

CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL ACUÍFERO TRANSFRONTERIZO GUARANÍ

Jorge Montaña^{1,a}; Paula Collazo^{1,b}; Elena Peel^{1,c} & Ernani Da Rosa²

Resumen - El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) representa una de las reservas de agua dulce más importantes del mundo. Es un acuífero transfronterizo con una superficie de 1.200.000 km² que comparten cuatro países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Aproximadamente el 60 a 65% del SAG está cubierto por grandes espesores de basaltos que determinan una considerable protección, minimizando el grado de vulnerabilidad. Se intenta en esta comunicación caracterizar el comportamiento hidrogeológico del SAG en dos áreas representativas del mismo. Una de ellas comprende la zona fronteriza entre Uruguay y Argentina, representando el área confinada y termal. La otra, ubicada en la región limítrofe entre Uruguay y Brasil, corresponde a la zona de afloramiento del SAG. El agua en el área confinada es utilizada para cubrir la demanda de centros termales y podría ser utilizada con fines industriales. La zona aflorante tiene importancia como fuente hídrica de alta calidad para el abastecimiento público de medianas y grandes ciudades. En las últimas décadas la utilización del agua subterránea en ambas regiones ha crecido en forma exponencial, principalmente en el área de afloramiento. Esta situación genera la necesidad de implementar políticas internacionales de gestión que aseguren la protección y el buen uso de este recurso.

Abstract - The Guaraní Aquifer System (GAS) represents one of the most important reserve of freshwater worldwide. It is a trans-national aquifer that involves four countries (Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay) having an area of 1.200.000 Km². Approximately, 60% to 65% of the GAS is covered by a thick basalt layer which acts as an important protection, minimizing its vulnerability. The aim of this paper is to characterize the hydrogeologic behavior of the GAS in two representative areas. One of them comprises the confined and thermal area in the border between Uruguay and Argentina. The other one corresponds to the outcropping area of the GAS and it is located in the border between Uruguay and Brazil. The water in the confined area is mostly used to provide the thermal resorts but it also could be used in the industry. The outcropping zone has great

¹ Departamento de Evolución de Cuencas – Facultad de Ciencias, UdelaR (Uruguay)

^amontanox@movinet.com.uy; ^bmpaula@fcien.edu.uy; ^celena@fcien.edu.uy

² Laboratorio de Hidrogeología Subterránea - Universidad Federal de Paraná (Brasil) - ernani@geologia.ufpr.br

importance in the public water supply, for medium to big cities, as a high-quality hydric resource. During the last decades, the groundwater use in both areas has increased in an exponential way, basically in the outcropping area. This situation creates the necessity to develop international management policies that assure the protection and well use of this resource.

INTRODUCCIÓN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) representa una de las más importantes reservas subterráneas de agua dulce en el mundo. Es un recurso compartido entre los países del MERCOSUR (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay) (figura 1) y posee un potencial hídrico del orden de 40.000 km^3 . Está constituido por una potente sucesión de estratos porosos y permeables más o menos interconectados, que en su gran mayoría se depositaron durante el Mesozoico (Triásico – Jurásico) y parte superior del Paleozoico (Pérmico).



Figura 1 - Mapa de Ubicación del Sistema Acuífero Guaraní

Con espesores que alcanzan los 800 metros, se distribuye en un área aproximada de $1.182.500 \text{ km}^2$ de la siguiente forma: en Paraguay ocupa un área de 71.700 km^2 ; en Argentina 225.500 km^2 ; y en el norte de Uruguay 43.000 km^2 . El resto corresponde a Brasil, donde se distribuye por los estados de la siguiente manera:; 157.600 km^2 en Rio Grande do Sul; 49.200 km^2 en Santa Catarina; 131.300 km^2 en Paraná; 155.800 km^2 en Sao Paulo; 213.200 km^2 en Mato Grosso do Sul; 55.000 km^2 en Goiás; 52.300 km^2 en Minas Gerais; y 26.400 km^2 en Mato Grosso.

El objetivo de este trabajo es el de caracterizar el comportamiento hidrogeológico del SAG. En función de la extensa superficie que ocupa este sistema, nos centraremos en dos áreas; la primera de ellas se sitúa en la zona fronteriza entre Uruguay y Argentina y la segunda en la región

limítrofe entre Uruguay y Brasil. En estas zonas se encuentran representadas respectivamente el área confinada y el área libre o de afloramiento del SAG (figura 2). Esta caracterización se realiza en función de los estudios geológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos y termales realizados en la región.

SAG EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En primera instancia, se divide el acuífero en función de sus características geológicas e hidrogeológicas en dos grandes ámbitos: zona confinada y aflorante (figura 2).

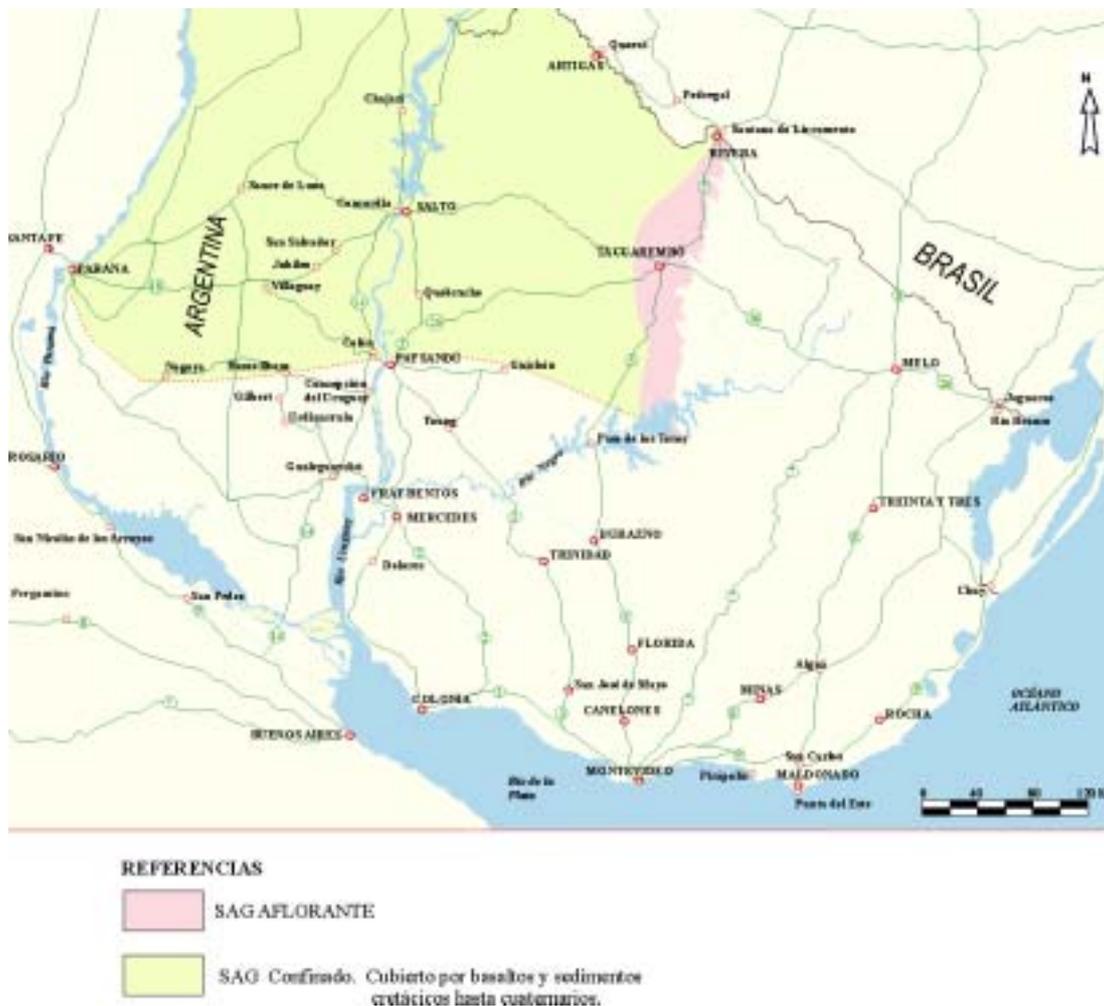


Figura 2 - Mapa que expresa en diferentes tramas la Zona aflorante y Zona confinada del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay

En casi toda su extensión el SAG se encuentra cubierto por potentes coladas basálticas que superan en algunos lugares los 1.000 metros de potencia. Este grado de soterramiento genera que en algunas regiones como el área que comprende las ciudades de Concordia (Argentina) y Salto (Uruguay) el SAG presente condiciones de termalismo y surgencia.

El acuífero se encuentra aflorando en el área centro norte de Uruguay, existiendo un polo de explotación en el área limítrofe con Brasil, en la región que comprende las ciudades de Rivera (Uruguay) y Santa Ana do Livramento (Brasil). Además en la ciudad de Artigas (Uruguay), limítrofe con Brasil, existe un área de afloramiento muy particular, que constituye una “ventana” rodeada por el acuífero confinado por el basalto.

Desde el punto de vista de su constitución geológica, pueden distinguirse dos grandes paquetes sedimentarios que conforman dos subsistemas hidrogeológicos distintos:

- Denominaremos SAG Típico al constituido por sedimentos y rocas sedimentarias asimilables a la Formación Tacuarembó (Jurásico) (Bossi *et al*, 1975 en Veroslavsky *et al* 2003) y a las formaciones Buena Vista (Ferrando & Andreis, 1986 en Veroslavsky *et al* 2003) y Yaguarí (Bossi, 1966) ambas de edad Pérmico superior. De forma general se puede caracterizar a las sedimentitas que constituyen el SAG típico por una sucesión de areniscas de origen continental (formación Tacuarembó), depositadas por sistemas fluviales y lacustres a las que se asocian varios episodios eólicos que se intercalan a lo largo de toda la sección; y sedimentos y rocas sedimentarias depositadas en ambiente transicional-continental (Yaguarí – Buena Vista). El espesor puede variar desde los pocos metros hasta más de 200 metros totalmente saturados de agua. Está representado entonces en la región aflorante de Uruguay por la Formación Tacuarembó (Bossi *et al*, 1975 en Veroslavsky *et al* 2003) y las formaciones Buena Vista (Pérmico Superior).
- El otro paquete sedimentario, sobre el cual el SAG típico se apoya, será denominado SAG Pérmico, y está conformado por sedimentitas de edad Pérmico Inferior y Medio, de media a baja permeabilidad. Está constituido por sedimentos y rocas sedimentarias correspondientes a las formaciones San Gregorio (Pérmico Inferior), Tres Islas (Pérmico Medio) que han sido depositadas en ambientes marinos poco profundos y que, por su contenido variable en sales, condiciona la calidad del agua.

De manera general, se puede establecer que el SAG típico se apoya sobre sedimentitas pérmicas de media a baja permeabilidad (SAG Pérmico) (figura 3) que han sido depositadas en ambientes marinos poco profundos y que, por su contenido variable en sales, condiciona la calidad del agua y define el segundo sistema hidrogeológico del área.

SAG CONFINADO

Las lavas confinantes corresponden a la Formación Arapey (Cretácico), compuesta por sucesivas coladas de basalto, en cantidad y espesor variables dentro del área mencionada, dependiendo de los pulsos efusivos, y de la distancia a los centros de emisión; se han llegado a

identificar 26 coladas en la ciudad de Salto. La perforación de OSE (Salto) mostró un espesor de basaltos de 1021 metros.

En la región de Salto y Concordia el SAG típico presenta su mayor desarrollo (figura 3) y se comporta hidrogeológicamente, por lo general, en forma independiente de las unidades hidrogeológicas de edad Pérmico. No se ha comprobado en esta área ninguna conexión entre ambos sistemas, aunque la región presenta una gran densidad de lineamientos y fallas que podrían ser la vía de conexión entre los dos sistemas acuíferos.

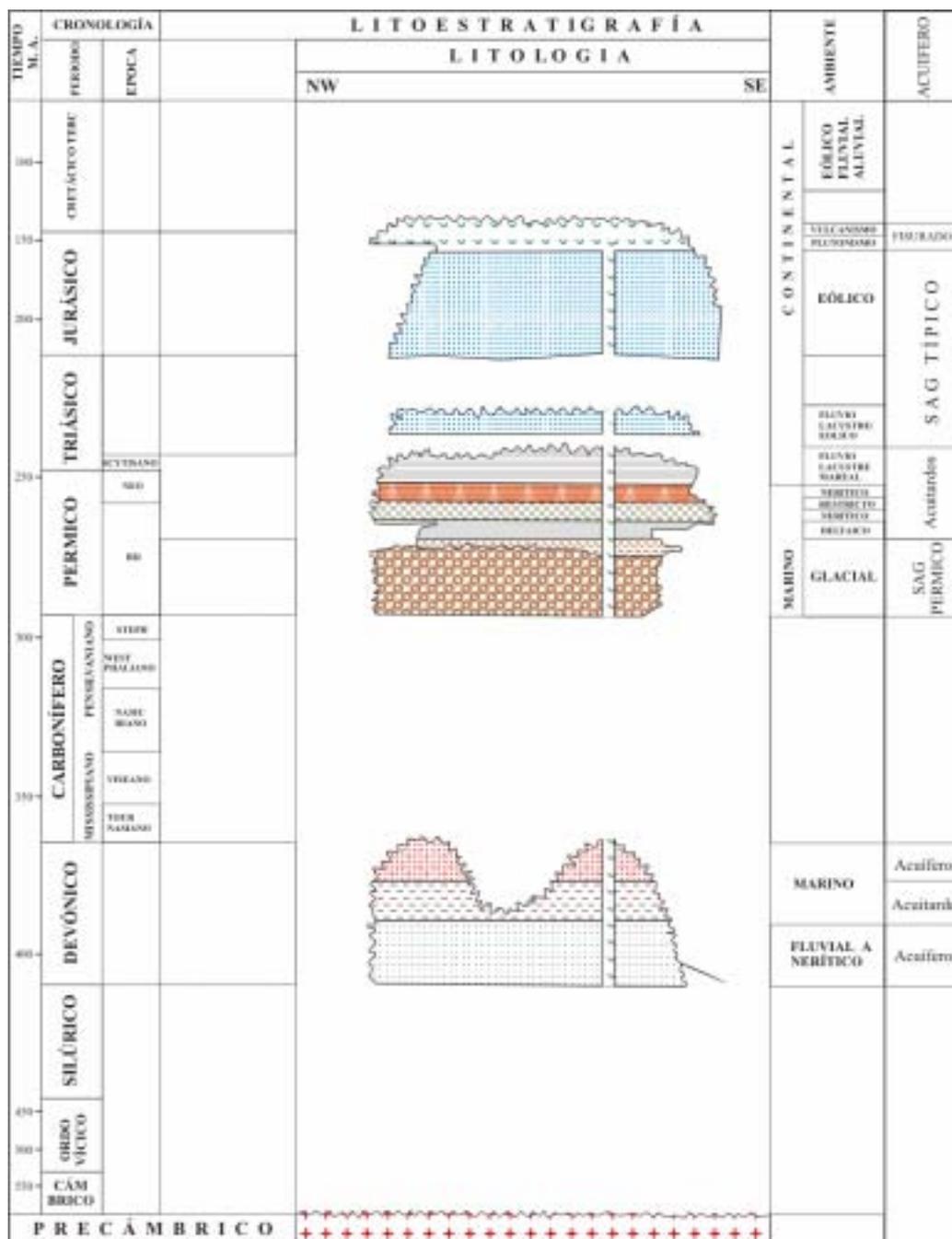


Figura 3 - Columna Estratigráfica (Montaño et al 2002)

Perforaciones

Los pozos termales en el área Concordia - Salto presentan caudales de surgencia que oscilan entre los 20 a 300 m³/h. Se destaca que la mayoría de los pozos son utilizados para abastecimiento de centros turísticos termales. En la figura 4 se muestra el perfil esquemático de la perforación Horacio Quiroga (Salto, Uruguay). Como surge de la observación y comparación del perfil, el espesor del techo basáltico del acuífero en el área es de aproximadamente 1000m. En la tabla 1 se detallan las perforaciones infrabasálticas existentes en el área piloto Salto – Concordia, y sus principales características.

Tabla 1 - Lista de pozos profundos existentes en el Área Piloto Concordia Salto

| País | Localidad | Coordenadas | | Z (m) | P (m) | (°C) | (m ³ /h) |
|--------------------------|--|-------------------------|--------------------------|-------|-------|------|---------------------|
| | | X | Y | | | | |
| Uruguay | Daymán ** | 299598 | 6518527 | 19 | 400 | 46 | 134 |
| Uruguay | Salto Grande (Hotel Quiroga)* | 298550 | 6538630 | 63 | 295 | 45 | 230 |
| Uruguay | OSE * | 294349 | 6527489 | 46 | 370 | 38 | 90 |
| Uruguay | Club Remeros* | 293100 | 6526850 | 12 | 1326 | 46,5 | 135 |
| Uruguay | Posada del Siglo XXI* | | | | | | 20 ⁽²⁾ |
| Uruguay | Kanarek * | 299850 | 6518700 | 20 | 1200 | 46 | 150 |
| Argentina ⁽¹⁾ | Concordia I – Termas Villa Zorraquín | -58°00'37" (latitud) | -31°39'20" (longitud) | 34 | 1142 | 44 | 150 |
| Argentina ⁽¹⁾ | Concordia II (Termas Las Vertientes) | -58°00'20" (latitud) | -31°17'40" (longitud) | 35 | 1178 | 44 | 300 |
| Argentina ⁽¹⁾ | Concordia III – Hotel Ayuí (los datos corresponden al anteproyecto, esta perforación no comenzó a construirse aún) | -57°57'05" (latitud) | -31°15'02" (longitud) | 42 | 1100 | 45 | 100 |
| Uruguay | San Nicanor | 309944 | 6509072 | 63 | 1104 | 44 | 130 |

OBSERVACIONES: ⁽¹⁾ Fuente: Ing. Sergio Flesler – Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos

Coordenadas rectangulares planas (origen X₀: 500km al W del meridiano 62°; Y₀: polo Sur).

(*) pozo para agua

(**) pozo para petróleo

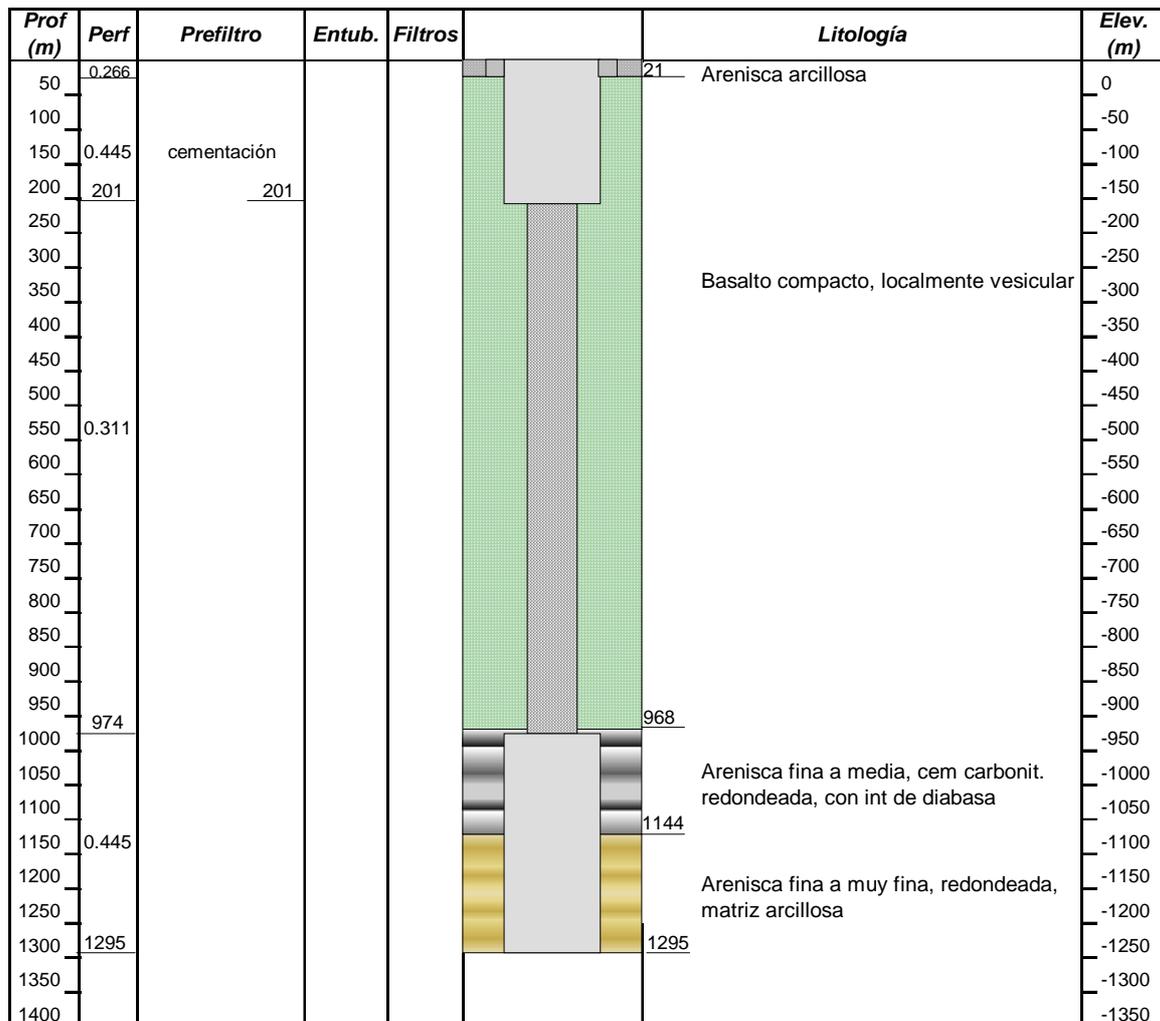


Figura 4 - Perfil pozo Horacio Quiroga (Uruguay)

Hidráulica de la zona confinada

En la tabla 2 se presentan algunos resultados de parámetros obtenidos en diferentes trabajos.

La gran dispersión de valores de transmisividad observados se debe a que las determinaciones fueron realizadas en condiciones diferentes. Los valores altos de los primeros antecedentes se corresponden a los estadios iniciales de surgencia, mientras que los valores menores son el resultado de ensayos bajo bombeo con depresiones significativas. En función de estas condiciones se entiende que estos últimos son los más representativos desde el punto de vista hidráulico fijando los valores de transmisividad para esta área entre 60 y 200 m²/d.

Cabe destacar que para las primeras estimaciones realizadas no existía el volumen de información con el que se contó para llevar a cabo los últimos cálculos de trasmisividad y coeficiente de almacenamiento, razón fundamental por la que se ha podido acotar con mayor precisión el rango de variación de la trasmisividad del acuífero.

La diferencia de valores para iguales condiciones de ensayos hidráulicos indicarían variaciones tanto en la conductividad hidráulica como en los espesores portadores del SAG. Los

estudios comparativos realizados por Decoud & Rocha (2001), entre la perforación de Federación (Argentina) y Salto Grande (Horacio Quiroga, Uruguay), parecen indicar que los elementos determinantes de los altos caudales obtenidos al norte, obedecen principalmente a una mayor porosidad en el paquete sedimentario que compone el acuífero y un mayor espesor del mismo.

Tabla 2 - Antecedentes de estimaciones de T y S para el SAG confinado

| <i>Autor</i> | <i>Zona</i> | <i>Trasmisividad (T)</i> <i>(m²/día)</i> | <i>Coficiente de almacenamiento (S)</i> |
|---|---|--|---|
| Tahal 1986 | NW del Uruguay | 1000 | 10 ⁻⁴ |
| IPT 1988 | NW del Uruguay | 363 –762 | 10 ⁻⁴ |
| Hidrosud 1988 | NW del Uruguay | 1500 | 10 ⁻⁴ |
| Montaño J <i>et al</i> 1998 | NW del Uruguay | 250 – 1500 | 10 ⁻⁴ |
| De los Santos 1999 | NW del Uruguay | 100 | 10 ⁻⁴ |
| Decoud & Rocha (2001) | Coincidente aproximadamente con el APCOSA | 145 - 190 | 10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁴ |
| Montaño J 2003 (en Veroslavsky <i>et al</i> 2003) | Coincidente aproximadamente con el APCOSA | 150 | 10 ⁻⁴ |
| Oleaga & De los Santos 2003 | Coincidente aproximadamente con el APCOSA | 67 - 141 | 10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁴ |

Hidrogeoquímica de la zona confinada

Según Montaño et al. (1998), las aguas del SAG Típico no presenta limitaciones de potabilidad, salvo que se mezclen con aguas del subsistema inferior. Las aguas se clasifican, según el diagrama de Piper, en bicarbonatadas sódicas para este sistema, con un valor medio de dureza total de 65 mg/l. Se observa mayor concentración de Na sobre el Ca (Na >> Ca) y en menor grado el ión bicarbonato sobre el ión Cloruro (HCO₃⁻ > Cl⁻).

Decoud & Rocha (2001) realizaron estudios de 7 perforaciones profundas confinadas por el basalto en los departamentos de Salto y Paysandú (Uruguay) y en la provincia de Entre Ríos (Argentina), basados en una serie de análisis de agua de las perforaciones realizados en un período de 7 años. Estos autores distinguen dos grupos en función de la calidad química del agua:

Grupo 1: Arapey, Daymán, San Nicanor y Guaviyú: tipo bicarbonatadas sódicas

Grupo 2: Federación, Ose y Salto Grande (Horacio Quiroga): tipo bicarbonatadas sódica cloruradas

Hidrotermalismo y surgencia

El grado geotérmico de las aguas del SAG puede ser aprovechado para la implantación de establecimientos hidrotermales, amortiguación de heladas, secado de granos y madera, hospitales y

establecimientos deportivos, calefacción de condominios, así como también para pelar y limpiar cueros de animales e higienización de ambientes, natación y balneoterapia, acondicionamiento de aire, calefacción de invernaderos, calefaccionamiento de criaderos, irrigación y calefacción de suelos, cultivo de hongos, secado y deshidratación de diversos productos tales como vegetales y frutas. Hasta el momento, la utilización del agua termal del SAG se ha restringido casi exclusivamente al turismo, desaprovechando el resto de sus cualidades debido, principalmente, a la falta de una cultura de uso de este recurso.

Origen del termalismo del SAG

La Cuenca Paraná es una extensa área de acumulación intracratónica que funcionó desde el Paleozoico inferior hasta finales del Cretácico que muestra secciones sedimentarias con espesores máximos de 7825 metros (Northfleet *et al*, 1969 en Ernani Da Rosa *et al* 2001). La Cuenca Paraná alberga al SAG, que como fuera señalado, está integrado por sedimentos de origen esencialmente continental y variadas permeabilidades, que forman una sucesión de niveles de acumulación de agua, constituyendo uno de los sistemas hidráulicos subterráneos más complejos del mundo.

La estructura geológica e hidrodinámica determinada por la presencia en amplias regiones de potentes lavas basálticas sobre el SAG, genera anomalías térmicas de baja entalpía. La existencia de un techo de rocas basálticas de baja permeabilidad impide la renovación directa del agua así como dificulta la pérdida de energía.

La temperatura del agua, que llega hasta 68 °C, se debe al gradiente geotérmico que varía entre 20 °C/km a lo largo del Río Pelotas, y 29 °C/km en las demás regiones de confinamiento del acuífero. En la región de Cachoeira Dourada (MG), se alcanza el mayor gradiente geotérmico para el SAG, alcanzando los 55 °C/km (Araujo *et al*, 1995 en Ernani Da Rosa *et al* 2001). En el área de estudio, de acuerdo a la clasificación de Teissedre & Barner (1981) en Ernani Da Rosa *et al* (2001), es de esperar valores de gradiente geotérmico de 1°C/35m.

Zona de surgencia

A partir del análisis de los datos de mapas piezométricos (Montaño *et al* 2002), resulta claramente una zona de surgencia. Del mismo se desprende un incremento de los niveles de surgencia de sur a norte y de este a oeste, alcanzando valores entre +35 y +40 entre Arapey (Salto) y Bella Unión (Artigas) en Uruguay y a la altura de Federación, al N de Concordia, en Argentina.

Superficies potenciométricas

No existen series de medidas históricas donde se pueda reconstruir la evolución de las variaciones piezométricas del SAG. Solamente se registraron medidas a impulsos de proyectos

sujetos a los vaivenes de planificaciones políticas que nunca llegaron a concretarse. No obstante esta información fue utilizada para la confección de un mapa piezométrico (Montaño *et al*, 1998), donde en primera instancia se observa una dirección general de flujo de orientación este-oeste, siendo la región infrabasáltica coincidente con el tránsito hacia una zona de descarga que se encontraría en Argentina. El gradiente hidráulico medio en la zona aflorante tiene un valor de 7×10^{-4} , mientras que en el área confinada se tienen valores de 2×10^{-4} al N y 6×10^{-4} al S, lo cual coincide con el mayor espesor del Sistema Acuífero en la dirección NW.

ÁREA AFLORANTE

La zona aflorante abarca en Uruguay en un área de 3700 km² en una faja de dirección N-S con un largo de 140 km y un ancho medio de 30 km, extendiéndose además hacia el NE en el territorio Brasileiro. Al interpretar hidrogeológicamente el subsuelo de la región se puede realizar la siguiente división (tabla 3):

Tabla 3 - División hidrogeológica del área aflorante

| Formación | Miembro | Litología | Capacidad del acuífero |
|--------------------------|---|----------------------------|------------------------|
| Tacuarembó (Jurásico) | Superior (Area Rivera- Santa Ana do Livramento) | - areniscas finas a medias | Bueno |
| | Superior (Area Artigas) | - areniscas finas a medias | Bueno |
| | Inferior (Área Tacuarembó) | - areniscas y pelitas | Regular |

Este paquete sedimentario se caracteriza por una sucesión de sedimentos de diferente permeabilidad, que lleva a clasificarlos en: acuíferos con alta permeabilidad (Formación Tacuarembó miembro superior); y de baja permeabilidad (Formación Tacuarembó miembro inferior). Se analiza por separado el Área Rivera (Uruguay) - Santa Ana (Brasil) y la ventana aflorante del Área Artigas (Uruguay), dado que presentan algunas características que hacen plausible esta distinción. En función de esta división se clasifica la región en:

Área Rivera – Santa Ana

Se desarrolla el SAG con un predominio de sedimentos de origen eólico, presentando en esta zona los mayores espesores. La transmisividad (T) del acuífero en esta zona es del orden de 150 m²/día. El valor del coeficiente de almacenamiento S es 10^{-3} , lo que puede indicar algún grado de semiconfinamiento del acuífero. Los valores del caudal específico (q), son del orden de 3 m³/h/m y

los rendimientos de los pozos varían entre 50 y 110 m³/h. Desde el punto de vista hidroquímico las aguas se clasifican como cloruradas cálcicas.

Área Tacuarembó

El sistema que predomina en esta zona, situada en la región centro norte del Uruguay, es el acuífero Tacuarembó (Miembro Inferior), constituido por areniscas y pelitas de origen fluvial. Estas litologías finas determinan un bajo potencial del acuífero lo que limita su explotación. La profundidad media de los pozos en la zona es de 80m y un caudal medio de 3,5 m³/h. Los valores de transmisividad son del orden de 25 m²/día. La clase de agua en función de la composición química es bicarbonatada cálcica.

Área Artigas: ventana aflorante

La ciudad de Artigas está situada sobre el acuífero en uno de los bordes de contacto del aflorante con el confinado (ventana); se presenta una doble condición, existiendo áreas del acuífero aflorantes y otras bajo cobertura de basalto. El recurso configura aquí una fuente de agua para diversos usos; el abastecimiento público de agua a la ciudad de Artigas, es mixto, con una fuente de agua superficial proveniente del río Cuareim, y una fuente de agua subterránea, extraída del acuífero Guaraní, en pozos de diferente profundidad y caudal. Se abastece a una población de 40.000 habitantes, para lo cual el agua subterránea aporta el 50 % de la demanda.

Pérez et al (2001) realizaron un estudio en el área, basado en información de 17 perforaciones, las cuales fueron clasificadas en función de su perfil constructivo y la profundidad de pozo (Tablas 4 y 5)

Tabla 4 - Clasificación de los pozos del área Artigas. N° de pozos por categoría.
(Perez et al. 2001)

| Profundidad | Perfil Constructivo | | Cantidad de pozos |
|----------------|------------------------|--------------------------|-------------------|
| | A. Revestimiento total | B. Revestimiento parcial | |
| 1. Hasta 60m | 4 | 1 | |
| 2. Hasta 120m | | 6 | |
| 3. Más de 120m | 4 | 2 | |

Tabla 5 - Caudales para las diferentes categorías (Pérez A et al 2001)

| Categoría | N° de pozos | Caudal m ³ /h. |
|-----------|-------------|---------------------------|
| A1 | 4 | 20 – 30 |
| A2 | - | - |
| A3 | 4 | 50-240 |
| B1 | 1 | 10 |
| B2 | 6 | 20 – 90 |
| B3 | 2 | 130-250 |

En la tabla 6 se resumen datos de Trasmisividad y Coeficiente de almacenamiento, para las situaciones de acuífero confinado por capas de basalto de hasta 70m y para áreas aflorantes.

Tabla 6 - Parámetros hidráulicos para las distintas situaciones del acuífero en el área
(Fuente: Pérez et al; 2001)

| | Nivel explotado | Trasmisividad (m ² /día/m) | Coef. de almacenamiento. |
|-------------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Área Bajo Basalto | 54 – 120 m | 194 | 10 ⁻⁴ |
| Área aflorante | 60 – 120 m | 374 | 4,50. 10 ⁻³ |
| Área aflorante | 150 – 210 m | 855 | 1,36. 10 ⁻³ |

Se observa que el acuífero presenta diferentes trasmisividades en los diferentes niveles de aporte estudiados, verificándose que los valores más altos se encuentran en el nivel más profundo, situado entre los 150 a 210 m. El coeficiente de almacenamiento refleja un semiconfinamiento de los niveles más superficiales, pasando claramente a condiciones de confinamiento, en el nivel más profundo investigado. El cálculo del radio de influencia para 30 horas de bombeo supera los 2,5 km de distancia para el nivel de aporte inferior.

El acuífero tiene entonces un comportamiento multicapa, funcionando como un sistema hidráulico integrado; con sectores con semiconfinamiento (área aflorante, profundidad 60-90 m) y sectores claramente confinados (profundidad mayor a 120 m).

Hidrogeoquímica del área aflorante

Según Montaña et al (1998) se puede establecer que la calidad de las aguas tanto para la unidad Rivera – Santa Ana como para la unidad Tacuarembó no presenta limitaciones de potabilidad. Estas aguas se clasifican como cloruradas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas, según el diagrama de Piper.

Se destaca la mayor concentración de Ca frente al Na y en algunos casos valores de Mg semejantes o superiores al Na (Ca > Na – Mg). Estos valores, relativamente elevados del Ca, se deben posiblemente a la naturaleza de la cementación de la unidad hidrogeológica Tacuarembó, que es ocasionalmente calcárea. No se encontraron valores de Fe, Mn y F que pudieran comprometer la utilización del acuífero.

Decoud & Rocha (2001) clasifican las aguas del acuífero en el área aflorante dentro del tipo bicarbonatadas cálcicas sódicas. Pérez et al (2001) establecen que las aguas se presentan como bicarbonatadas cálcicas en todas las perforaciones del área, tanto confinada por basaltos como aflorantes. El ión Ca > Na, y el HCO₃ >>> Cl.

El agua en la zona aflorante de Artigas es de excelente calidad para diversos usos; abastecimiento público, riego e industrias. Si bien la mayor parte de los pozos se encuentran

ubicados en el área confinada del basalto, a nivel de los pozos en el sector aflorante, no se han registrado indicadores de contaminación; en el caso de los nitratos, los valores más altos observados son de 9,7 ppm., pudiendo ubicar la media en valores de 2 ppm.

CONCLUSIONES

Como puede observarse existe una gran variedad respecto a la geometría y composición del SAG tanto en la zona aflorante, como confinada, que tiene su incidencia en las características hidráulicas y en la calidad de las aguas subterráneas.

En la zona aflorante predominan hacia el N (Rivera – Santa Ana, Artigas) los sedimentos de mayor macroporosidad con valores de transmisividad de $155\text{m}^2/\text{día}$, caudales específicos de $3\text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ y caudales de 50 a $110\text{ m}^3/\text{h}$. En el área Tacuarembó se desarrollan acuíferos con predominancia de litologías de limoarenosas con valores relativamente más bajos de transmisividad $25\text{m}^2/\text{día}$, caudales medios de $3,5\text{m}^3/\text{h}$ que cubren la demanda de pequeños tambos y casas individuales con áreas reducidas de riego. El agua es bicarbonatada cálcica o sódica. El valor medio de la dureza total expresada en CaCO_3 es $45\text{ mg}/\text{l}$ y de residuo seco es de $120\text{ mg}/\text{l}$.

En la zona confinada las variaciones en el comportamiento del SAG se deben principalmente a la incidencia de fenómenos tectónicos en la geometría del mismo. La presencia de fallas, filones diabásicos, levantamientos, etc compartimentan el sistema y condicionan el almacenamiento y circulación del agua subterránea marcando la gran heterogeneidad del sistema.

Esta situación es detectada en un área muy particular por su estructura al ser borde de una cuenca sedimentaria; influyendo en la heterogeneidad de los cuerpos permeables que constituyen el SAG. Estas características determinan una gama de variaciones en las características hidráulicas que se reflejan en la transmisividad con valores 150 a $250\text{ m}^2/\text{día}$ en la zona confinada. También existe una gran variedad de tipos de agua desde potables bicarbonatadas cálcicas a sódicas hasta clorurada sódicas, estas últimas influenciadas por el acuífero pérmico

Existe una gran variación en el caudal de surgencia de los distintos pozos, presentando valores que van desde 30 a $340\text{ m}^3/\text{h}$.

La zona denominada “ventana de Artigas” se corresponde a una zona de afloramiento del acuífero dentro de un área de confinamiento del SAG cubierto de lavas de la Formación Arapey. Esta situación representa la gran complejidad del SAG que en este caso en menos de 30km se pasa de un acuífero confinado, semiconfinado a un típico acuífero libre.

En los mismos se observa una gran variación de la conductividad hidráulica en la vertical que se refleja en cambios en los valores de la trasmisividad que van desde 194 para niveles superficiales a $855\text{m}^3/\text{día}$ para niveles más profundos a los 150m .

También varía el coeficiente de almacenamiento, que pasa de indicar condiciones de semiconfinamiento en los niveles más superficiales a condiciones de confinamiento, en el nivel más profundo.

Estos resultados demuestran que el SAG no constituye un sistema homogéneo y la pseudo homogeneidad que se presenta en muchas publicaciones se debe simplemente a zonas con falta de datos o estudios detallados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Araujo LM, Franca AB & Potter PE (1999): *Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Parana and Chaco-Parana Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system*. USA. *Hidrology Journal* 7: 317-336.
- [2] Bossi J, Navarro R (1991): *Geología del Uruguay*. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo, 970pp
- [3] Da Rosa Filho EF, Forlin M, Montaña J (1998): *Informacoes básicas sobre distribuicao do Sistema Aquífero Guarany nas regioes Sul e Sudeste do Brasil*. *A agua em Revista* (Revista da CPRM, Servicio Geológico do Brasil) 10:22-26.
- [4] Da Rosa Filho E F; Hindi E; Giusti D; Nadal C; Montaña J (2001): *Distribuição do Geotermalismo na Bacia Sedimentar Do Paraná*. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología* v1, n1. Pp: 67-74.
- [5] Decoud P & Rocha L (2001): *Aportes de la hidráulica subterránea del Acuífero Guaraní en el NO del Uruguay*.
- [6] HIDROSUD. (1988). *Desarrollo turístico de la actividad termal en el litoral del Uruguay*. Trabajo de Consultoría. Montevideo-Uruguay. 1988.
- [7] Montaña J, Carrión R : *Optimización de la Explotación del Sistema Acuífero Triásico Jurásico Tacuarembó-Buena Vista*.
- [8] Montaña J & Collazo P (1996): *Vulnerabilidad del techo del Sistema Acuífero Guaraní en la Cuenca Norte del Uruguay*. 9º Congreso Brasileiro de Aguas Subterráneas. Salvador , Brasil.
- [9] Montaña J & Collazo P (1998): *Hidrogeoquímica del Sistema Acuífero Guaraní (Uruguay)*. II Congreso Uruguayo de Geología pp.395- 400, Punta del Este.Uruguay.
- [10] Montaña J, Ernani F, Hindi E, Cicalese H, Montaña M, Gagliardi S (2002): *Importancia de las Estructuras Geológicas en el Modelo Conceptual del Sistema Acuífero Guaraní Área Uruguay*. *Revista da Associacao Brasileira de Aguas Subterráneas* Numero 16. Pp 111 a 119.

- [11] Montañó J, Tujchneider O, Auge M, Fili M, Paris M y D'Elia M, Pérez M, Nagy M, Collazo P, Decoud P (1998) : *Sistema Acuífero Guaraní-Acuíferos Regionales en América Latina-Capítulo Argentino Uruguayo*. Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión Nacional del Litoral. Santa Fé, Argentina, 217 p.
- [12] Oleaga A y De Los Santos J (2003) *Nuevo análisis para determinación de parámetros hidráulicos en pozos del Acuífero Guaraní (Uruguay)*. Congreso Argentino de Hidrogeología (Rosario Argentina). Pp 91-100.
- [13] Pérez A, Rocha L, Decoud P & Carvajal A (2001): *Comportamiento del Acuífero Guaraní en la Ciudad de Artigas, Uruguay*.
- [14] Tahal (1986): *Proyecto agrícola de Riego basado en la perforación de pozos profundos*. Tahal Consulting Engineers, Verno-ROU, 8 tomos.
- [15] Veroslavsky G; Ubilla M; Martínez S; de Santa Ana H; Goso C; Montañó J; Muzio R; Perea D; Piñeiro G; Rossello E & Ucha N (2003): *Cuencas Sedimentarias de Uruguay. Geología, paleontología y recursos naturales. Mesozoico*. DIRAC, Montevideo, Uruguay. 214pp.