilación de datos de pozos sobre el SAG. Los mismos posibilitaron la elaboración del primer modelo hidrogeológico conceptual del "Acuífero Gigante del Mercosur", denominación utilizada por esos autores para el SAG, el cual fue representado por medio de mapas de isopacas, contorno estructural, isotemperaturas y potenciométrico. Según Araújo *et al.* (1995, 1999) la unidad acuífera está constituida por estratos triásicos (Formación Botucatu y Grupo Rosario do Sul en Brasil, Formación Buena Vista en Uruguay) y jurásicos (Formación Botucatu en Brasil, Formación Misiones en Paraguay y Formación Tacuarembó en Argentina y Uruguay).

Campos (2000), sobre la base de los trabajos de Araújo *et al.* (1995, 1999) y con el fin de elaborar un modelo numérico, presentó el primer mapa hidrogeológico del SAG, definiendo las áreas de recarga y descarga y una importante zona de surgencia.

Con el volumen de información generada, y teniendo en cuenta la importancia del SAG para la región, investigadores de diversas universidades propusieron ampliar el conocimiento del mismo con el fin último de instrumentar la gestión sustentable del recurso, lo cual debería considerarse una acción estratégica común y necesaria a los cuatro países. Esta idea se concretó con la ejecución de un proyecto conjunto denominado "Proyecto de Protección Ambiental y Desarrollo Sustentable del Sistema Acuífero Guaraní" (PSAG). El mismo fue financiado por el Banco Mundial apoyado por el Organismo Internacional de Energía Atómica y por los cuatro países, cuyo arreglo institucional permitió la compilación y ordenamiento de informaciones y datos geológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos del SAG, que se encontraban dispersos entre estos países, en una base de datos unificada. A la información existente se le agregaron datos complementarios obtenidos por levantamientos técnicos específicos de empresas de servicios, contratados durante la ejecución del proyecto, que permitieron una importante ampliación del conocimiento sobre los más diversos aspectos del SAG (OEA, 2009).

La acumulación de información a lo largo del PSAG permitió la construcción de un modelo conceptual hidrogeológico e hidroquímico del SAG, incluyendo la definición de controles sedimentarios y tectónicos, los cuales condicionan la geometría actual del acuífero, así como las condiciones de flujo. Los estudios

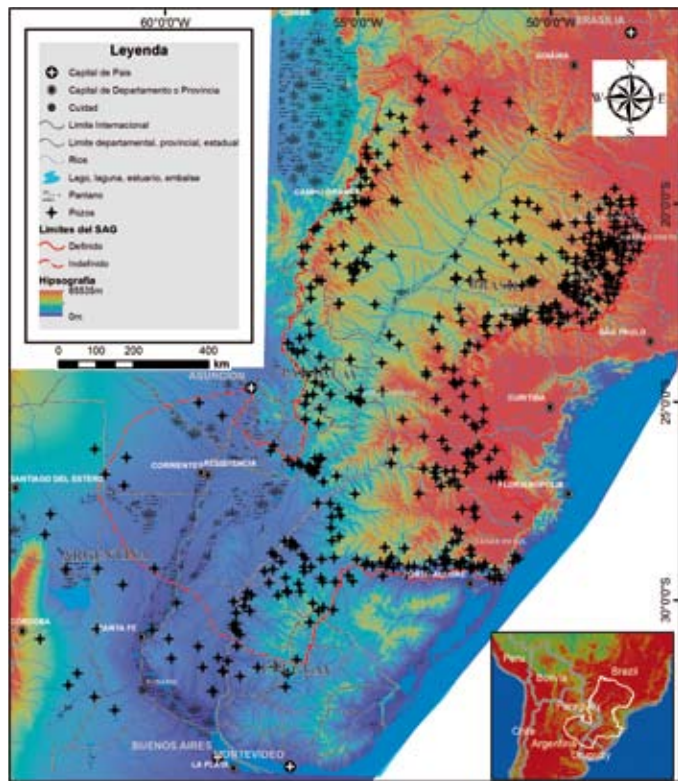


Figura 1. Mapa de ubicación del Sistema Acuífero Guaraní y de los pozos seleccionados de la base de datos.

Figure 1. Map of the situation of the Guaraní Aquifer System and the wells chosen from the data base.

realizados mostraron la fuerte relación existente entre la arquitectura sedimentaria y estructural y las principales figuras hidrodinámicas e hidroquímicas del SAG.

El objetivo del presente trabajo es presentar el modelo hidrogeológico conceptual generado, indicando cuales son los principales rasgos hidrogeológicos que deben ser considerados por los gestores en la creación del entramado institucional común a los cuatro países, con el fin de compartir la gestión del recurso.

Métodos

A partir de la colaboración de técnicos de organismos de gestión de recursos hídricos de los cuatro países, se creó una base de datos de pozos, la cual contó con casi 7500 registros, de los cuales fueron seleccionados 594 pozos, conteniendo datos e informaciones hidrodinámicas (profundidad del nivel del agua) y estratigráficas (profundidad del techo del acuífero, potencia de las unidades, columna estratigráfica definida y breve descripción litológica). La localización de los pozos seleccionados se presenta en la Figura 1.

Además del banco de datos, a lo largo del PSAG se realizó una extensa campaña de muestreo de agua subterránea, alcanzándose un total de casi 450 muestras colectadas para la realización de análisis físico-químicos e isotópicos, que contribuyeron a la elaboración del estudio hidroquímico e isotópico específico.

Complementando la información necesaria para la elaboración del modelo conceptual de flujo de las aguas subterráneas del SAG, en el ámbito del proyecto, fueron contratados levantamientos geológicos y geofísicos de campo. Los mismos permitieron comprender las relaciones geológicas entre las unidades litoestratigráficas de las cuencas del Paraná y Chacoparanense, especialmente de aquellas relacionadas al SAG, y adicionalmente caracterizar petrográfica y petrofísicamente las areniscas constituyentes del acuífero.

Presentación de resultados

Desde el punto de vista físico, un acuífero puede ser subdividido en dos componentes: una estática y otra dinámica. La componente estática, representada por las rocas y su arquitectura geológica controla el movimiento de la componente dinámica, el agua, lo cual ocupa los poros o espacios vacíos de las rocas (Winkler *et al.*, 2003). Teniendo en cuenta estas dos componentes, la construcción del modelo hidrogeológico conceptual de flujo de las aguas subterráneas en

el SAG, en el ámbito del PSAG, consideró un abordaje distinto al de aquellos preocupados apenas con la caracterización de la componente dinámica del sistema. En este sentido, se buscó, a partir del conocimiento del marco geológico en el cual está inserto el acuífero, definir las respuestas de la componente dinámica del sistema.

Marco geológico

Las unidades litoestratigráficas constituyentes del SAG, representadas por los registros litológicos mesozoicos de las cuencas del Paraná y Chacoparanense, poseen una historia deposicional y geométrica íntimamente relacionada a ese amplio espacio de acumulación sedimentaria. Estas dos importantes cuencas sedimentarias del continente sudamericano representan, en tiempo y espacio, un escenario multicíclico compuesto por la superposición de al menos tres cuencas diferentes, desarrolladas en distintos ambientes tectónicos, como resultado de esfuerzos geodinámicos del borde Occidental de Gondwana (de Santa Ana *et al.*, 2006). Estas cuencas poseen un registro sedimentario y vulcanosedimentario que se extiende desde el Ordovícico hasta el Cretácico, indicando la evolución geológica de las provincias y los contextos paleogeográficos, tectónicos y sedimentarios de esa región (Zalán *et al.*, 1990; Milani 1997; Milani *et al.*, 1998).

Los registros sedimentarios paleozoicos de las cuencas del Paraná y Chacoparanense corresponden a las tres primeras supersecuencias reconocidas por Milani (1997): Río Ivaí (RI), depositado durante el período comprendido entre el Ordovícico y el Silúrico; Paraná (P), de edad devónica; y Gondwana I (GI), depositada durante el Permocarbonífero. Estas supersecuencias representan el desarrollo de un importante registro marino, con la ocurrencia de varios ciclos transgresivos – regresivos, entre los cuales se reconocen importantes lagunas en el registro estratigráfico.

Hacia el final del Pérmico, la naturaleza de los registros sedimentarios de las cuencas fue modificada debido al desarrollo de importantes eventos orogénicos que ocurrieron a lo largo del margen occidental de Gondwana, tales como la Orogenia Sanrafaélica (La Ventana – Cabo) y el arco magmático Choiyoi, los cuales son asociados por Zalán *et al.* (1990) a la reactivación de un conjunto de lineamientos del substrato de las cuencas. Estos eventos orogénicos, ocurridos en el borde occidental gondwánico terminaron por restringir, o cerrar definitivamente, la comunicación del interior cratónico con el Océano Panthalassa al Oeste, iniciándose un proceso de retiro del mar y con-

secuente de continentalización del área, a la que se asociaron elevaciones de áreas cratónicas y relleno de depocentros sedimentarios (Fulfaro et al., 1982; Gohrbandt, 1993; Milani, 1997; Ramos y Milani, 1998).

Este escenario paleogeográfico reunía, al final del Pérmico, sedimentos esencialmente siliciclásticos, de distintas características, compuestos por importantes paquetes de pelitas, argilitas, limolitas y areniscas, representadas por las formaciones Corumbataí, Rio do Rasto, Sanga do Cabral (Brasil), Buena Vista (Uruguay/Argentina) y Tacuary (Paraguay) (Figura 2). Este mosaico sedimentario constituyó el substrato geológico sobre el cual se depositaron las unidades componentes del SAG.

La implantación de una extensa superficie de discordancia marca el pasaje del Pérmico hacia el Triásico en las cuencas del Paraná y Chacoparanense. La misma es fácilmente reconocida en superficie y subsuelo a lo largo de toda la extensión de estas cuencas, siendo considerada como el límite inferior de las unidades litoestratigráficas constituyentes del SAG.

Con el inicio del intenso vulcanismo que recubrió estas cuencas hacia el inicio del Cretácico, se produ-

ce el final de ese amplio escenario de sedimentación continental jurásica-cretácica, constituyendo los basaltos la superficie techo del SAG. La identificación de esos límites, con base en criterios geológicos objetivos, permitió definir el SAG como el conjunto de rocas sedimentarias mesozoicas continentales, esencialmente siliciclásticas, con alta capacidad de almacenar y transmitir agua, en continuidad física (o aparente continuidad), limitado en techo y base por importantes discontinuidades geológicas, de carácter regional, en las cuencas del Paraná y Chacoparanense (LEBAC 2008a, 2008b).

La evolución geológica de las cuencas entre el Triásico y el inicio del Cretácico es pautada por una definitiva continentalización, subsidencia prácticamente nula y climas cálidos, húmedos a desérticos. En estas condiciones fueron depositados los sedimentos fluviales y eólicos que constituyen las unidades estratigráficas del Sistema Acuífero Guaraní (Figura 3).

La unidad basal del SAG es la Formación Santa María, la que posee un desarrollo restringido a una faja de dirección E-W en la región central del Estado de Río Grande do Sul. La misma está representada por un conjunto de estratos arenosos con potencias variables, depositado en un pequeño rift triásico con orientación de *hemigrabens* en dirección NW-SE, asociado a la reactivación extensiva ocurrida durante el Triásico en el margen occidental de Gondwana (Faccini et al., 2003; Zeffass et al. 2004). Apoyada sobre la Formación Santa María ocurre la Formación Caturrita, de origen fluvial. Esta unidad reúne esencialmente cuerpos lenticulares de areniscas finas a conglomeráticas, de potencias métricas, intercaladas con pelitas macizas a laminadas y culminando con depósitos de estratos arenosos, denominados Areniscas Mata (Faccini, 1989), caracterizados por la abundante presencia de troncos fosilizados correspondientes a la flora del Triásico Medio (Faccini et al. 2003).

La Formación Pirambóia, con importantes potencias en toda la región central y norte del SAG, reúne areniscas en general finas a muy finas, subfeldespáticas, con estratificación cruzada de porte variable, además de paquetes métricos sub-horizontales de areniscas muy finas a limolíticas, generalmente bioturbadas o preservando laminación paralela formada por la migración de ondulaciones eólicas. Estas litologías caracterizan un conjunto de facies eólicas de dunas, interdunas (principalmente húmedas y subordinadamente secas y acuáticas) y sábanas de arena, comúnmente en interacción con depósitos de canales y planicies de inundación fluviales (Caetano-Chang, 1997).

Las areniscas de la Formación Botucatu representan el principal reservorio del SAG y son correlacionables con las areniscas de la Formación Misiones en



Figura 2. Mapa geológico simplificado del substrato del Sistema Acuífero Guaraní.

Figure 2. Simplified geological map of the substrate of the Guaraní Aquifer System.

| País | Uruguay | Argentina | Paraguay | Brazil | | |
|-------------------|--|--|-----------------------------|-----------------|--------------|------------|
| Cuenca Sedimentar | Cuenca Norte | Chacoparanaense | Cuenca del Parana | Sul | Centro | Norte |
| POS-SAG Ki | Arapey | Serra Geral o Posadas/Solari (Mariano Boedo en la región Occidental) | Alto Paraná | Serra Geral | | |
| SAG J-Ki Tr | (Miembro Superior) Tacuarembó (Miembro Inferior) Itacumbú? ① | Misiones o Tacuarembó | Misiones | Botucatu | | |
| | ② | | | Caturrita | Pirambóia | |
| PRE-SAG P | Buena Vista Yaguari | Buena Vista | Tacuary Grupo Independencia | Sanga do Cabral | Rio do Rasto | Corumbataí |

- ① Discordancia Jurásica Local
- ② Discordancia Regional Permo-Eotriassica

Figura 3. Unidades constituyentes del SAG.
Figure 3. Geological units comprising the GAS.

territorios argentino y paraguayo y con las areniscas de la Formación Tacuarembó (Miembro Superior) en Uruguay, constituyendo una delgada cobertura arenosa, más o menos continua a lo largo de las cuencas del Paraná y Chacoparanaense. Esta unidad esta constituida por estratos de areniscas finas a medias, esencialmente cuarzosas, bien redondeadas, con tonalidades castañas rojizas. Presenta sets con estratificación cruzada y con espesores entre 1,5 y 10 m (PyT, 2007). La Formación Botucatu se apoya en discordancia sobre la Formación Pirambóia, superficie marcada por un brusco cambio textural y de coloración, con niveles conglomeráticos.

Los eventos diagenéticos que se reconocen en las formaciones Botucatu y Pirambóia están relacionados a la presencia de matriz arcillosa, disolución de feldspatos, precipitación de cemento silíceo, al cual esta asociado al crecimiento de feldspatos, en las proximidades de las fajas de afloramientos, presencia de *coatings* de óxidos e hidróxidos de hierro y presencia de cemento carbonático en la región central de la

Cuenca de Paraná (França *et al.*, 2003; Caetano-Chang y Wu, 2006; PyT, 2007; Gastmans, 2007; Gastmans *et al.*, 2010a; Hirata *et al.*, 2011).

En la región sur del Estado de Rio Grande do Sul (BR) y en territorio uruguayo, debajo de las eolianitas de la Formación Botucatu/Tacuarembó (Miembro Superior), ocurre una unidad fluvio-eólica denominada Guará en Brasil, y que en el territorio uruguayo corresponde al Miembro Inferior de la Formación Tacuarembó. Esta unidad es constituida por facies de areniscas finas, blanquecinas a amarillentas, con intercalaciones ocasionales de argilitas y pelitas, con laminaciones plano-paralelas y presencia de vertebrados e invertebrados fósiles que indican una edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Perea *et al.*, 2001; Yanbin *et al.*, 2004).

La reactivación tectónica asociada a la importante tectónica extensiva global que culminó con la ruptura de Pangea, denominada por Almeida (1972) como "Reactivación Wealdeniana", se inició con movimientos corticales diferenciales en el interior de los

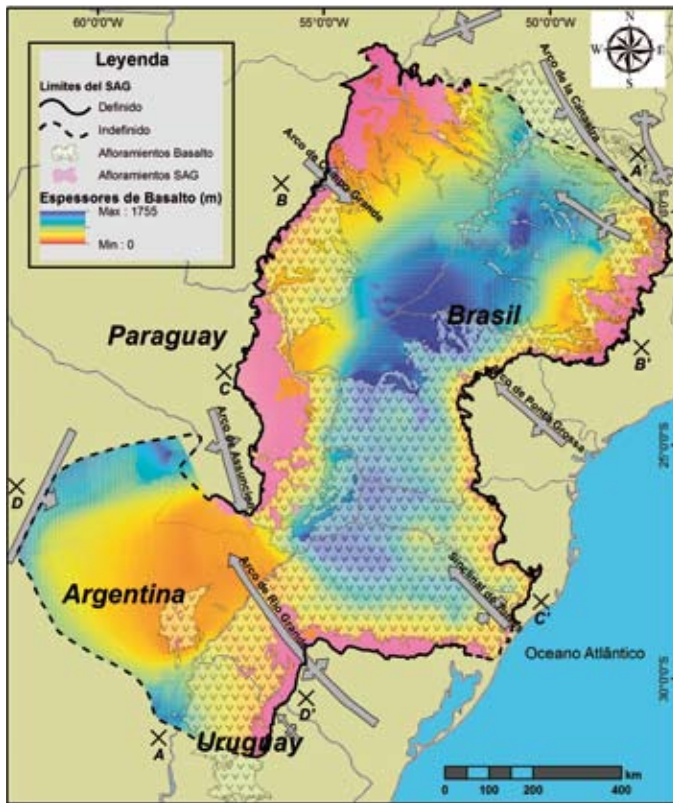


Figura 4. Mapa de isopacas de la Formación Serra Geral.
 Figure 4. Isopach map of the Serra Geral formation.

núcleos cratónicos gondwánicos, favorecidos por la reactivación de antiguas fallas y, consecuentemente, originando levantamiento de bloques y arcos, como el Arco de Ponta Grossa, así como la formación de las cuencas marginales atlánticas y la intensificación de la subsidencia en el interior de las cuencas del Paraná y Chacoparanense. Asociada a esta reactivación se produce la salida de grandes volúmenes de basaltos que, en algunos sectores superan los 1500 m de potencia (Figura 4), sobrepasando esas zonas de debilidad cortical reactivada y proyectándose a partir del Arco de Ponta Grossa hacia todo el interior de la cuenca (Milani *et al.*, 1994).

Geometría del SAG

Los espesores del conjunto de las rocas que constituyen el SAG, comprendidas entre la discordancia permo-eotriásica y los basaltos, varía desde 640 m, en la porción central del Estado de Mato Grosso Sul (BR), hasta prácticamente desaparecer en las proximidades del límite entre los estados de Santa Catarina (BR), Río Grande do Sul (BR) y el territorio argentino (e.g. el pozo São João do Oeste, Santa Catarina (BR), muestra

8m de potencia del SAG). En promedio, los espesores del sistema acuífero no superan los 250 m (Figura 5).

La geometría del SAG está fuertemente afectada por las principales estructuras de las cuencas del Paraná y Chacoparanense. Se observa que próximo y prácticamente paralelo a la traza de la Dorsal Asunción – Río Grande (DARG) ocurre una significativa disminución de los espesores del SAG, definiendo la existencia de un alto estructural, posiblemente activo entre el Pérmico/Triásico Inferior y el inicio de los derrames basálticos del Cretácico Inferior, marcando la separación en dos cuencas, al Norte y al Sur, donde se depositaron las areniscas constituyentes del SAG.

El depocentro localizado en la región norte es paralelo al eje principal de la Cuenca del Paraná, extendiéndose hasta el límite entre los estados de Paraná (BR) y Santa Catarina (BR), con una inflexión en dirección a la región central del estado de São Paulo (BR). En el estado de Paraná (BR) el depocentro fue fuertemente afectado por el levantamiento asociado al Arco de Ponta Grossa, principalmente en la porción próxima a la faja de afloramientos.

Los límites del SAG son definidos por fajas de afloramientos de las unidades que lo constituyen y por algunos elementos estructurales positivos, responsables por la configuración de la Cuenca del Paraná, y

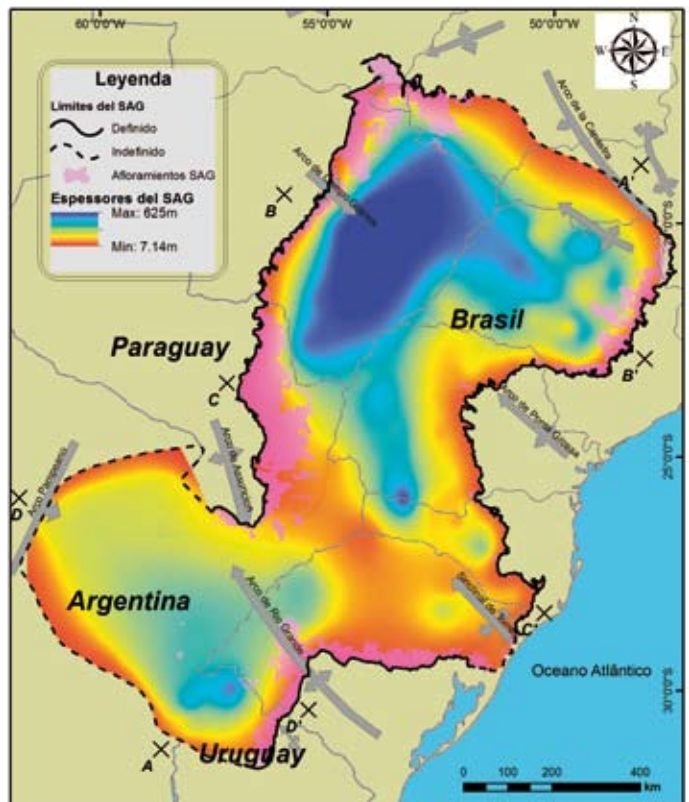


Figura 5. Mapa de isopacas del Sistema Acuífero Guaraní.
 Figure 5. Isopach map of the Guaraní Aquifer System.

que reflejan varios fenómenos pos-paleozoicos, ocurridos en el continente sudamericano y responsables por la erosión significativa de parte del conjunto sedimentario originalmente depositado. Estas estructuras son: al norte, los arcos de Canastra y São Vicente; al oeste, los arcos de Asunción y Pampeano; y al sur, el arco del Río de la Plata (Figura 5).

Los límites de los bordes Este y Oeste del SAG están asociados a las extensas fajas de afloramientos con dirección preferencial N-S. En la faja este, las unidades constituyentes del SAG se desarrollan en los estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina y Río Grande do Sul, en territorio brasileño, y en los departamentos de Rivera y Tacuarembó en el territorio uruguayo. En la faja oeste, en los afloramientos de los estados de Goiás (BR), Mato Grosso (BR) y Mato Grosso do Sul (BR) y en territorio paraguayo. Estos límites están claramente condicionados por el levantamiento generalizado del borde cratónico y del margen continental, conforme fue propuesto por Araújo *et al.* (1995), y a eventos asociados a la dinámica del Arco de Asunción, principalmente en la porción Sur del borde Oeste. Sin embargo, se observa un levantamiento más intenso en la faja este de afloramientos del que se registra en la faja Oeste (Figura 6).

En su región norte, el SAG presenta límite estratigráfico dado por el acuñaamiento de las unidades li-

toestratigráficas que lo constituyen. El reconocimiento de este acuñaamiento fue establecido sobre la base de los perfiles de los pozos de esa región, ya que el límite de las unidades está cubierto por los basaltos de la Formación Serra Geral.

El límite meridional del acuífero en territorio argentino y uruguayo también se presenta cubierto por basaltos y por sedimentos pos-cretácicos, siendo sugerida por los datos e información de subsuelo, una disminución progresiva de los espesores de las formaciones Misiones y Tacuarembó, como resultado de la actuación del Arco del Río de la Plata.

El reconocimiento de rasgos sismoestratigráficos de las unidades asociadas al SAG, sumado a la observación de la presencia de basaltos y de elementos morfoestructurales de expresión regional que controlaron la depositación y/o erosión de las unidades del SAG, fueron los criterios adoptados para la definición del límite occidental en territorio argentino. En este sentido, el Lineamiento de Otumpa (Arco Pampeano) representa un importante elemento morfoestructural del área, que sería la representación superficial de un bloque elevado, resultado de la reactivación de fallas asociadas a la estructura de Las Breñas, límite occidental del *hemigraben* relleno por sedimentitas de edad paleozoico inferior (Rossello y Bordampé, 2005).

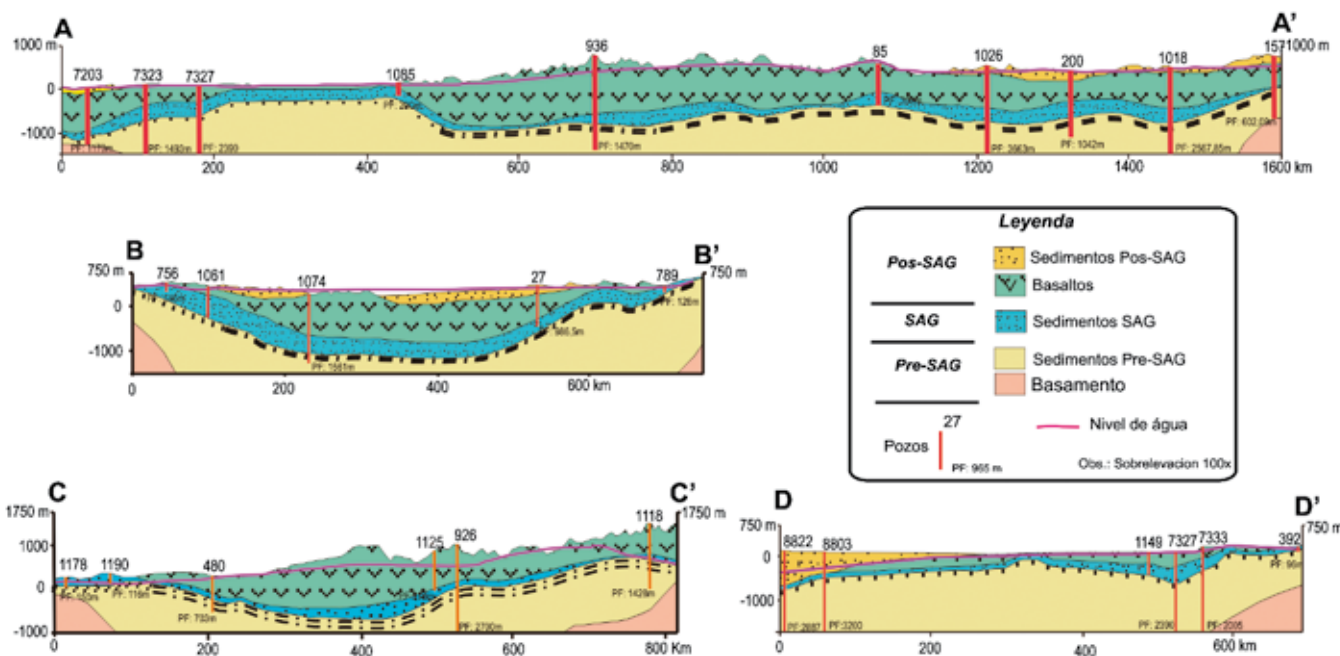


Figura 6. Secciones geológicas que muestran el levantamiento predominante en el borde E en relación al borde W, bien como las variaciones de espesores en las areniscas del SAG. La ubicación de las secciones se presenta en las figuras 4 y 5.

Figure 6. Geological sections showing the predominant lifting at the eastern edge compared to the western edge, together with the variations in thickness of the sandstones in the GAS. The sites of the sections are shown in Figures 4 and 5.

Hidrodinámica

Regionalmente, a partir de las zonas de recarga hasta las áreas de descarga, el flujo de aguas subterráneas del SAG es desde el Norte hacia el Sur, acompañando el eje de la Cuenca del Paraná. El levantamiento prominente de la faja Este de la cuenca, principalmente en su compartimento Norte, posibilitó la erosión de las secuencias sedimentarias sobrepuestas a las unidades constituyentes del SAG. Como consecuencia, se originaron las zonas de recarga para el acuífero, algunas de ellas con flujo radial a partir de los puntos más elevados, como por ejemplo, en el extremo Noreste de la faja de afloramientos (límite entre los estados de São Paulo (BR) y Minas Gerais (BR)), en el extremo Norte de la faja de afloramientos en Goiás (BR), en el Arco de Ponta Grossa en el estado de Paraná (BR) y en el Domo de Lages en el estado de Santa Catarina (BR) (Figura 7).

Las principales áreas de descarga regional para las aguas del SAG están, de la misma forma que para la recarga, asociadas a las fajas de afloramientos. Prácticamente todo el borde Oeste del SAG representa un área de descarga importante, alimentando toda la red de drenaje de la cuenca hidrográfica del río Paraguay hasta el Sur del territorio paraguayo. Sin embargo, debe considerarse la existencia de una dinámica propia para el ciclo hidrológico en las áreas de afloramiento, donde existen zonas de flujo local de las aguas subterráneas, provenientes de la recarga directa que alimentan el flujo de la red de drenaje implantada, independientemente de su situación en relación al flujo regional.

Se reconoce, a lo largo del río Paraná, una zona donde el SAG presenta surgencia. Este fenómeno ocurre en una faja de casi 300 km de largo, comprendiendo los estados de São Paulo (BR), Mato Grosso do Sul (BR) y Paraná (BR), estrechándose sensiblemente en el sur del territorio brasileño y continuando hasta la Provincia de Corrientes en territorio argentino. Otra zona de surgencia se reconoce entre la frontera de los territorios argentino y uruguayo a lo largo del Río Uruguay, en una faja del orden de 50 km de largo, con aumento en la porción sur del área de ocurrencia del SAG en territorio uruguayo.

En este amplio contexto regional se reconocen cuatro grandes dominios hidrodinámicos del SAG: Noreste (NE), Este (E), Oeste (W) y Sur (S).

El dominio NE abarca la región del acuífero localizada en los estados de São Paulo (BR) y Minas Gerais (BR), está limitado por una zona de recarga relacionada a la porción de afloramientos de las unidades constituyentes del acuífero, con flujo de las aguas subterráneas en dirección al Río Paraná. En la zona de

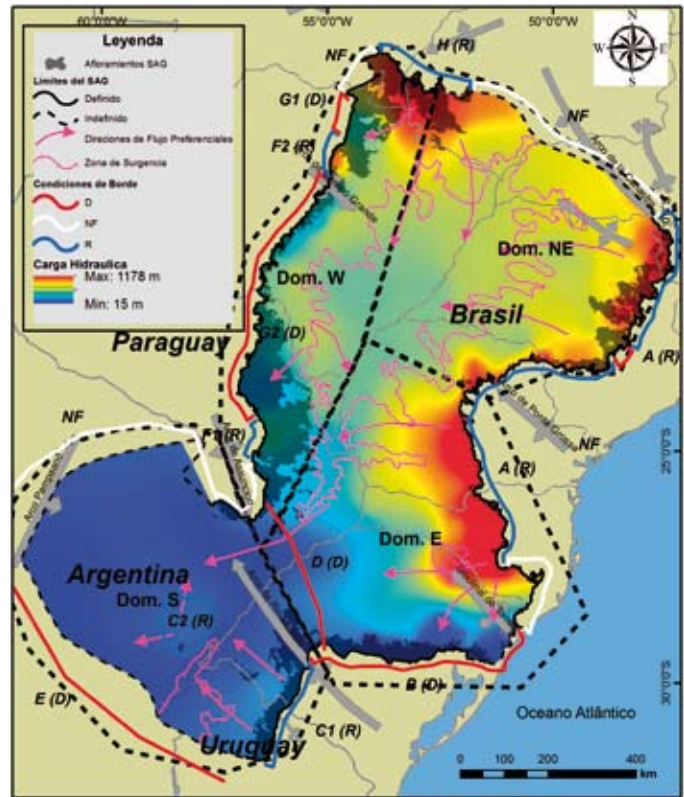


Figura 7. Mapa potenciométrico del SAG, indicando los dominios hidrogeológicos existentes, las condiciones de borde y sectores utilizados en el cálculo del balance hídrico (modificado de LEBAC, 2008a).

Figure 7. Potentiometric map of the GAS showing its hydrogeological domains, border conditions and sectors used to calculate the water balance (taken from LEBAC, 2008a, with modifications).

afloramientos, la evolución del relieve en el centro-este del estado de São Paulo ocasionó la caída del nivel de base del acuífero en la región donde el Río Tietê corta la faja de afloramientos de las formaciones constituyentes del SAG. En esta región, en función de la caída del nivel de base, el río recibe la descarga local de las aguas subterráneas del SAG, recargadas en las regiones más elevadas al sur y norte. Gradientes hidráulicos que varían entre 3 m/km y 5 m/km son observados en la región próxima a la zona de afloramientos, con una considerable reducción en la zona confinada del acuífero, donde los gradientes no superan 0,1 m/km.

El dominio E, separado del dominio NE por el Arco de Ponta Grossa, presenta una dirección preferencial E-W para el flujo de aguas subterráneas, condicionado por el levantamiento prominente de los bordes de la Cuenca del Paraná y por la dirección de los diques de diabasas asociados al arco, estando caracterizado por una gran anisotropía. Desde el sur del Domo de Lages y hasta la región de Torres las líneas potenciométricas son prácticamente paralelas a la faja de afloramientos, definiendo un región de "no flujo", donde

no existe ni recarga ni descarga de las aguas del SAG. De forma general, en este compartimento se observa que los gradientes hidráulicos son bastante homogéneos, variando entre 2 m/km y 3 m/km.

La extensa faja de afloramientos de dirección E-W, ubicada en el margen izquierdo del Río Jacuí en el estado de Rio Grande do Sul (BR), representa una zona de descarga del agua proveniente de la recarga relacionada a los terrenos más elevados, ubicados en el región del Domo de Lages.

Todo el borde Oeste del SAG, donde se localiza el dominio W, funciona como un sistema prácticamente aislado, con áreas de recarga y descarga, cuya configuración espacial condiciona la existencia de una divisoria de aguas subterráneas. Las áreas de recarga están localizadas al norte, en las regiones elevadas, ubicadas en el límite entre los estados de Goiás (BR), Mato Grosso (BR) y Mato Grosso do Sul (BR), las cuales también presentan características de flujo radial, en este caso orientado hacia la zona de afloramientos (Cuenca de los ríos Taquari y Coxim) y hacia la zona central de la Cuenca del Paraná.

Las áreas de descarga regional están asociadas a la faja de afloramientos que bordea la región del Pantanal, en el Estado de Mato Grosso do Sul (BR) y en territorio paraguayo. Los gradientes hidráulicos en este compartimento muestran valores mayores en la porción Norte (zona de recarga) y al Oeste de la divisoria de las aguas, normalmente entre 1,5 m/km y 2 m/km, mientras que en la porción este de la divisoria de aguas estos gradientes son menores, entre 0,8 m/km y 0,5 m/km, también asociados a las mayores potencias del acuífero.

El flujo convergente en dirección al eje central de la cuenca, proveniente de los tres dominios, posibilita la conexión de la porción norte del SAG al dominio Sur, localizado al sur de la Dorsal Asunción – Río Grande. En esta región, el flujo muestra dirección preferencial desde el Este hacia el Oeste, con áreas de recarga asociadas a la faja de afloramientos, de dirección aproximadamente N-S, partiendo del territorio brasileño y extendiéndose hasta la porción central del territorio uruguayo. En territorio argentino, a pesar de la escasez de datos e información de subsuelo, el Alto de Mercedes parece actuar como una importante área de recarga local en la Provincia de Corrientes, relacionado a la existencia de ventanas de areniscas, poco espesor de basaltos y fuerte fracturación. La existencia de zonas de descarga del SAG en este dominio no es muy clara; existen apenas indicios de que el flujo es dirigido hacia los límites del acuífero, considerándose que próximo al río Uruguay, en el límite Sur del SAG, la potenciometría indica condición de flujo perpendicular a este contacto.

Hidroquímica

Son reconocidas, a partir de la clasificación hidroquímica de las aguas del SAG, cuatro zonas hidroquímicas principales (Figura 8):

Zona I: es la principal zona hidroquímica del SAG, estando caracterizada por la ocurrencia de aguas principalmente bicarbonatadas cálcicas, y subordinadamente aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas y cálcico-sódicas, con poca mineralización, lo que se refleja principalmente en las bajas conductividades eléctricas observadas. Esta zona se ubica próxima a la faja de afloramientos, que bordea la zona de confinamiento del SAG. Presenta dimensiones variables, siendo más estrecha en la región Este y pudiendo alcanzar cerca de 150 km en la región Oeste, principalmente en el estado de Mato Grosso do Sul (BR).

Zona II: reúne las aguas esencialmente bicarbonatadas sódicas, con mayor grado de mineralización, reflejado en el aumento de la conductividad eléctrica en zonas donde el acuífero se encuentra confinado. En la región a lo largo del río Uruguay, entre Argentina y Uruguay, las aguas presentan el anión cloruro en su composición, caracterizando una subzona.

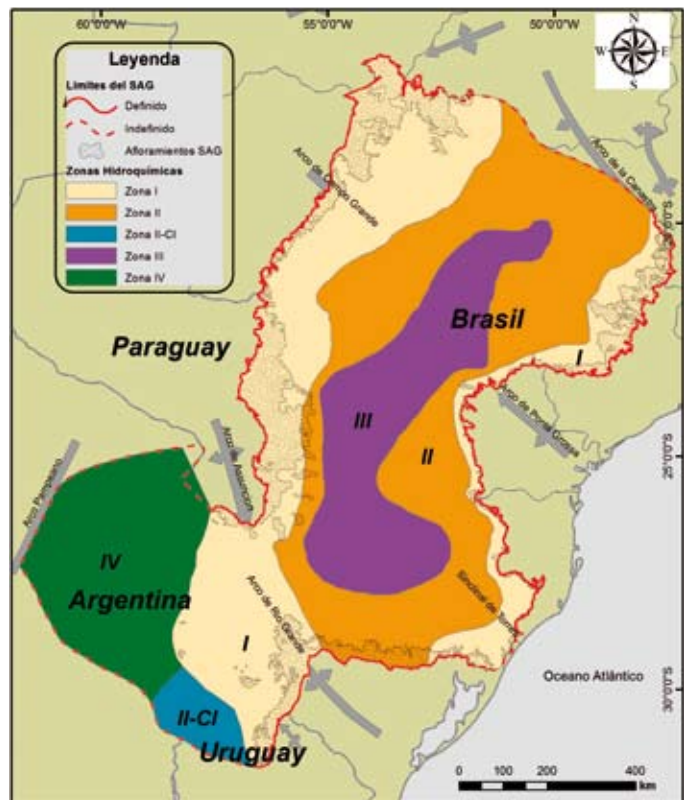


Figura 8. Mapa de facies hidroquímicas del SAG (modificado de LEBAC, 2008a).

Figure 8. Map of the hydrochemical facies of the GAS (taken from LEBAC, 2008a, with modifications).

Zona III: congrega aguas sulfatadas cloruradas sódicas, subordinadamente con presencia de bicarbonato, altamente mineralizadas y con elevada conductividad eléctrica. Esta zona es coincidente con el desarrollo de la fosa central de la Cuenca del Paraná ("Calha Central"), donde son constatados problemas relacionados a la alteración natural de la calidad de las aguas, con ocurrencias elevadas de fluoruros en los estados de São Paulo (BR) y Paraná (BR), mientras que concentraciones altas de sulfatos y fluoruros son observados a lo largo del límite entre Santa Catarina (BR) y Rio Grande do Sul (BR).

Zona IV: comprende la región argentina que abarca las provincias de Entre Ríos, Chaco, Formosa y Santiago del Estero y donde no fue posible caracterizar las aguas del SAG por medio de mediciones directas, sino apenas con base en los perfiles geoeléctricos realizados en pozos petroleros perforados en esas provincias. Son posiblemente aguas cloruradas sódicas, con alta mineralización, lo que determina la baja resistividad eléctrica observada en los perfiles geofísicos ($< 2\Omega\text{m}$), permitiendo estimar conductividades eléctricas superiores a $10.000 \mu\text{S/cm}$.

Las razones isotópicas de las aguas subterráneas del SAG presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ y de $\delta^2\text{H}$ que varían entre $-4,3\text{‰}$ hasta $-10,2\text{‰}$ y entre -31 hasta -72‰ , respectivamente. Esto permite agruparlos en torno a la recta meteórica global, presentando una variación en función de su posición en relación a las áreas de recarga. Esta situación indica que la recarga de las aguas del SAG ocurrió bajo condiciones climáticas distintas a lo largo del tiempo, de acuerdo a lo expuesto por Silva (1983) y Gastmans et al. (2010b) para los dominios NE y W del SAG (Aravena, 2008).

Las aguas más negativas en $\delta^{18}\text{O}$ están asociadas a las aguas con menor contenido de C-14 moderno, cuyos valores indican edades corregidas por el método del $\delta^{13}\text{C}$ superiores a 35.000 años (Aravena, 2008).

Modelo hidrogeológico conceptual

De acuerdo con el modelo hidrogeológico conceptual propuesto para el SAG, este sistema acuífero está compuesto por estratos arenosos mesozoicos, de origen continental, de las cuencas del Paraná y Chacoparanense, en continuidad (o aparente continuidad física), lo cual posibilita la circulación de agua en toda su extensión. Los límites hidroestratigráficos, definidos sobre la base de elementos geológicos reconocidos a escala regional, excluyen del acuífero a las formaciones Río do Rasto, Sanga do Cabral, Buena Vista así como el Grupo Independencia, las cuales fueran incluidos por otros autores, entre los que se mencio-

nan Rebouças (1976), Araújo et al. (1995) y Campos (2000).

Las condiciones de contorno impuestas al flujo de las aguas subterráneas del SAG están relacionadas directamente a la arquitectura geológica de la Cuenca del Paraná. Las áreas de recarga regional están asociadas directamente a las áreas de afloramientos localizadas en los bordes Este y Norte del SAG, levantadas tectónicamente en función de la reactivación de estructuras durante la ruptura de Gondwana (Zalán et al. 1990, Araújo et al. 1995) y el *trend* regional del flujo de aguas subterráneas está condicionado por la conformación topográfica del área (Figura 7).

El basculamiento diferenciado de los bordes del acuífero, que terminó concentrando las áreas de descarga a lo largo de la faja oeste de afloramientos, creó una divisoria de aguas subterráneas paralela a la divisoria de aguas superficiales entre las cuencas de los ríos Paraná y Paraguay, marcado en el relieve por la Sierra de Maracajú, situada en el estado de Mato Grosso do Sul (BR). Esta divisoria, de acuerdo con Gastmans (2007), sería controlada por la evolución del relieve asociada al proceso de relleno de la Cuenca del Pantanal, cuyo espacio de acumulación es fruto de la orogenia andina, y por la existencia de numerosas ventanas de afloramientos de las areniscas de la Formación Botucatu en medio del área basáltica, que funcionan como áreas de recarga locales.

Condiciones de ausencia de flujo son observadas en el límite norte del sistema acuífero en territorio brasileño, y están claramente asociadas al recubrimiento del SAG por los basaltos de la Formación Serra Geral, en tanto que en la región del Domo de Lage, en el límite entre los estados de Santa Catarina (BR) y Río Grande do Sul (BR), la alta pendiente del terreno impide la recarga del acuífero, observándose en este caso que parte de las areniscas pueden no estar saturadas en agua.

Dos grandes estructuras geológicas internas a la Cuenca del Paraná, el Arco de Ponta Grossa y la Dorsal Asunción – Río Grande, además de condicionar la geometría del acuífero, ejercen una gran influencia en el patrón de flujo. El enjambre de diques básicos, asociados al Arco de Ponta Grossa, actúa como una gran barrera hidráulica, bloqueando el flujo de las aguas subterráneas que vienen del Norte, aspecto ya manifestado por otros autores (Araújo et al. 1995, 1999).

La Dorsal Asunción – Río Grande condiciona una zona de descarga a lo largo de los ríos Paraná y Uruguay, una vez que esta estructura elevó las rocas sedimentarias del SAG hasta la superficie o muy próximo a esta. Este alzamiento puede viabilizar la recarga del SAG en esta faja, lo cual estaría contribuyendo para

que el flujo de las aguas del SAG ocurra en dirección a los territorios argentino y uruguayo.

La geometría del acuífero, asociada a su arquitectura geológica, influencia directamente la distribución de los gradientes hidráulicos: mientras que los mayores gradientes se registran en las proximidades de la zona de recarga, las áreas donde el acuífero se encuentra confinado presenta gradientes hidráulicos muy bajos. Se revela una clara asociación entre los depocentros de las unidades litoestratigráficas que componen el acuífero y los bajos gradientes hidráulicos.

El modelo conceptual de evolución hidroquímica de las aguas del SAG presupone la existencia de una serie de reacciones que explican la zonación hidroquímica observada. En las áreas de afloramiento y recarga ocurren procesos de disolución de CO_2 , tornando esas aguas saturadas en relación a la sílice, conforme lo observado por numerosos autores, entre los que se mencionan Silva (1983), Meng y Maynard (2001), Manzano y Guimarãens (2008) y Gastmans *et al.* (2010a).

Procesos relacionados con el intercambio iónico del sodio adsorbido por el calcio, y posiblemente magnesio, son responsables por las modificaciones sufridas por las aguas de la Zona I en su pasaje para la Zona II, en procesos ya observados por Silva (1983), Sraceck y Hirata (2002) y Manzano y Guimarãens (2008).

Las aguas son normalmente subsaturadas en calca, lo que indica que el proceso de disolución de los carbonatos de la matriz continúa ocurriendo, lo cual es corroborado por la disminución de las razones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$, mientras que el índice de saturación en sílice disminuye. Según Gastmans *et al.* (2010a), en la porción norte del SAG, esos procesos están íntimamente relacionados a la distribución de los cementos en las areniscas del SAG, fenómeno observado por França *et al.* (2003).

Flujos ascendentes de las aguas provenientes de los acuíferos que infrayacen al SAG serían el principal proceso responsable por el pasaje de las aguas de la Zona II para la Zona III. En esta última, los contenidos de cloruros y sulfatos aumentan rápidamente sin que exista una fase mineral en las rocas constituyentes del SAG, que pueda por medio de disolución proveer las concentraciones observadas (Bonotto, 2006; Manzano y Guimarãens, 2008; Gastmans *et al.*, 2010a).

Esos flujos ascendentes, de acuerdo con Manzano y Guimarãens (2008), serían también responsables por las concentraciones elevadas de flúor ($>1\text{mg/L}$) encontradas en las aguas del SAG, principalmente en la Zona III.

Las ocurrencias de arsénico detectadas a lo largo del corredor termal del Río Uruguay, entre la fronte-

ra argentina y uruguayo, también se relacionan a las aguas que infrayacen al SAG. Según Gastmans *et al.* (2010c), procesos de desorción del arsénico, presente en *coatings* de óxidos e hidróxidos de hierro que recubren los granos de las areniscas de la Formación Buena Vista, serían responsables por las concentraciones observadas.

Balance hídrico y reservas del SAG

El cálculo del balance hídrico en un acuífero de escala continental, tal como el SAG, representa un gran desafío en función de las incertidumbres relacionadas a la distribución espacial de los principales parámetros hidráulicos, así como a la falta de antecedentes, especialmente estudios locales de balances hídricos en las cuencas hidrográficas situadas en áreas de afloramientos. Por ese motivo, los resultados aquí presentados sobre el balance hídrico del SAG, deben asumirse con reparo.

Sobre la base de los resultados de los estudios hidrometeorológicos e hidrográficos levantados durante el PSAG es realizada una primera aproximación al balance hídrico del SAG. Los datos hidrológicos de las principales cuencas hidrográficas en el área de ocurrencia del SAG, indican que el escurrimiento superficial varía entre 350-400 mm/año en las cuencas situadas en la porción Norte del SAG, hasta 650-750 mm/año en las cuencas hidrográficas localizadas en la porción Sur del SAG, con valores de flujo de base que oscilan entre 120-180 mm/año, mientras que los excedentes hídricos anuales medios provenientes de la precipitación son del orden de 300 mm/año para la porción norte del acuífero, alcanzando los 600 mm/año en la porción sur (Nuñez *et al.*, 2008).

Con base en los datos de ese balance simplificado, es posible inferir que los volúmenes de agua responsables por la recarga profunda del SAG, no sobrepasarían 10-20 mm/año, lo que significaría en términos del volumen de agua, que la recarga anual del SAG a través de sus áreas de afloramiento serían del orden de 0,8 a 1,4 $\text{km}^3/\text{año}$, valores similares a los estimados por Gilboa *et al.* (1976) (LEBAC, 2008a).

El balance hídrico para los cuatro compartimentos de flujo del SAG fue estimado, en forma simplificada, teniendo en cuenta las condiciones de entorno definidas por el modelo hidrogeológico conceptual de funcionamiento del SAG, presentadas en la Figura 7, valores de conductividad hidráulica entre 1 y 3 m/día y gradientes hidráulicos medios para los tramos indicados. Una síntesis de esos valores son presentados en la tabla 1, mostrando que las entradas de agua en el sistema varían de 0,2 a 1,6 $\text{km}^3/\text{año}$, siendo

| Dominio | Zona (Fig. 7) | Cond. Borde | Largo aprox. perpend. flujo (km) | Espesor saturado (m) | | K (m/día) | | Gradiente hidráulico | | Caudal medio (km ³ /año) | | Pozos | Extrac. bombeo (km ³ /año) | Balance hídrico del dominio (km ³ /año) | |
|---------|---------------|-------------|----------------------------------|----------------------|------|-----------|------|----------------------|-------|-------------------------------------|-------|-------|---------------------------------------|--|-------|
| | | | | Mín. | Máx. | Mín. | Máx. | Mín. | Máx. | Mín. | Máx. | | | Mín | Máx. |
| | | | | NE | A | Rec. | 570 | 100 | 150 | 1.0 | 3.0 | | | 0.003 | 0.006 |
| | H | Rec. | 200 | 150 | 200 | 1.0 | 3.0 | 0.002 | 0.003 | 0.02 | 0.13 | | | | |
| | A | Rec. | 570 | 100 | 150 | 1.0 | 3.0 | 0.003 | 0.006 | 0.06 | 0.56 | | | | |
| E | B | Desc. | 400 | 50 | 100 | 1.0 | 3.0 | 0.005 | 0.005 | -0.04 | -0.22 | 267 | -0.06 | -0.05 | 0.13 |
| | D | Desc. | 450 | 100 | 150 | 1.0 | 3.0 | 0.001 | 0.002 | -0.02 | -0.15 | | | | |
| | H | Rec. | 200 | 150 | 200 | 1.0 | 3.0 | 0.002 | 0.003 | 0.02 | 0.13 | | | | |
| W | F (1+2) | Rec. | 120 | 200 | 300 | 1.0 | 3.0 | 0.002 | 0.005 | 0.02 | 0.20 | 346 | -0.07 | -0.21 | -0.27 |
| | G (1+2) | Desc. | 800 | 200 | 300 | 1.0 | 3.0 | 0.003 | 0.002 | -0.18 | -0.53 | | | | |
| S | C (1+2) | Rec. | 500 | 150 | 250 | 1.0 | 3.0 | 0.001 | 0.001 | 0.01 | 0.14 | 276 | -0.08 | -0.07 | 0.06 |

N.B. Water leaving the system is indicated with a negative sign.

Tabla 1. Balance hídrico del SAG.

Table 1. Water balance in the GAS.

estos valores muy próximos a los valores calculados con base en el balance hídrico, mientras que las descargas varían de 0,18 a 0,8 km³/año. Esta diferencia de valores indica la posibilidad de la existencia de un flujo ascendente del SAG hacia los basaltos de la Formación Serra Geral, lo cual fue constatado por medio de la modelación numérica realizada en el proyecto (Vives *et al.*, 2008).

A partir de la selección de 2054 pozos con datos e informaciones que posibilitaron el cálculo de los caudales explotados, Vives *et al.* (2008) estimaron que los volúmenes de agua extraídos del SAG totalizan 1,04 km³/año. La distribución de los volúmenes extraídos en cada uno de los compartimientos del SAG es presentada en la tabla 1.

Si se considera el bombeo en el cálculo del balance hídrico, se observa que existe un déficit en todos los compartimientos, o sea que, se extrae más del SAG que su capacidad de recarga y flujo. A pesar de las incertidumbres relacionadas a estos cálculos, este aspecto debe ser valorado y tenido en cuenta cuando se elaboren propuestas sobre la gestión del agua subterránea.

La reserva estática del SAG fue calculada considerando dos condiciones para el acuífero: acuífero confinado y acuífero libre. Para el agua comprimida en la zona confinada del SAG, fue considerado un coeficiente de almacenamiento de 10⁻⁴, y para las condiciones de acuífero libre, fue considerada una porosidad efectiva media de 15% ± 2%. Adicionalmente, en función de las heterogeneidades existentes, sean por cambios de facies, diagenéticas o estructurales, fue

considerado que cerca del 10% del volumen total de las rocas del acuífero están constituidas por sedimentos impermeables.

De esta manera, los volúmenes de agua totales almacenados en el SAG fueron estimados entre 29.550 km³ ± 4.000km³ y 32.830 km³ ± 4.400 km. A pesar de ese enorme volumen de agua almacenado en el acuífero, no toda esa agua está disponible. Si se consideran descensos máximos de 400 m, los volúmenes disponibles alcanzan cerca de 2.000 km³ de agua, de los cuales apenas el 1% estarían disponibles en la zona confinada del SAG.

Conclusiones

La reevaluación de los datos e informaciones geológicas e hidrogeológicas de las cuencas del Paraná y Chacoparanense, relacionados al Sistema Acuífero Guaraní y promovida durante el PSAG, posibilitó la redefinición de los límites del SAG, así como la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual para la unidad.

En términos geológicos, el SAG puede ser definido como un sistema acuífero constituido por un conjunto de rocas sedimentarias mesozoicas continentales, esencialmente siliciclásticas, en continuidad física (o aparente continuidad), con alta capacidad de almacenar y transmitir agua, limitado en su base por una extensa discordancia regional permo-eotriásica, y en el techo por el inicio de los derrames basálticos del Cretácico Inferior.

Esta definición excluye una serie de unidades anteriormente asociadas al acuífero, también siliciclásticas, posicionadas por debajo de la discordancia permio-eotriásica, siendo esta desde el punto de vista de la gestión una definición importante.

Las condiciones de flujo de las aguas subterráneas en el SAG, cuyo sentido preferencial es N-S, con recargas asociadas principalmente a las áreas de afloramiento localizadas en la faja este del acuífero, y descargas regionales en la faja oeste de los afloramientos, son claramente condicionadas por las estructuras geológicas asociadas a la evolución tectónica de la cuenca del Paraná y Chacoparanense. Mientras que el levantamiento de los bordes este y norte de la cuenca, ocurrido durante la ruptura de Gondwana, condiciona las principales áreas de recarga, las estructuras regionales internas, como el Arco de Ponta Grossa y la Dorsal Asunción-Río Grande, condicionan el flujo. El Arco de Ponta Grossa actúa como una barrera al flujo proveniente del norte y la Dorsal Asunción-Río Grande divide el SAG en dos compartimentos distintos, pudiendo adicionalmente funcionar como un alto que condiciona una amplia área de descarga regional.

El balance hídrico indica que la recarga del SAG no debe ser superior a 1,5 km³ de agua al año, valor este que está próximo a la tasa de explotación a la cual el acuífero está siendo sometido actualmente. Este aspecto debe ser tenido en cuenta en la elaboración de políticas de gestión del recurso, aún cuando pesen algunas incertidumbres relacionadas al método de cálculo del balance hídrico presentado.

La evolución hidroquímica de las aguas subterráneas del SAG también muestran relación con el marco geológico, sea a través de las reacciones que surgen de la interacción roca/agua, que imprimen las principales características hidroquímicas a esta agua, o por el condicionamiento del flujo, responsable por la mezcla de las aguas provenientes de los acuíferos infrayacentes al SAG, el cual es controlado por los principales rasgos estructurales de la cuenca.

A pesar de la clara influencia de la arquitectura geológica en las condiciones de flujo de las aguas subterráneas y su evolución hidroquímica, el modelo hidrogeológico propuesto tiene validez solo a escala regional. Particularidades locales, algunas relacionadas al flujo entre las unidades que supra e infrayacen al SAG, bien como aspectos relacionados al marco estructural, deben ser evaluados en modelos conceptuales locales, los cuales deben ser elaborados en escalas adecuadas.

Medidas conjuntas de gestión transfronteriza para los recursos hídricos del SAG son especialmente necesarias en la frontera entre Brasil y Paraguay, donde las líneas de flujo regionales indican la existencia de

transposición de las aguas subterráneas, con la particularidad de que esas aguas presentan edades relativamente recientes. Otros flujos transfronterizos son reconocidos a lo largo del eje central de la Cuenca del Paraná, entre Brasil y Argentina, y al Sur de la Dorsal Asunción-Río Grande hacia Uruguay. Sin embargo, se debe considerar que esas aguas presentan edades próximas a los límites de detección del método C-14, y el modelo de gestión transfronterizo para esa región debe considerar principalmente los volúmenes pasibles de extracción.

Acciones de gestión específicas para los diferentes países deben ser adoptadas para la explotación de las aguas subterráneas y la protección de las áreas de afloramiento, donde las aguas subterráneas alimentan principalmente el flujo de la base de la red de drenaje implantada en esas áreas. En las áreas de confinamiento, en función de las edades reconocidas para las aguas subterráneas, programas de gestión basados en el monitoreo, que tengan en cuenta los volúmenes pasibles de extracción, deben ser implantados con urgencia, intentando inhibir la minería sin control del recurso.

Aspectos referentes a las alteraciones naturales de calidad, observadas principalmente en relación a la presencia de flúor y arsénico, que poseen relación directa con las unidades acuíferas que infrayacen al SAG, deben ser consideradas en la elaboración de proyectos de construcción de nuevos pozos en las regiones donde el fenómeno ocurre.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Geóloga Ethel Morales por la lectura del manuscrito inicial, sugerencias y correcciones gramaticales hechas, bien como las sugerencias y aportes realizados por los dos árbitros anónimos que contribuyeron significativamente en una mejor comprensión del texto.

Referencias

- Almeida, F.F.M. 1972. Tectono-magmatic Activation of the South American Platform and Associated Mineralization. *IUGS, Int. Geol. Congress. Section 3 – Tectonics, Actas...* Montreal, pp. 339-346.
- Araújo, L.M., França, A.B., Potter, P.E. 1995. *Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; Mapas Hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacaurémbo*. Mapas. UFPR-Petrobras, Curitiba, Texto Explicativo, 16 pp.
- Araújo, L.M., França, A.B., Potter, P.E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-

- Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology Journal*, 7 (3), 317-336.
- Aravena, R. 2008. Informe Final de Isótopia del Sistema Acuifero Guarani Informe Técnico – Consórcio Guarani. Montevideo.
- Bonotto, D.M. 2006. Hydro(radio)chemical relationships in the giant Guarani aquifer, Brazil. *Journal of Hydrology*, 323 (1-4), 353-386.
- Caetano-Chang, M.R. 1997. *A Formação Pirambóia no centro-leste do estado de São Paulo*. Tese, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 196 p.
- Caetano-Chang, M.R., Wu, F.T. 2006. Arenitos flúvio-eólicos da porção superior da Formação Pirambóia, na porção centro-leste paulista. *Revista Brasileira de Geologia*, 36, 296-304.
- Campos, H.C.N.S. 2000. Modelación Conceptual y Matemática del Acuífero Guarani, Cono Sur. *Acta Geológica Leopoldinense*, 23 (4), 3-50.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo 1974. Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 6 – Ribeirão Preto. São Paulo: DAEE, Volume 2. (Texto).
- De Santa Ana, H., Veroslavsky, G., Fúlfaro, V.J., Fernández Garrasino, C.A. 2006. *Informe de Geología N° 2*, Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuifero Guarani. Informe Técnico, Montevideo, pp. 198.
- Faccini, U.F. 1989. *O Permo-Triássico do Rio Grande do Sul: uma análise do ponto de vista das seqüências deposicionais*. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), 2v, 133 pp.
- Faccini, U.F., Giardin, A., Machado, J.L.F. 2003. Heterogeneidades Litofaciológicas e Hidroestratigrafia do Sistema Acuifero Guarani na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. In: Paim, P.S.G. (Ed.), *Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares – Estudos de Casos Programa de Pós Graduação em Geologia - UNISINOS*, São Leopoldo, pp. 147-173.
- Fariña, S., Vassolo, S., Cabral, N., Vera, S., Jara, S. 2004. Caracterización hidrogeológica e hidroquímica del Sistema Acuifero Guarani (SAG) en la región oriental del Paraguay al sur de la latitud 25°30'. *13° Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. CD-ROOM. ABAS, Anais... Cuiabá.
- Folch, A., Menció, A., Puig, R., Soler, A., Mas-Pla, J. 2011. Groundwater development effects on different scale hydrogeological systems using head, hydrochemical and isotopic data and implications for water resources management: The Selva basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 403 (1-2), 83-102.
- França, A.B., Araújo, L.M., Maynard, J.B., Potter, P.E. 2003. Secondary porosity formed by deep meteoric leaching: Botucatu eolinite, Southern South America. *American Association Petroleum Geology Bulletin* 87, 1073-1082.
- Fulfaro, V.J., Saad, A.R., Santos, M.V., Vianna, R.B. 1982. Compartimentação e Evolução Tectônica da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 12, 590-611.
- Gallo, G., Sinelli, O. 1980. Estudo Hidroquímico e Isotópico das Águas Subterrâneas na Região de Ribeirão Preto (SP). *Revista Brasileira de Geociências*, 10, 129-140.
- Gastmans, D. 2007. *Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Acuifero Guarani na Porção Ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná*. Tese, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro(SP), 194 p.
- Gastmans, D., Chang, H.K., Hutcheon, I. 2010a. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. *Applied Geochemistry*, 25 (1), 16-33.
- Gastmans, D., Chang, H.K., Hutcheon, I. 2010b. Stable isotopes (H-2, O-18 and C-13) in groundwaters from the northwestern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil). *Hydrogeology Journal*, 18 (6), 1497-1513.
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Chang, H.K., Marmisole, J., Oleaga, A. 2010c. Influência do Arcabouço Hidroestratigráfico nas Ocorrências de Arsênio em Águas Subterrâneas ao Longo do Corredor Termal do Rio Uruguai (Argentina-Brasil-Uruguai). *Geociências*, v. 29, 105-120.
- Gilboa, Y., Mero, F., Mariano, I.B. 1976. The Botucatu aquifer of South America, model of an untapped continental aquifer. *Journal of Hydrology*, 29 (1-2), 165-179.
- Gohrbandt, K.A.A. 1993. Paleozoic Paleogeographic and Depositional Developments on the Central Proto-Pacific Margins of Gondwana: Their Importance to Hydrocarbon Accumulation. *Journal of South American Earth Science*, 6 (4), 267-287.
- Hindi, E.C. 2007. *Hidroquímica e Hidrotermalismo do Sistema Acuifero Guarani no Estado do Paraná*. Tese, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba (PR), 154 p.
- Hirata, R., Geisicki, A., Sracek, O., Bertolo, R., Giannini, P.C., Aravena, R. 2011. Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the Guarani Aquifer System in São Paulo state, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 31 (4), 444-456.
- Kimmelmann, S.A.A., Rebouças, A.d.C., Santiago, M.M.F. 1989. ¹⁴C Analyses of Groundwater from Botucatu Aquifer System in Brazil. *Radiocarbon*, 31 (3), 8.
- Larroza, F.A., Fariña, S., Baez, J., Cabral, N. 2005. Evaluación Hidrogeológica y Protección a la Contaminación del Agua Subterránea em la Reserva de la Biosfera del Bosque Mbaracayu (RBBMb) Limite Paraguay-Brasil. In: ABAS (Ed.), *2° Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste*. ABAS, Ribeirão Preto.
- LEBAC. 2008a. *Mapa Hidrogeológico do Sistema Acuifero Guarani*. Coord.: Sinelli, O. Equipe: Chang, H.K.; Gastmans, D.; Paula e Silva, F.; Correa, S.F.; Pressinotti, M.M.N. Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 54 p. e 8 mapas. 2008.
- LEBAC. 2008b. *Informe Final de Hidrogeologia do Projeto Acuifero Guarani*. Coord.: Gastmans, D. y Chang, H.K. Equipe: Paula e Silva, F., Correa, S.F., Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 172 p.
- Maack, R. 1970. *Notícias Preliminares sobre as Águas do Subsolo da Bacia Paraná-Uruguai*, Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai, Curitiba.
- Machado, J.L.F. 2005. *Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Acuifero Guarani no Rio Grande do Sul*. Tese, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo (RS), 238 p.
- Manzano, M., Guimaraens, M. 2008 *Estudio del Origen de la Composición Química de las Aguas Subterráneas del*

- Sistema Acuífero Guaraní (SAG) Informe Técnico – Consórcio Guaraní*. Montevideo, 120 p.
- Meng, S.X., Mayard, J.B. 2001. Use of Statistical Analysis to Formulate Conceptual Models of Geochemical Behaviour: Water Chemical Data From the Botucatu Aquifer in São Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology*, 250, 78-87.
- Milani, E.J. 1997. *Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental*. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 255 p.
- Milani, E.J., França, A.B., Schneider, R.L. 1994. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro*, 8 (1), 69-82.
- Milani, E.J., Faccini, U., Scherer, C.M., Araujo, L.M., Cupertino, J.A. 1998. Sequences and Stratigraphic Hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. *Boletim I.G. USP – Série Científica*, 29, 125-173.
- Montaño, J., Tujchneider, O., Auge, M., Fili, M., Paris, M., D'Elia, M., Pérez, M., Nagy, M.I., Collazo, P., Decoud, P. 1998. *Acuíferos Regionales em America Latina, Sistema Acuífero Guaraní, Capítulo Argentino-Uruguayo*. Santa Fé - Argentina, 217 p.
- Núñez, M.N., Fernández, A.E., González, M.H. 2008. *Estudio Sistema Acuífero Guaraní – Tecer y Último Infore – Climatología y Hidrometeorología*. Informe Técnico. HIDROESTRUCTURAS – Argentina. 23 p.
- OEA, 2009. *Aquífero Guaraní: Programa Estratégico de Ações/ Acuífero Guaraní: Programa Estatégico de Acción - Edição Bilingue*. Organização dos Estados Americanos - OEA, Brasil, Argentina, Paraguai, Uruguai, 424 p.
- Oleaga, A.B. 2002. *Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector Uruguay. Un enfoque integral*. Dissertação, Universidade Nacional Autónoma de México, Cidade do México, 119 p.
- Perea, D., Ubilla, M., Rojas, A., Goso, C.A. 2001. The west Gondwana occurrence of the hybodontid shark *Priohybodus*, and the Late Jurassic–Early Cretaceous age of Tacuarembó Formation, Uruguay. *Palaeontology*, 44 (6), 1227-1235.
- Puri, S. et al. 2001. *Internationally Shared (Transboundary) Aquifer Resources Management: Their Significance and Sustainable Management - A Framework Document*. UNESCO, Paris, France, 66 pp.
- PyT Consultora srl. 2007. *Informe Final de Releviamentos Geológicos*, Relatório Técnico, Buenos Aires, 93 p.
- Ramos, V.A., Milani, E.J. 1998. Proterozoic-Early Paleozoic of South America: a Collisional Hystory. *Episodes*, 11 (3), 168-174.
- Rebouças, A.C. 1976. *Recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná – Análise de Pré-Viabilidade*. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, 143 p.
- Rosa Filho, E.F.d., Salamuni, R., Bittencourt, A.V.L. 1987. Contribuição ao Estudo das Águas Subterrâneas nos Basaltos do Estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, 37, 22-52.
- Rosa Filho, E.F.d., Hindi, E.C., Rostirolla, S.P., Ferreira, F.J.F., Bittencourt, A.V.L. 2003. Sistema Aquífero Guaraní – Considerações Preliminares Sobre a Influência do Arco de Ponta Grossa no Fluxo das Águas Subterrâneas. *Revista Águas Subterrâneas*, 17, 91-111.
- Rossello, E., Bordarampe, C. 2005. Las Lomadas de Otumpa: nuevas evidencias cartográficas de deformación neotectónica en el Gran Chaco (Santiago del Estero, Argentina). In: *16º Congreso Geológico Argentino*, La Plata. Actas... La Plata, 2005, CD-ROM.
- Silva Busso, A.A. 1999. *Contribución al Conocimiento de la Geología e Hidrogeología del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental, Argentina*. Tesis, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales., Bueno Aires, 2 v. 351 p.
- Silva, R.B.G.d. 1983. Estudo Hidroquímico e isotópico do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, 133 p.
- Sracek, O., Hirata, R. 2002. Geochemical and Stable Isotopic Evolution of the Guaraní Aquifer System in the State of São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 10, 643-655.
- Vives, L., Rodríguez, L., Gómez, A. 2008. *Modelacion Numérica Regional del Sistema Acuífero Guaraní*. Informe Técnico – Consórcio Guaraní. Montevideo, 144 p.
- Yanbin, S., Gallego, O.F., Martinez, S. 2004. The conchostracan subgenus *Ortheastheria* (Migransia) from the Tacuarembó Formation (Late Jurassic-?Early Cretaceous, Uruguay) with notes on its geological age. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 615-622.
- Winkler, G., Reichl, P., Strobl, E. 2003. Hydrogeological Conceptual Model - Fracture Network Analyses to Determine Hydrogeological Homogeneous Units in Hard Rocks. *RMZ-Materials and Geoenvironment*, 50 (1), 417-420.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Marques, A., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T., Zanotto, O.A. 1990. Bacia do Paraná. In: Raja Gabaglia, G.P., Milani, E.J. (Eds.), *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Petrobras, Rio de Janeiro, pp. 135-168.
- Zerfass, H., Chemale, F., Schultz, C., Lavina, E. 2004. Tectonics and sedimentation in Southern South America during Triassic. *Sedimentary Geology*, 265-292.

Recibido: diciembre 2011

Revisado: febrero 2012

Aceptado: marzo 2012

Publicado: julio 2012

