

Hidroquímica del Sistema Acuífero Guaraní e implicaciones para la gestión

M. Manzano⁽¹⁾ y M. Guimaraens⁽²⁾

(1) Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena
Pº de Alfonso XIII, 52, Cartagena, España
marisol.manzano@upct.es

(2) Facultad de Ingeniería, RO del Uruguay, Montevideo, Uruguay
martin.guimaraens@gmail.com

RESUMEN

Con el fin de generar conocimiento científico robusto que dé apoyo a la gestión del Sistema Acuífero Guaraní, en el marco del Proyecto para la Protección Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní se estudió la composición química natural del acuífero, su distribución espacial y los procesos responsables. Se manejaron datos químicos obtenidos en ese proyecto y datos recopilados de estudios anteriores, tras evaluar su calidad. Se identificaron las facies hidroquímicas existentes y su distribución espacial, y se estudiaron los procesos físicos e hidrogeoquímicos más probables para explicar ambos. Mediante el uso combinado de balances de masa y modelación hidrogeoquímica, se verificó la verosimilitud de esos procesos y se evaluó la importancia relativa de cada uno. En casi todo el acuífero se identificaron tres facies que aparecen siempre en el mismo orden desde las áreas aflorantes hacia el centro de la cuenca: facies Ca/Mg-HCO₃, cuyo origen principal es la disolución de CO₂ y de carbonatos por la lluvia; facies Na-HCO₃, cuyo origen principal es el intercambio catiónico y la disolución de carbonatos por las aguas tipo Ca/Mg-HCO₃, y facies de composición variable entre Na-HCO₃-SO₄-Cl y Na-Cl o Na-SO₄, apareciendo estas últimas en el centro de la cuenca, cuyo origen principal es la mezcla de aguas de tipo NaHCO₃ con otras más salinas procedentes de formaciones infrayacentes al SAG. La fuente de F parece estar en estas formaciones. Aunque los flujos ascendentes naturales parecen poco relevantes, una explotación inadecuada podría incrementarlos e inducir la polución de volúmenes del SAG que tienen agua de buena calidad.

Palabras clave: flúor, fondo químico natural, modelación hidrogeoquímica, SAG

Hydrochemistry of the Guaraní Aquifer System and implications for its management

ABSTRACT

Within the framework of the Project for the Sustainable Management of the Guaraní aquifer system (GAS) we have studied the chemical baseline of its distribution and origin in order to build up a sound scientific understanding of the aquifer and thus be able to support its correct management. We have used chemical data obtained within this project and also in former studies. The baseline chemical facies, their distribution and the possible hydrogeochemical reactions involved were studied with the support of classical graphic tools. The hydrochemical conceptual model was checked with mass balances and inverse modeling, and the relative contribution to the balances of every thermodynamically feasible reaction was assessed. The GAS chemical baseline is quite homogeneous. Three chemical facies were found throughout the aquifer as a whole, appearing in the same order downstream from the outcropping recharge areas towards the confined sectors in the centre of the basin: facies A (Ca-HCO₃ and Mg-HCO₃ water), produced mainly by rainwater infiltration dissolving CO₂ and carbonate minerals; facies B (Na-HCO₃ water), caused mostly by facies A water undergoing cationic exchange and carbonate dissolution; and facies C (Na-HCO₃-SO₄-Cl to Na-Cl or Na-SO₄ water), resulting from the mixing of facies B with a more saline groundwater from geological formations underlying those formally designed as being part of the SAG. Fluorine seems to be associated with this deep, saline groundwater. Under natural conditions the magnitude of the upward flows seems scarcely relevant, but uncontrolled groundwater exploitation may lead to increased flow rates and to the pollution of large aquifer areas that at the moment contain good-quality water.

Key words: chemical baseline, fluorine, GAS, hydrogeochemical modelling

ABRIDGED ENGLISH VERSION

The Guaraní Aquifer System (GAS) is a large transboundary aquifer of about 1,100,000 km² located in South America within the old sedimentary basin of the Paraná River. The aquifer is shared by Brazil, Paraguay, Uruguay and Argentina. Most of the GAS lies beneath zones with the highest economic and demographic potential in Latin America, and the growing use of its groundwater is jeopardised by uncontrolled management. Founded by the World Bank, the American States Organization, the International Atomic Energy Agency and the four countries sharing the aquifer, the Project for the Environmental Protection and Sustainable Management of the Guaraní Aquifer System (GAS Project) was developed between 2004 and 2009. Within the framework of this project we have studied the chemical baseline of the GAS, its distribution and origin in order to build up a sound scientific understanding to support the sustainable management of the aquifer.

The GAS consists of a set of sedimentary formations of fluvial, lacustrine and eolian origin which formed in the old Paraná River sedimentary basin during the Triassic and Jurassic periods. The morphology of the sedimentary set is that of a gentle syncline, the flanks of which extend down to 1,000 m in the centre of the Paraná basin. Their joint thickness ranges from 50 to 800 m, with an average value of 250 m. The GAS layers are confined by a Cretaceous basalt formation up to 1000 m thick throughout almost the entire aquifer, which is covered by fluvial and eolian sediments in the northern (Brazilian) half of the basin and also to the south-west (Uruguay and Argentina). The GAS formations crop out around the perimeter of the sedimentary basin.

The aquifer is recharged by precipitation infiltrating in the outcropping areas, and also by flow through vertical discontinuities in the overlying basalt formations in zones where the hydraulic gradient favours downward groundwater movement. Nevertheless, groundwater recharge rates to the GAS seem to be rather small, around 10-15 mm/year, as deduced from isotope data (Aravena, 2008) and groundwater flow modelling (Vives et al., this volume). Groundwater ages increase rapidly from the unconfined areas to the nearby weakly confined areas, where apparent residence times of around several thousand years are common, whilst the groundwater towards the centre of the basin is devoid of ¹⁴C. The prevalent conceptual flow model suggests that most of the groundwater recharged in the GAS outcrops moves along local flow cells, discharging into nearby river valleys and springs. The groundwater present in the highly confined areas, which constitute most of the aquifer, is very old as it moves quite slowly under very small hydraulic gradients.

Some 30,000 km³ of good-quality groundwater is estimated to be present in the confined GAS. The quality of the water, together with the possibility of extracting it where it is needed, renders the exploitation of the GAS for human use an attractive economic, social and political opportunity. Furthermore, as the geothermal gradient leads to relatively high groundwater temperatures (50° to 65° C) there are good opportunities for thermal uses. At present there are few places in Argentina, Uruguay and Brazil where warm GAS groundwater is used, but the number of deep wells is rapidly increasing. Thus the aquifer faces risks deriving from uncontrolled management, the most relevant being pollution both from shallow groundwater in the overlying formations, which are affected by human activity, and from deep saline waters in pre-GAS formations, as upward-flowing water rates could increase.

The work consisted in an integrated study of groundwater chemical information (mostly major components but also some minor, such as F), geological information (borehole geological columns, mineralogical data and geological cross sections), and hydrogeological information (piezometric levels, location of natural discharge areas and thermal activity). Part of this information was generated within the framework of the GAS Project, but most has been compiled from pre-existing projects, academic works and publications. Particularly thorough was the search for groundwater chemical data, which resulted in 1,082 different chemical analyses, mainly from wells but also from rivers, springs and precipitation. Only 615 of these had an acceptable ion-balance error, however, and were therefore chosen for use in this study, even though most of the rejected analyses came from reputable works.

A double approach was adopted for the hydrochemical study: a regionalized study and a generalized one. For the **regionalized study** eight transects following main (apparent) groundwater flow lines were drawn, and the evolution of groundwater chemistry along each transect was studied on the basis of chemical analyses from a number of wells. Historical chemical information was available for most of these wells, so the possible temporal evolution of groundwater chemistry for single sites could also be studied. As any significant temporal change was observed, chemical data from different years for different wells were relied on to observe the evolution of the groundwater chemistry along the transects. A total of 140 analyses were used for the eight transects.

The baseline chemical facies and their regional distribution were studied with the support of classical graphic tools such as Piper, Schöeller-Berkaloff and Stiff diagrams, and with concentration vs distance graphs. The probable hydrogeochemical reactions giving rise to the observed chemistry were deduced with the support of ion content/ratio vs ion content/ratio graphs, Principal-Component Analyses, mineral saturation indexes and mass-balance calculations along transects. The hydrochemical conceptual model thus produced was checked with inverse hydrogeochemical modelling and the relative contribution to the mass balances of every thermodynamically feasible reaction was assessed using PHREEQC.

In the generalized study all the chemical information available was examined to check whether the hydro-chemical model proposed to explain the regional evolution along transects was also valid for the whole aquifer area. This was undertaken with the support of graphic tools, calculations of mineral saturation indexes, Principal-Component Analyses and aquifer-scale distribution maps drawn for selected chemical components and parameters.

The main conclusion arrived at was that the GAS chemical baseline is quite homogeneous at the regional scale. Three chemical facies, referred to as A, B and C, were found throughout the aquifer, appearing in the same order downstream from the recharge areas towards the confined sectors in the centre of the basin. Facies A (Ca-HCO₃ and Mg-HCO₃ water) was proposed to be mostly the results of rainwater infiltration dissolving CO₂ and carbonate minerals in the recharge areas; facies B (Na-HCO₃ water) was proposed to be caused mostly by facies A water undergoing cation exchange (Na adsorbed versus mainly Ca in solution) and carbonate dissolution, and facies C (Na-HCO₃-SO₄ and Na-HCO₃-Cl to Na-Cl water) was proposed to be mostly the result of facies B water mixing with a more saline groundwater from pre-GAS formations. The presence of pre-GAS groundwater in the GAS formations, even in small proportions, is revealed by SO₄/Cl ratio values (meq/L) > 1. To the south and west of the Asunción-Río Grande Arc (Paraguay-south of Brazil) the groundwater facies found are also A, B and C, but with some differences, which might be due to the existence of additional sources to the ones deduced for the rest of the aquifer. As they represent only a minor part of the whole system, however, they are not discussed here.

Most of the GAS groundwaters studied are of perfectly good quality for human use. Groundwater pollution by urban, industrial and farming activities is broadly observed in the unconfined areas of the aquifer and in some nearby weakly confined areas where the basalt is fractured, but the most common situation is that of pristine waters. Types A and B are slightly mineralized and most of the type C groundwaters are mineralized to a moderate degree. High-salinity groundwaters are only found in the SW zone of the aquifer (Argentina), where they are exploited for tourism and farming uses.

Fluorine is probably the main component that renders the quality of B and C groundwaters unsuitable for human use. The fluorine source seems to be associated to deep saline groundwater from pre-GAS formations. Under the natural flow conditions prevailing in most of the confined aquifer the magnitude of upward flows would seem at the moment to be small, though little is known about the rates. Uncontrolled groundwater exploitation may, however, lead to increased flow rates and induce the pollution of large parts of the GAS that contain high-quality water at present. Neither is much known about the characteristics of the pre-GAS formations and of their pore water at the aquifer scale, and significant regional differences may exist. Geological, hydro-geological and chemical observations concerning these formations should be generated and compiled as well as information about vertical gradients. All these data are needed to forecast possible groundwater flow and quality changes under hypothetical scenarios of changing aquifer development.

The results of this study are especially relevant to support the design of groundwater-quality monitoring networks and programmes. In view of the chemical and piezometric information available, observation boreholes should be drilled and cased so as to observe the characteristics and behaviour of the groundwater at different depths, whilst minimizing the borehole-induced mixing of large aquifer thickness. As far as quality monitoring is concerned, in view of the ages of the groundwater and of the deduced baseline great efforts should be applied to the recharge areas, where short-frequency monitoring should focus on anthropogenic pollutants. As for the confined areas, the lack of observed chemical changes in some pumping wells with 30 years of information behind them and the magnitude of the groundwater ages suggest that low-frequency monitoring is enough and that it should focus upon changes in salinity and fluorine contents.

Introducción y objetivos

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) es un gran sistema hidrogeológico localizado en el centro-este de América del Sur, en la cuenca sedimentaria del río Paraná. Tiene una extensión de 1.100.000 km² y subyace a grandes zonas de cuatro países: Brasil (alrededor del 63%), Argentina (alrededor del 21%), Paraguay (alrededor del 8%) y Uruguay (alrededor del 8%).

Debido a la ubicación del SAG, compartida entre algunos de los países más activos y con mayor potencial económico y demográfico de Latino América, y

a la creciente utilización del mismo de manera intensa en ciertas localizaciones, en el año 2003 el Banco Mundial y la Organización de Estados Americanos, junto con los cuatro países mencionados, pusieron en marcha el Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PPADSSAG).

Entre los muchos trabajos realizados para mejorar el conocimiento del funcionamiento del SAG y proponer un plan de gestión conjunta del mismo que asegure la sostenibilidad de los recursos en cantidad y calidad, se encuentra el proyecto Hidrogeología General,

Termalismo y Modelo Regional del Acuífero Guaraní (HGTMR). Los investigadores firmantes del presente trabajo realizaron un estudio hidroquímico regional como parte del proyecto HGTMR. El informe del estudio fue entregado a la Secretaría del PPADESAG en enero de 2009 (Manzano y Guimaraens, 2009a) y una síntesis del mismo fue presentada en un congreso ese mismo año (Manzano y Guimaraens, 2009b). El presente trabajo se basa en dicho informe, sin que se hayan incorporado al mismo nuevas elaboraciones ni tampoco referencias a trabajos publicados posteriormente a la finalización del mismo, algunos de los cuales pueden tener coincidencias metodológicas con este.

El objetivo último del estudio hidrogeoquímico ha sido contribuir al conocimiento sobre el funcionamiento del SAG con vistas a su gestión sostenible. Esto implica disponer de información robusta de referencia que permita prevenir, identificar y/o remediar posibles procesos de deterioro de la calidad. Para ello se ha estudiado el fondo químico natural del sistema acuífero. Los objetivos específicos han sido 1) conocer las características del fondo químico natural, 2) su distribución espacial y 3) su origen, en términos de procesos hidrogeoquímicos responsables y su orden de relevancia.

Características hidrogeológicas

En la actualidad el término Sistema Acuífero Guaraní se aplica a un conjunto de formaciones geológicas detríticas de grano fino (areniscas poco cementadas) y origen fluvial, lacustre y eólico, que fueron depositadas en la cuenca geológica del río Paraná durante los periodos Triásico y Jurásico, sobre una superficie de erosión permo-triásica datada en 250 Maños. El conjunto de formaciones geológicas del SAG tiene un espesor medio de 250 m, aunque varía entre menos de 50 m y casi 800 m, y se encuentra a profundidades de hasta 1000 m (Figura 1). Las formaciones del SAG tienen distintos nombres en distintos lugares (Pirambaia y Botucatú en Brasil, Misiones en Paraguay, Misiones o Tacuarembó en Argentina, Tacuarembó y Itacumbú en Uruguay), y no todas están en los cuatro países.

Las formaciones del SAG están recubiertas casi en toda su extensión por extensas coladas basálticas del Cretácico (145 a 130 Maños), cuyo espesor puede alcanzar los 1000 m en el centro de la cuenca del Paraná. En aproximadamente la mitad norte de la cuenca sedimentaria del Paraná los basaltos están recubiertos por sedimentos arenosos de origen fluvial y eólico. Asimismo, la terminación suroccidental de las formaciones del SAG en Argentina y Uruguay está recubierta por sedimentos finos.

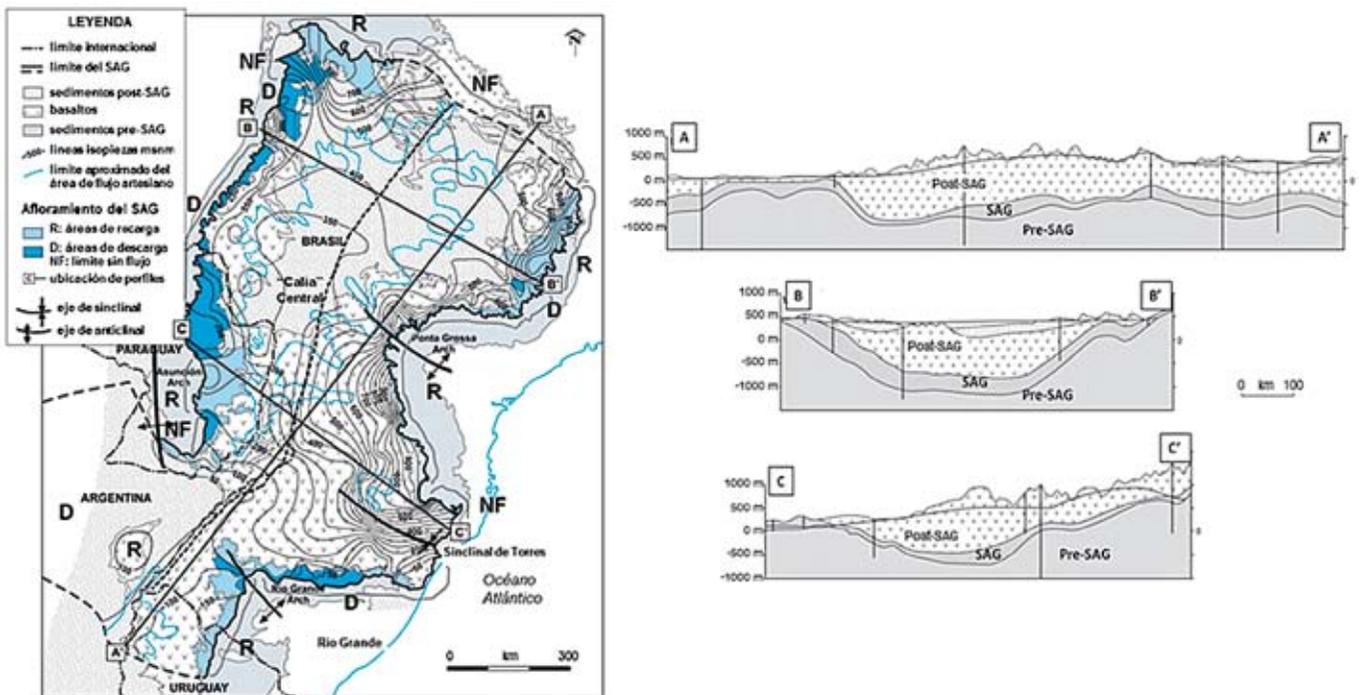


Figura 1. Mapa geológico esquemático del Sistema Acuífero Guaraní con la piezometría y las condiciones de contorno del flujo (izquierda). Cortes geológicos ilustrativos (derecha). Modificado de Foster et al. (2009).

Figure 1. Geological map of the Guaraní aquifer system showing the piezometry and boundary flow conditions (left). Illustrative geological cross sections (right). Modified after Foster et al. (2009).

El conjunto de formaciones del SAG tiene arquitectura arqueada hacia abajo y hacia el centro de la cuenca sedimentaria del río Paraná. A escala regional se identifican al menos dos grandes estructuras anti-formes que juegan un papel relevante en el flujo de agua subterránea (Figura 1): el Arco de Ponta Grossa, al N del estado de Paraná (Brasil), y el Arco de Asunción-Río Grande, que va desde Paraguay hasta el SE de Brasil y que divide la porción sur del SAG en dos cuencas sedimentarias relativamente independientes, la cuenca central del Paraná y la cuenca suroccidental del Chaco-bajo Paraná. El SAG está afectado, además, por múltiples estructuras tectónicas y por diques volcánicos, pero a pesar del efecto local de dichas discontinuidades, a escala regional se considera que constituye un cuerpo único y continuo.

La recarga natural ocurre por la infiltración directa de las aguas de lluvia en las áreas de afloramiento de las formaciones del SAG, y también de forma indirecta por infiltración vertical a lo largo de las discontinuidades de las rocas suprayacentes (principalmente basaltos) en áreas donde la piezometría favorece los flujos descendentes. No obstante, varios estudios isotópicos realizados antes y durante el PPADSSAG (Aravena, 2008), así como la modelación numérica del flujo realizada en el marco de dicho proyecto (Vives et al., en este volumen), sugieren que la recarga efectiva es reducida, del orden 10-15 mm/año, y que buena parte del agua que se recarga en las áreas de afloramiento se mueve en celdas de flujo locales, descargando a valles fluviales encajados, manantiales y pozos cerca de donde se recargan. Así, el agua subterránea presente en zonas del SAG ya confinadas por basaltos, pero no lejos de las áreas de recarga, tiene varios miles de años de permanencia en el terreno, y hacia el centro de la cuenca el agua está desprovista de ^{14}C .

Se estima que el conjunto del SAG contiene unos 30.000 km³ de agua dulce de baja mineralización y buena calidad. Dicha calidad, junto a la posibilidad de captación en las propias zonas donde están las demandas, hacen que el aprovechamiento de las aguas del SAG para el abastecimiento de la población ofrezca oportunidades económicas, sociales y políticas destacables.

Debido al gradiente geotérmico, las aguas del SAG pueden alcanzar temperaturas relativamente altas, en general entre 50° y 65° C, razón por la cual se las considera como fuente potencial de energía térmica. Actualmente son explotadas localmente con fines turísticos y agropecuarios, pero el número de perforaciones profundas está creciendo rápidamente y la explotación no controlada podría inducir un deterioro de la calidad tanto por contaminación desde la superficie o

el subsuelo, como por ascenso de aguas salinas desde formaciones infrayacentes al SAG (principalmente acuitardos con aguas muy salinas).

Materiales y métodos

Para el estudio se ha utilizado información hidroquímica, geológica (perfiles litológicos de pozos y secciones geológicas, mineralogías) e hidrogeológica (información relativa a niveles estáticos, dinámicos, existencia de surgencias, etc.). Los análisis químicos manejados proceden de los muestreos realizados dentro del Proyecto SAG (para este estudio y para los distintos trabajos del Fondo de Universidades) y también de trabajos anteriores, los cuales se han recopilado e incorporado a una base de datos hidrogeoquímica e isotópica con el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica. La información antecedente recopilada procede de las siguientes fuentes: Da Silva (1983), De Souza (2004), Gastmans (2007), Kittl (2000), Oleaga (2002), Silva Busso (1999), Bonotto (2006), Bonotto *et al.* (1995), Creswell y Bonotto (2007), Da Rosa Filho *et al.* (2005 y 2006), Gallo y Sinelli (1980), Gastmans y Chang (2005), Invernizzi *et al.* (2004), Szikszay et al. (1981), Teissedre y Barner (1981), Meng y Maynard (2001), Tonetto y Bonotto (2005); BGR (2007). No se citan otros muchos trabajos consultados que solo elaboran información ya presentada en los mencionados.

Se han recopilado 1082 análisis químicos distintos. La mayoría corresponde a aguas de pozo y el resto a aguas de río, manantial y lluvia. De ellos, 615 (aproximadamente el 57%) tienen una calidad aceptable, pero los demás están incompletos o bien tienen un error de balance iónico superior al 20% (calculado según la expresión $\varepsilon = 200 * [\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones} / \sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}]$). Para el estudio que sigue se han usado únicamente análisis con error inferior al 20%.

El estudio hidrogeoquímico se ha realizado con dos enfoques distintos: 1) un *estudio regionalizado*, a través de una selección de análisis de aguas distribuidas a lo largo de 8 transectos hidrogeológicos razonablemente representativos, a priori, de posibles líneas regionales de flujo –suponiendo que este fuese horizontal– (Fig. 2) y 2) un *estudio generalizado* a escala de todo el acuífero. El objetivo del primero ha sido identificar facies hidroquímicas, su distribución espacial y su relación con la red de flujo, así como identificar procesos hidrogeoquímicos en distintas zonas. El objetivo del segundo ha sido identificar procesos hidrogeoquímicos en el conjunto del acuífero y contrastar lo deducido en los transectos.

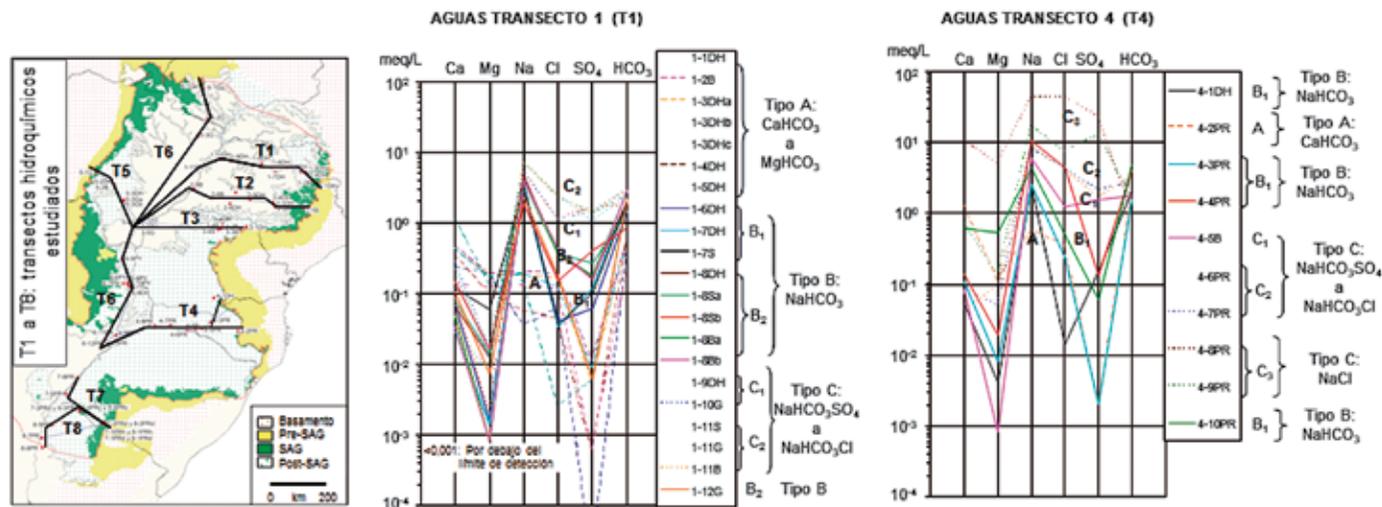


Figura 2. Ejemplo del proceso de identificación de facies hidroquímicas en el estudio regionalizado. Con el apoyo de diagramas de Schöeller y Stiff se identificaron los tipos de aguas existentes en ocho transectos razonablemente coincidentes, a priori, con grandes líneas de flujo regional. Ver más detalles en el texto.

Figure 2. Example of the methods used to identify the chemical facies in the regionalized study. The facies appearing along eight assumed regional flow paths were identified with the support of Schöeller and Stiff diagrams. See the text for further information.

Para el estudio regionalizado se ha seguido la siguiente metodología:

- Integración y sistematización de información química, geológica e hidrogeológica para describir los transectos definidos. La información geológica e hidrogeológica procede de las fuentes citadas, de la Base de Pozos del PPADSSAG y de LEBAC (2008).
- Estudio detallado de 140 análisis seleccionados y distribuidos en los 8 transectos para: a) identificar las facies hidroquímicas existentes y su distribución espacial; b) estudiar la evolución espacial de concentraciones, de ciertas relaciones iónicas y de ciertos índices de saturación y deducir posibles procesos hidrogeoquímicos; c) identificar reacciones hidrogeoquímicas que satisfagan balances de masas entre aguas de distintas facies y verificarlas, evaluando la contribución relativa de cada una a los cambios de composición del agua mediante modelación numérica (con PHREEQC, Parkhurst y Appelo, 1999).

El estudio generalizado ha consistido en las siguientes actividades:

- Estudio de relaciones entre solutos y entre relaciones iónicas particulares indicativas de ciertos procesos hidrogeoquímicos y deducción de la viabilidad de estos.
- Trazado de mapas de isocontenidos de algunos solutos relevantes (Na, Cl, F, SO₄) y de isovalores de pH, alcalinidad, SDT y Dureza a escala del acuífero, y contraste de los mismos con lo deducido

en el estudio regionalizado. Por razones de espacio estos no se incluyen aquí.

Por último, se ha integrado la información obtenida para el conjunto de los transectos con la obtenida a partir de mapas, relaciones iónicas, etc. para proponer un modelo conceptual robusto del origen del fondo químico natural de las aguas del SAG.

Facies hidroquímicas del fondo natural y su origen

La regionalización de la información y el estudio en transectos ha facilitado la sistematización del trabajo. Por cuestión de espacio se describe solamente, a modo de ejemplo, el análisis realizado en los transectos 1 y 4, que es similar al realizado en todos.

Identificación de facies hidroquímicas y su distribución espacial

La composición hidroquímica del SAG ha resultado ser bastante homogénea. En todo el acuífero se han identificado las tres mismas facies, que coinciden con las deducidas en trabajos anteriores centrados en el sector N del SAG. La principal aportación de este estudio ha sido comprobar que dichas facies son extensivas a todo el acuífero y deducir los procesos hidrogeoquímicos relevantes que las ocasionan. Las facies aparecen siempre en el mismo orden desde la zona de afloramiento (desde los contornos del SAG) hacia el centro de la cuenca: **facies A** (aguas de

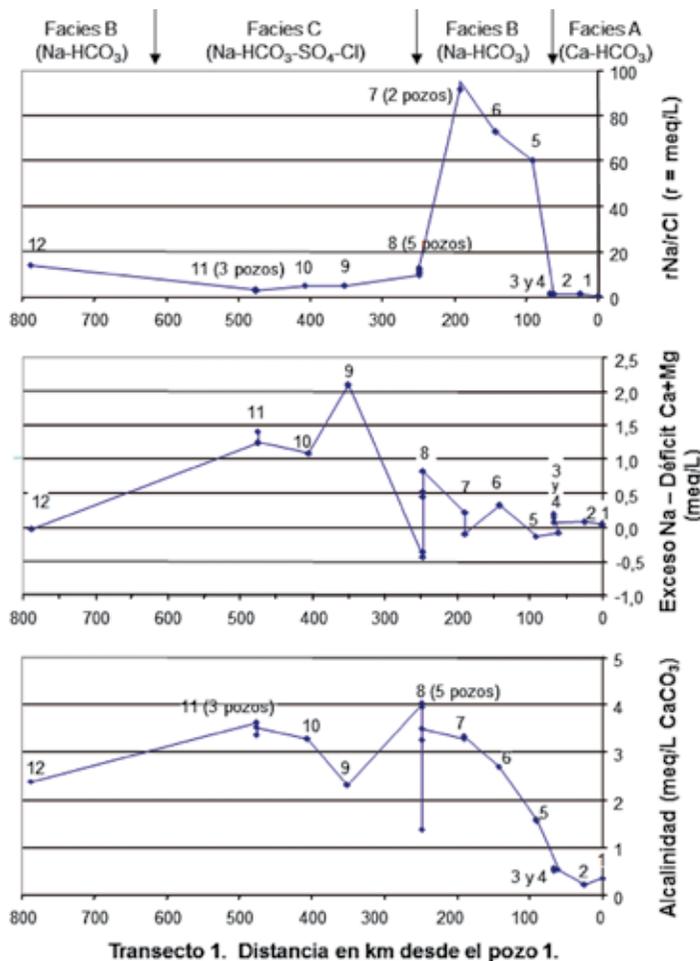
tipo Ca-HCO₃ o Mg-HCO₃, muy poco mineralizadas), **facies B** (aguas de tipo Na-HCO₃, con mineralización entre baja y media) y **facies C** (aguas de composición variable entre Na-HCO₃-SO₄-Cl y Na-Cl o Na-SO₄, apareciendo estas últimas más hacia el centro de la cuenca; con mineralización entre media y alta). En los transectos 7 y 8 (S del SAG) se ha encontrado una facies adicional, la **facies D** (agua de tipo Ca-Cl y Mg-Cl), que aparece localizada en áreas urbanas. La Fig. 2 ilustra la identificación de facies en los transectos 1 y 4 con el apoyo de diagramas de Schöeller-Berkaloff.

Deducción de procesos hidrogeoquímicos básicos responsables del fondo natural

En el estudio regionalizado, la observación de la evolución de las concentraciones y de ciertas relaciones iónicas a lo largo de cada transecto ha permitido pro-

poner un conjunto de reacciones químicas como procesos más probables para explicar esas evoluciones. El proceso de deducción se ilustra con las figuras 3 y 4. La Fig. 3 muestra como la observación conjunta de la evolución de la relación Na/Cl, la alcalinidad y la diferencia entre el exceso de Na sobre Cl y el déficit de Ca+Mg respecto a la alcalinidad permitió deducir las zonas donde los procesos más relevantes parecen ser la infiltración de agua meteórica y la disolución de CO₂ edáfico y de carbonatos sólidos (aguas de facies A), otras zonas donde domina el intercambio catiónico de Na adsorbido por Ca y posiblemente Mg en solución y la disolución de carbonatos sólidos (aguas de facies B), y finalmente otras donde la composición del agua parece deberse a la mezcla de aguas de facies B con otras aguas más mineralizadas que estas y cuya relación Na/Cl es cercana a 1.

De modo similar, la Fig. 4 muestra como la observación conjunta de la evolución de la relación Cl/SO₄



Pozos 1 a 4. Na/Cl ~ 1: Agua de recarga local.

Pozos 5 a 8 y 12. Na >> Cl: existencia de una fuente de Na relevante y adicional al aporte atmosférico.

Hipótesis: 1. Intercambio iónico NaX / (Ca,Mg)_L
2. Disolución de albita (NaAlSi₃O₈)

Pozos 9 a 11. Na > Cl: sugiere mezcla de agua tipo B con otra externa al SAG y con relación Na/Cl ~ 1.

Pozos 9,10,11. Exceso de Na pequeño y no equilibrado por déficit de Ca+Mg.

Hipótesis: mezcla agua facies B (propia del SAG) con otra de facies NaCl o NaClSO₄ (distinta al SAG).

Valores negativos (déficit (Ca+Mg) > exceso Na): sugieren disolución de carbonatos inducida por el intercambio de Na por (Ca+Mg).

Aumento de alcalinidad entre 1 y 8. Sugiere disolución de carbonatos, más intensa en la zona donde el intercambio catiónico domina y hace desaparecer Ca y Mg del agua.

Pozos 8 a 11. Escasa variación de la alcalinidad: sugiere aguas en o cerca del equilibrio con CaCO₃.

Pozo 12. Agua de facies B: menos evolucionada que las anteriores, no ubicada sobre la misma línea de flujo que el resto sino sobre otra procedente del NO.

Figura 3. Ejemplo de deducción de procesos hidrogeoquímicos a lo largo de los transectos (los datos corresponden al Transecto 1): intercambio iónico, disolución/precipitación de carbonatos y mezcla con aguas externas al SAG y más salinas que las de este acuífero.
Figure 3. Example of identification of the hydrogeochemical processes occurring along the transects (the data shown are from Transect 1): cation exchange, carbonate dissolution/precipitation, and mixing with an external groundwater saltier than that of the GAS.

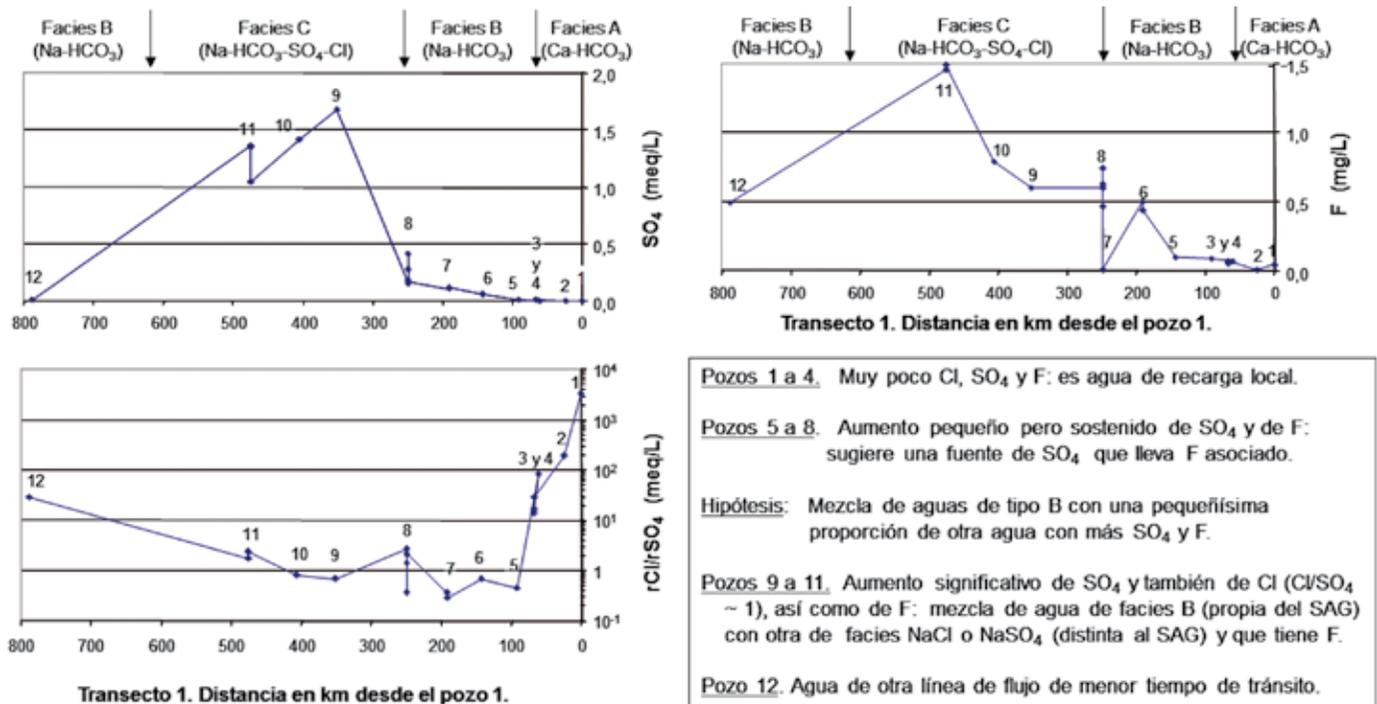


Figura 4. Ejemplo de la deducción de procesos de mezcla a lo largo de transectos (los datos corresponden al Transecto 1): Las aguas típicas del SAG confinado (facies B), cuya relación Cl/SO₄ es < 1 (en meq/L), se mezclarían con aguas más salinas y externas al SAG que parecen tener una relación Cl/SO₄ ≈ 1 (aunque tienen mucho más SO₄²⁻ también tienen más Cl) y contienen flúor. La mezcla de aguas de tipo B con esas otras aguas externas al SAG originaría las aguas de facies C.

Figure 4. Example of the identification of the mixing processes along transects (data are from Transect 1): Typical confined GAS groundwater (facies B), which has Cl/SO₄ ratios < 1 (in meq/L), seems to mix with an external, saltier groundwater with Cl/SO₄ ratio > 1 (both SO₄²⁻ and Cl contents are greater) and containing fluorine. The mixing of facies B groundwater with this external groundwater would originate facies C.

y de los contenidos en SO₄ y en F permite deducir las zonas donde los procesos principales parecen ser la recarga de aguas meteóricas con muy poco Cl y SO₄ pero con Cl >> SO₄ (facies A); otras zonas donde, además de la aparición de Na y la desaparición de Ca y Mg existe una pequeña pero sostenida incorporación de SO₄, Cl y F (facies B) y, finalmente, otras zonas donde hay una franca incorporación al agua de Cl, SO₄ y F (facies C). La hipótesis del origen de las aguas de facies C como resultado de la mezcla de aguas de facies B con otras externas al SAG, más salinas y en las cuales estaría la fuente del F, es apoyada por las evidencias que se explican en el pie de figura.

En el estudio generalizado, el análisis bivalente de concentraciones y de relaciones iónicas específicas para estudiar reacciones hidrogeoquímicas concretas a escala del conjunto del acuífero permitió apoyar o descartar la posible existencia de esas reacciones. A modo de ejemplo, la Fig. 5 ilustra el proceso de verificación de la posible contribución de la disolución de albita (feldespato sódico) y del intercambio catiónico al exceso de Na respecto a Cl en las aguas de facies B. La disolución de albita, si ocurre, no parece relevante en conjunto, aunque puede

serlo de forma localizada (Fig. 5A). En cambio el intercambio con Ca+Mg sí lo es, pues el exceso de Na equilibra razonablemente el déficit de Ca+Mg (aunque casi todo es Ca) respecto a la alcalinidad para muchas aguas (Fig. 5B, muestras ubicadas sobre o cerca de la línea de pendiente 1). Sin embargo, en algunas aguas (las situadas bajo la línea de pendiente 1) es necesario recurrir a una fuente de Ca adicional a los carbonatos para equilibrar el fuerte exceso de Na. La disolución de anortita, si ocurre, no parece contribuir de forma relevante al Ca (Fig. 5D), pero cuando se introduce el CaSO₄ como fuente hipotética de Ca el balance entre exceso de Na y déficit de Ca mejora mucho (Fig. 5C). Esto no significa necesariamente que en los sedimentos del SAG haya yesos, sino que posiblemente las aguas de facies B se han mezclado con otras más salinas que han estado en contacto con ese mineral. La mezcla de ambas daría lugar a las aguas de facies C.

Esta última hipótesis se ve apoyada por la Fig. 6. La Fig. 6A muestra la composición de aguas de formaciones infrayacentes al SAG en el sector N del acuífero, tomadas de Meng y Maynard (2001). Las aguas más salinas tienen una relación Cl/SO₄ > 1 (tipo C₃); las me-

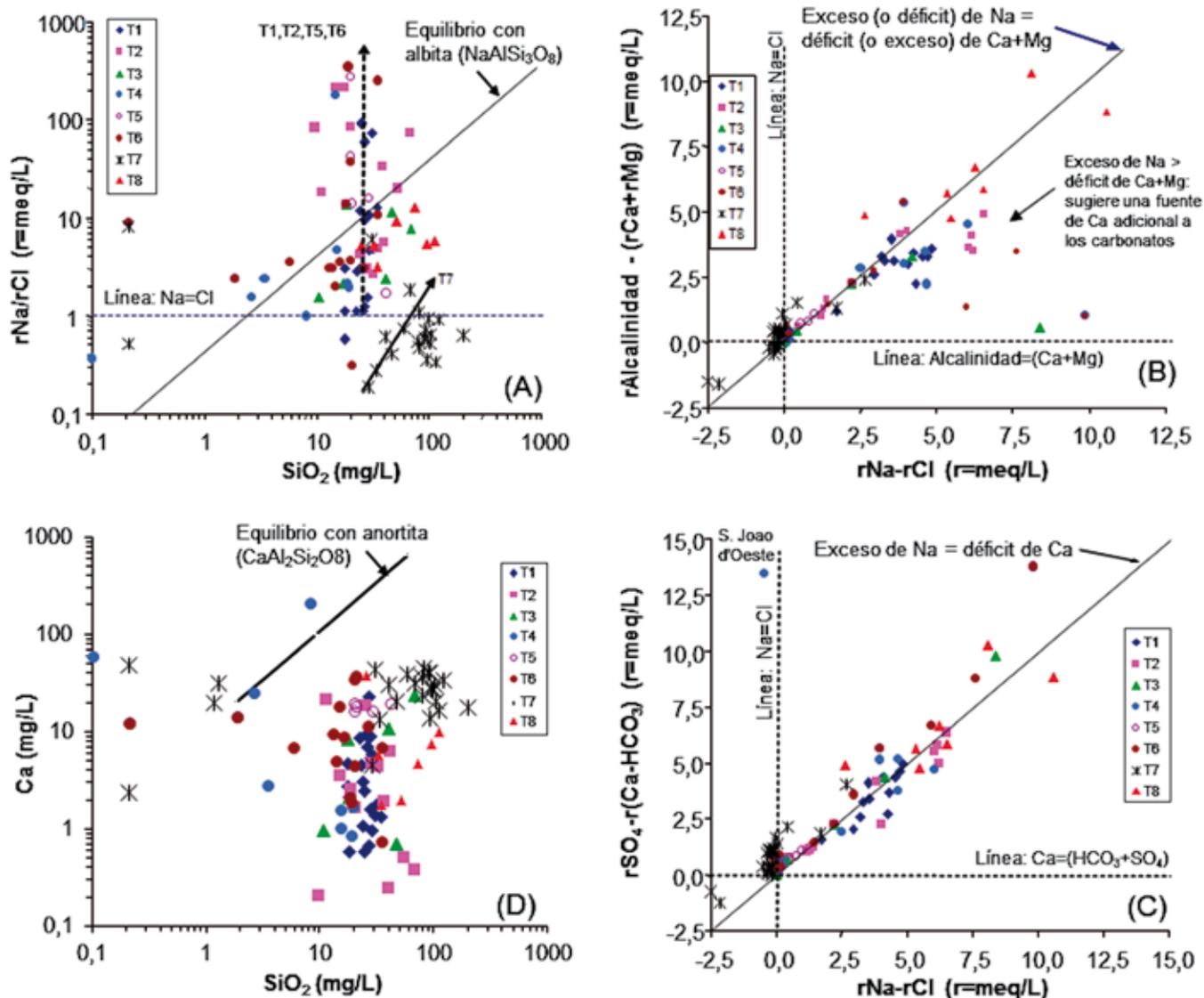


Figura 5. Ejemplo del tipo de análisis realizado para contrastar la existencia de los procesos hidrogeoquímicos deducidos en el estudio regionalizado por transectos. A: La disolución de albita, aunque exista, no parece ser una fuente relevante de Na. B: En la mayor parte de las muestras el exceso de Na respecto a Cl es de magnitud similar al déficit conjunto de Ca y Mg, lo que apoya el intercambio iónico como fuente principal de Na. C: En las muestras con mayor exceso de Na, el Ca disponible para el intercambio podría proceder tanto de disolución de carbonatos como de disolución de yesos. D: La disolución de anortita, aunque exista, no parece ser una fuente relevante de Ca.

Figure 5. Example of the type of analysis made to check the occurrence of the hydrogeochemical processes deduced from the study along transects: A: Albite dissolution does not seem to be a major source of Na; B: In most of the samples the magnitude of Na excess is similar to the magnitude of Ca+Mg deficit, which supports the hypothesis of cation exchange as being the main source of Na excess; C: Ca available for exchange with Na in samples showing the largest Na excess seems to come from two sources: carbonate dissolution and gypsum dissolution; D: Anorthite dissolution does not seem to be a major source of Ca.

nos salinas tienen $Cl/SO_4 < 1$ (tipo C_1) y las de salinidad intermedia, que parecen mezcla de los dos tipos anteriores, tienen $Cl/SO_4 \approx 1$ (tipo C_2). En la Fig. 6B se ve que las aguas más salinas del SAG estudiadas (facies C) tienden a tener una relación Cl/SO_4 cercana a 1. La Fig. 6C muestra que las aguas del SAG con mayores contenidos de F también son las que tienden a tener $Cl/SO_4 \sim 1$; en la Fig. 6D se ve que las aguas del SAG

con mayores contenidos de F tienden al equilibrio con fluorita, lo que podría indicar que este mineral es la fuente de F. El contenido de Ca está modificado, además, por intercambio iónico y disolución/precipitación de carbonatos (y quizás de sulfatos), lo que explicaría la posición de muchas muestras por encima y por debajo de la línea de equilibrio con fluorita, pero paralelas a la misma.

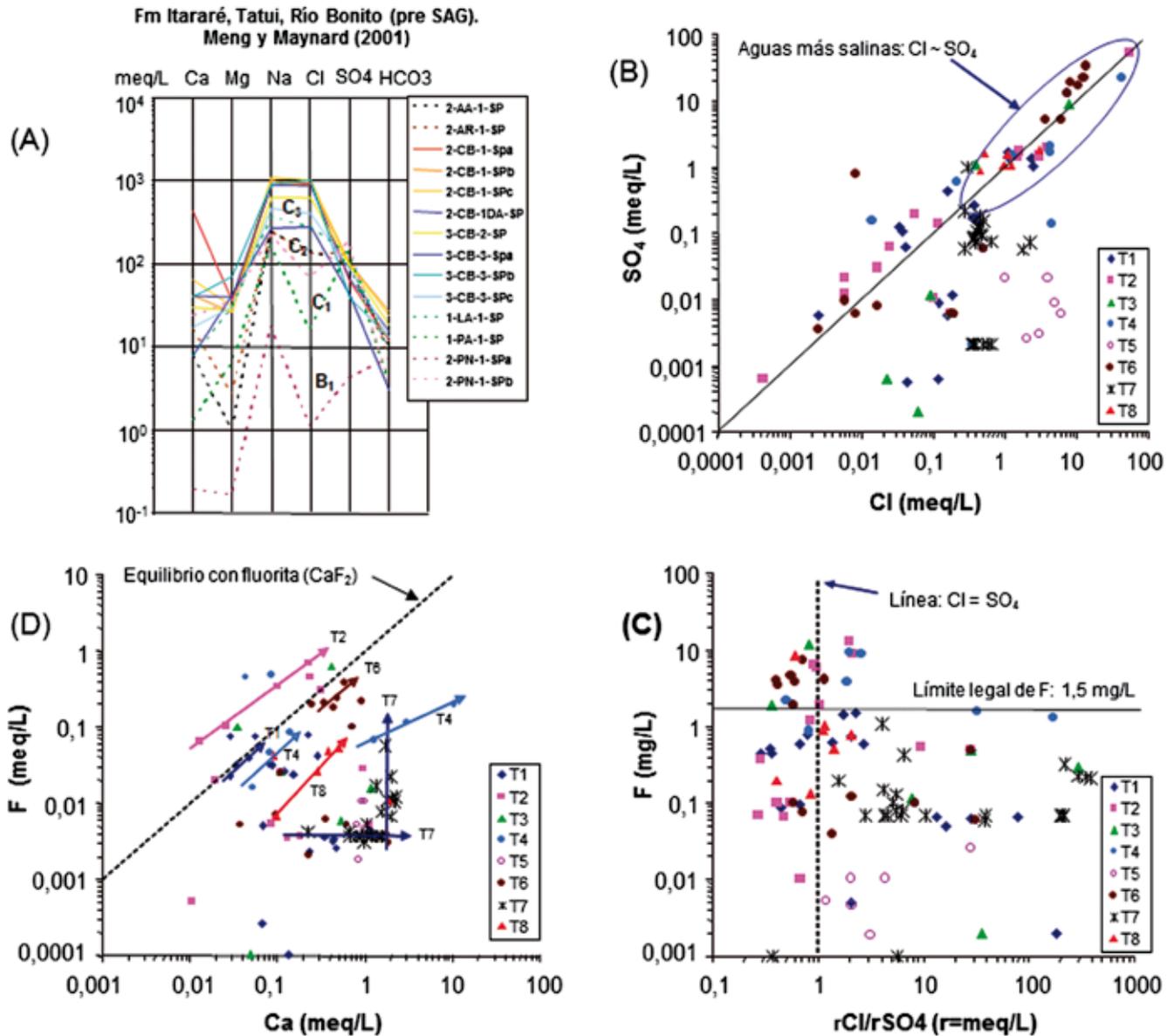


Figura 6. Contraste de la hipótesis de que las aguas más salinas estudiadas en el SAG pueden ser mezcla de las aguas típicas del SAG (aguas de tipo Na-HCO₃) con otras aguas, más salinas y de tipo Na-Cl o Na-SO₄, procedentes de formaciones infrayacentes al SAG. A: Aguas de formaciones pre-SAG e identificación de los tipos químicos B₁, C₁, C₂ y C₃, los cuales también se encuentran en las formaciones identificadas como SAG (elaboración propia con datos de Meng y Maynard, 2001). B: Las aguas más salinas encontradas en las formaciones del SAG tienen valores de la relación Cl/SO₄ ≈ 1. C: Los mayores contenidos de flúor están en aguas con valores de la relación Cl/SO₄ ≈ 1. D: La fluorita podría ser la fuente de flúor.

Figure 6. Testing the hypothesis that the saltier samples studied from the GAS are probably a mixture of typical GAS waters (Na-HCO₃ type) and saltier, Na-Cl or Na-SO₄ type water from formations underlying the GAS. A: Groundwater in pre-GAS formations showing the B₁, C₁, C₂ and C₃ chemical facies, which are also found in GAS waters (composed with data from Meng and Maynard, 2001); B: The saltier water samples from GAS formations have Cl/SO₄ ratio values ≈ 1; C: The highest fluoride contents are found in saltier GAS waters with Cl/SO₄ ratio values ≈ 1; D: Fluorite may be the source of fluorine.

Verificación del modelo hidrogeoquímico conceptual del fondo natural

El conjunto de procesos hidroquímicos propuestos como probables tras los estudios regionalizado y generalizado se ha verificado mediante modelación hi-

drogeoquímica. Para ello se han calculado balances de masa entre pozos de un mismo transecto que representan agua de facies distintas y se ha realizado modelación inversa de los balances considerando todas las posibles reacciones hidrogeoquímicas deducidas de los estudios regionalizado y general. Esta tarea se

Reactante	Composición	Soluciones posibles							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Cacita	CaCO ₃	-5,46E-03	<i>1,71E-03</i>	8,70E-04	8,32E-04	8,32E-04	<i>1,50E-03</i>	6,66E-04	0
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	3,06E-03	-5,22E-04	-1,02E-04	-8,26E-05	-8,26E-05	-4,17E-04	0	3,33E-04
Diópsido	CaMgSi ₂ O ₆	-3,14E-03	4,39E-04	1,92E-05	0	0	3,34E-04	-8,26E-04	-4,16E-04
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	3,16E-03	-4,20E-04	0	0	1,92E-05	-3,15E-04	1,02E-04	4,35E-04
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	5,37E-03	0	6,30E-04	6,68E-04	6,59E-04	1,58E-04	7,83E-04	<i>1,28E-03</i>
Intercambio NaX		0	<i>3,58E-03</i>	<i>3,16E-03</i>	<i>3,16E-03</i>	<i>3,14E-03</i>	<i>3,48E-03</i>	<i>3,06E-03</i>	<i>2,73E-03</i>
Intercambio CaX ₂		0	-1,79E-03	-1,58E-03	-1,58E-03	-1,57E-03	-1,74E-03	-1,53E-03	-1,36E-03

Tabla 1. Ejemplo de análisis de la contribución relativa al fondo natural del SAG de las distintas reacciones consideradas para explicarlo. Ver detalles en el texto.

Table 1. Analysis of the relative contribution to the GAS chemical baseline of the hydrogeochemical reactions assumed to occur in the aquifer. See the text for further details.

ha realizado en todos los transectos, razón por la cual se pueden generalizar las conclusiones principales.

En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de cómo se ha evaluado la importancia relativa de distintas reacciones. Cada columna corresponde a un modelo conceptual (conjunto de reacciones) ligeramente diferente que puede explicar las diferencias de composición entre un mismo par de aguas, una de tipo A (zona de recarga) y otra de tipo B (zona confinada). Aunque a efectos ilustrativos la identificación de las aguas no es relevante, las mismas corresponden a los pozos 3 (facies A) y 7 (facies B) del Transecto 1 (ver figuras 3 y 4).

Hay ocho modelos plausibles desde el punto de vista termodinámico. Las celdas con "0" indican que ese proceso no forma parte del modelo correspondiente a esa columna. Las cifras más pequeñas (en valor absoluto) indican una menor contribución de la reacción correspondiente al balance de masas de los componentes de cada fase reactante. Las cifras positivas indican disolución o desadsorción; las negativas indican precipitación o adsorción. Las cifras en negrita y cursiva señalan los procesos que más cantidad de masa transfieren dentro o fuera de la fase líquida, es decir los que realmente controlan los cambios de composición química del agua; el resto de procesos contribuye muy poco a los cambios de composición. El modelo 1 se descarta por no incluir el intercambio catiónico, proceso que se considera de segura ocurrencia.

Las principales contribuciones de la modelación hidrogeoquímica realizada son dos:

1. Ha permitido comprobar cuáles son las reacciones hidrogeoquímicas responsables del fondo químico natural del SAG y cuales, aunque puedan ocurrir, son irrelevantes. Los procesos sig-

nificativos son pocos (y son siempre los mismos en todos los transectos): disolución de CO₂ (en áreas de recarga), disolución o precipitación de carbonatos e intercambio iónico de Na adsorbido por Ca y Mg en solución. La disolución de albita, anortita, diópsido y quizá de otros silicatos no se puede descartar, pero si ocurre, su contribución a la composición química del agua es irrelevante.

2. Al tratar con agua muy poco mineralizadas los balances de masa entre aguas de tipo A y aguas de tipo B son muy pequeños, del orden de 10⁻⁵ a 10¹ mmol/L. Estos balances están, además, contruibidos por los errores de balance iónico, razón por la cual la robustez del modelo obtenido depende en buena medida de trabajar con análisis que tengan errores muy pequeños. Los resultados del presente estudio se consideran robustos, ya que por primera vez solo se han usado análisis con errores pequeños, habiéndose descartado análisis manejados en varias publicaciones anteriores pero que contaban con errores de hasta el 40%.

Resultados e incertidumbres remanentes

El estudio hidroquímico regional del SAG ha permitido contrastar, confirmar y completar el modelo conceptual propuesto por autores anteriores para los estados de Sao Paulo (Tonetto y Bonotto, 2005), Paraná (Da Rosa Filho *et al.*, 2005 y 2006) y Rio Grande do Sul (Gastmans, 2007) en cuanto a los principales procesos responsables del fondo químico natural del SAG. Esto se puede afirmar por dos motivos: 1) este es el primer trabajo de hidroquímica del SAG en el que se

han manejado exclusivamente análisis químicos con error de balance aceptable; 2) también es el primer trabajo que ha manejado una cantidad significativa de análisis (615) distribuidos por todo el sistema acuífero. Además, el estudio ha mostrado que ese modelo es válido para casi todo el acuífero, con algunas excepciones (que no se detallan aquí) para la zona situada al SO del Arco de Asunción-Río Grande.

El modelo conceptual hidrogeoquímico que se propone se sintetiza en la Fig. 7. En todo el acuífero las aguas tienen tres tipos básicos de facies químicas, cuyo origen parece tener una clara relación con la red de flujo:

- **Facies A:** aguas de tipo Ca-HCO₃ a Mg-HCO₃, muy poco mineralizadas (CE <250 μS/cm), con valores de pH entre 4 y 8, subsaturadas en calcita y sílice, con valores de la relación Na/Cl ≈ 1, valores de la relación Cl/SO₄ >> 1 y con contenidos de F < 0,01 mg/L. Se circunscriben a las zonas de afloramiento del SAG. La modelación hidrogeoquímica apoya

la hipótesis de que son resultado, principalmente, de la recarga de agua meteórica (más excedentes de riego), que disuelve CO₂ y carbonatos de Ca y Mg. Localmente se incorporan algunos contaminantes agrícolas (NO₃, K) y otros de origen desconocido, pero probablemente industrial (Cl, muy localmente). Por tanto, estas aguas son resultado de la interacción agua-roca en áreas de recarga, donde los flujos son predominantemente verticales descendentes.

- **Facies B:** aguas de tipo Na-HCO₃, con mineralización entre baja y media (CE = 200 a 600 μS/cm), valores de pH entre 7 y 10, valores de la relación Na/Cl >> 1, valores de la relación Cl/SO₄ cercanos a 1 (aunque a veces Cl > SO₄ y otras Cl < SO₄), contenidos de F < 2 mg/L, subsaturadas en calcita y saturadas o sobresaturadas en sílice. Se localizan en zonas de confinamiento medio, a veces muy cerca de las áreas de afloramiento. La modelación hidrogeoquímica apoya la hipótesis de que

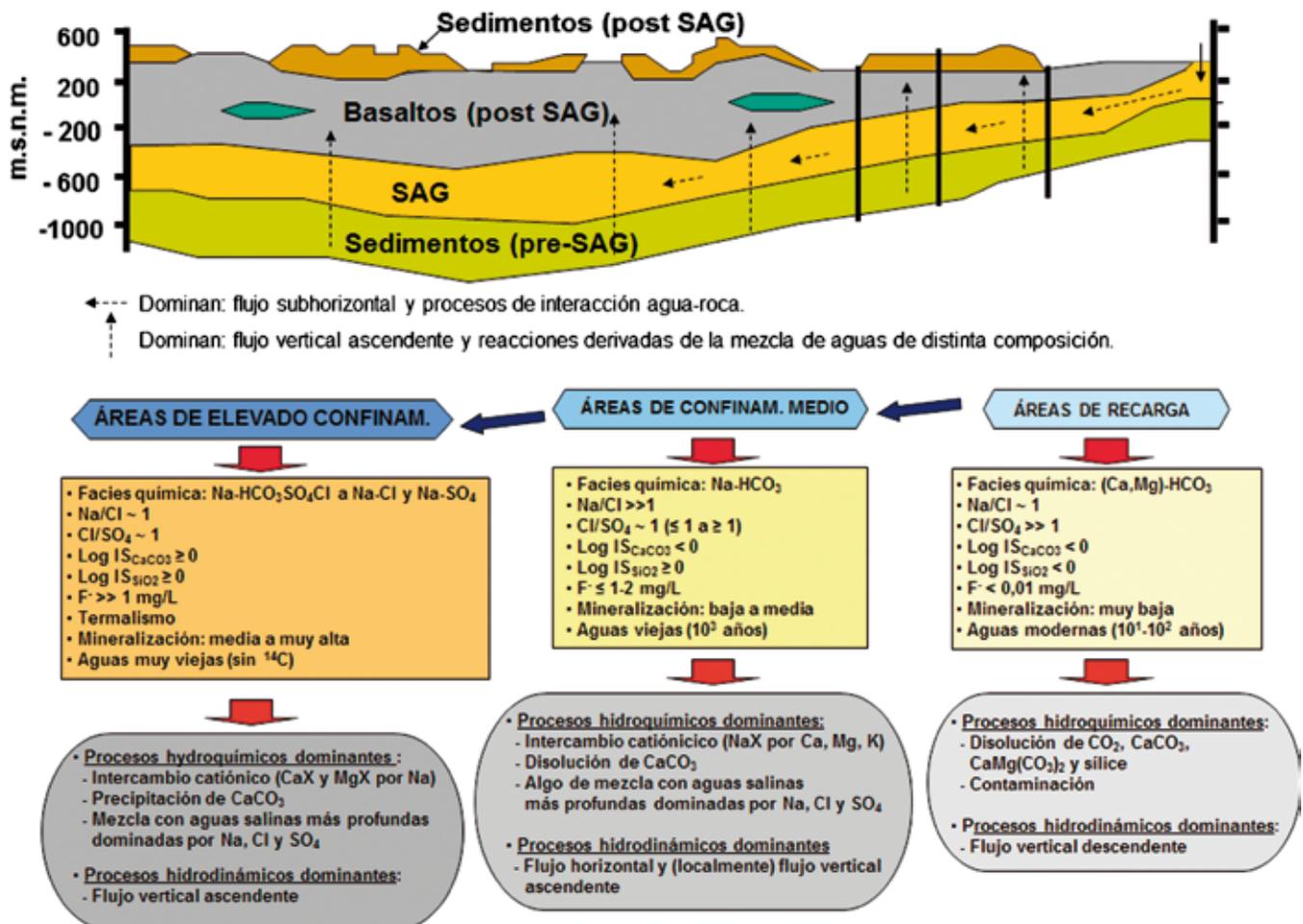


Figura 7. Modelo conceptual hidrogeoquímico del origen de la composición química de las aguas subterráneas del SAG.
Figure 7. Conceptual hydrogeochemical model of the origin of the GAS groundwater chemistry.

son resultado, principalmente, de la interacción de las aguas de tipo A con una matriz sólida donde no abundan los minerales reactivos (la mineralización total de las aguas aumenta muy poco). Las posiciones de intercambio de esa matriz están ocupadas mayoritariamente por Na, y como el agua tiene un largo tiempo de contacto con la misma, ha perdido Ca y Mg y ha ganado Na por intercambio. La desaparición de Ca y Mg del agua induce la disolución de carbonatos, lo que provoca un aumento de la alcalinidad en esas aguas. A pesar de ello, están ligeramente subsaturadas en calcita. No se puede descartar que ocurran otras posibles reacciones tales como disolución de albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) para explicar el exceso de Na, la disolución de anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) para explicar una contribución de Ca al agua, o el intercambio de Na con Mg (además de con Ca) y la disolución de dióxido ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), pero la modelación indica que su contribución a los balances de Na, Ca y Mg son irrelevantes frente a las otras reacciones mencionadas.

Por tanto, en las zonas donde se encuentran aguas de facies B dominarían la interacción agua-roca y los flujos laterales dentro del SAG. No obstante, las aguas de tipo B se distribuyen en dos subfacies: B_1 (Cl ligeramente $< \text{SO}_4$) y B_2 (Cl ligeramente $> \text{SO}_4$). Es frecuente observar alternancia de ambas a lo largo de los transectos sin que se observen patrones espaciales de ocurrencia, pero es posible que ello se deba a la heterogeneidad de profundidades de los pozos. Las aguas con $\text{SO}_4 > \text{Cl}$ requieren la existencia de una fuente de SO_4 que no está en las formaciones del SAG, lo cual sugiere la ocurrencia de cierta mezcla con aguas de las formaciones del pre-SAG, tal como se explica a continuación.

- **Facies C:** aguas de tipo Na- HCO_3 - SO_4 Cl a Na-Cl. Tienen mineralización entre media y alta (CE = 500 a 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), valores de pH entre 7 y 9, valores de la relación Na/Cl ≈ 1 , valores de la relación Cl/ SO_4 cercanos a 1 (aunque a veces Cl $> \text{SO}_4$ y otras Cl $< \text{SO}_4$), contenidos de F > 1 mg/L, están saturadas o sobresaturadas en calcita y en sílice. Se localizan en zonas confinadas del SAG situadas hacia el centro de la cuenca, lejos de las áreas de afloramiento.

Parecen ser resultado de la mezcla, en distintas proporciones, de aguas de tipo B con otras aguas más salinas y de procedencia profunda (basta algo menos del 5% de un agua similar a la marina para producir las aguas más salinas aquí encontradas). La información hidroquímica de formaciones infrayacentes al SAG es escasa, pero se

han encontrado algunos análisis que permiten apoyar esta hipótesis (ver Fig. 6A).

Un indicador claro de la presencia de estas aguas es la relación Cl/ SO_4 , que tiende a valer 1 (en meq/L) en las mismas. En todas las zonas donde se han muestreado aguas de facies C se observa que la mezcla hace aparecer siempre primero una subfacies C_1 , en la cual se observa que Cl ligeramente $< \text{SO}_4$, aunque el anión mayoritario sigue siendo el HCO_3 , y conforme aumenta la proporción de agua salina aparece una subfacies C_2 , en la cual se observa que Cl ligeramente $> \text{SO}_4$, con el HCO_3 aún como mayoritario.

En las aguas mezcla más salinas de todas las estudiadas el anión mayoritario es el Cl, con clara diferencia de concentración respecto al SO_4 , que es el segundo. A estas aguas se les ha denominado subfacies C_3 . Las aguas C_3 son las más salinas de todas las encontradas y aparecen hacia el centro de la cuenca en los estados de Sao Paulo, Santa Catarina o lo largo del río Paraná entre Paraguay, Argentina y Brasil. La proporción de agua salina en ellas es suficiente para modificar los equilibrios químicos y favorecer procesos de intercambio iónico de endureciendo (Ca y Mg adsorbidos se intercambian por Na en solución) y de precipitación de carbonatos en los lugares donde ocurren las mezclas, razón por la cual el HCO_3 no es dominante. La viabilidad termodinámica de estas reacciones se ha comprobado simulando la mezcla entre un agua de tipo B (una muestra concreta del Transecto 4) y una de las aguas más salinas de tipo C_3 de la Fig. 6A.

El inicio de la mezcla entre las aguas del SAG y estas otras aguas más salinas y profundas se identifica en las aguas de facies B mediante un pequeño aumento primero del SO_4 y luego del Cl. Por tanto, la existencia de las subfacies B_1 y B_2 es un indicador de ocurrencia de mezclas con flujos ascendentes del pre-SAG, aunque la proporción de agua profunda sea muy pequeña.

- La mayoría de las aguas situadas al SO del Arco de Asunción-Río Grande son también de los tipos A, B y C, pero en la zona urbana de Artigas-Quaraí aparece un nuevo tipo, la **facies D** (aguas CaCl y/o MgCl). Los procesos hidrogeoquímicos que dan origen a las facies A y B son los ya descritos. La salinidad de las aguas de facies C en esta zona se debe a mezcla de aguas del SAG de tipo B con aguas muy salinas residentes en las formaciones que ocupan la zona al O del río Uruguay, sean estas del SAG u otras adyacentes. Este aspecto es el menos estudiado en el trabajo realizado, ya que se trata de aguas muy salinas, con poco uso –aun-

que creciente– y ubicadas en la terminación del sistema acuífero. La facies D se atribuye a contaminación local, aunque habría que confirmarlo.

El estudio realizado no da respuesta a algunas dudas previas y da origen a otras nuevas. Algunos aspectos relevantes relativos al fondo natural aún no resueltos son:

- Determinar las posibles composiciones y edades de las aguas salinas del pre-SAG en todas las zonas del acuífero donde estas se están mezclando con aguas el SAG.
- Cuantificar los flujos ascendentes de aguas del pre-SAG y su papel en la red de flujo y en la calidad del agua a escalas local y regional. La existencia de procesos naturales de mezcla con aguas salinas se puede convertir en un serio problema si la explotación no se planifica para evitar los bombeos intensivos y concentrados. Esto puede inducir la salinización (por mezcla) de volúmenes de acuífero que actualmente tienen buena calidad para los usos locales.
- Confirmar que el origen del F es único (las aguas del pre-SAG).
- Establecer los procesos de contaminación en zonas de recarga urbanizadas y agrícolas. Esto debe ser la base para elaborar planes de manejo preventivos.

Principales conclusiones

Desde el punto de vista de la gestión las conclusiones más importantes de los resultados del estudio del fondo natural son las siguientes:

- La mayoría de las aguas del SAG estudiadas tienen una magnífica calidad para los usos humano y agrario. Tanto las bicarbonatadas cálcicas (áreas de afloramiento) como las bicarbonatadas sódicas (áreas confinadas adyacentes a las de afloramiento) tienen una mineralización muy pequeña, e incluso la mayoría de las de tipo clorurado-sulfatado-sódico (las de mayor tiempo de residencia en el acuífero) tienen una mineralización total moderada. La única excepción la constituyen las aguas salinas encontradas en el extremo SO del acuífero, ya en Argentina. La elevada salinidad y temperatura de las aguas atribuidas al SAG en esta zona las hace útiles, de momento, solo para usos industriales (incluyendo en ellos las instalaciones termales turísticas).
- Aunque hacia el centro de la cuenca las aguas aumentan de pH (entre 8 y 10) y de temperatura (>25 °C), en buena parte del territorio las características siguen siendo válidas para la mayoría de

los usos. No obstante, en bastantes lugares el aumento de pH, temperatura y salinidad va acompañado de la presencia de F en concentraciones >1 mg/L (concentraciones hasta 3 mg/L son frecuentes, y hasta 9-11 son raras). La presencia de F puede impedir el uso de esas aguas, aunque desde el punto de vista de la salinidad sean aceptables.

- La fuente de F y de salinidad está en las formaciones infrayacentes al SAG. Si bien los flujos ascendentes naturales parecen poco relevantes, y también el aporte de sales y de F a las formaciones del SAG, una explotación inadecuada podría incrementarlos e inducir la polución de volúmenes de acuífero que tienen agua de buena calidad.
- Aunque no se ha discutido en este trabajo, es importante manifestar aquí que la presencia de contaminantes derivados de la actividad humana (doméstica, agrícola y pecuaria) solo se ha observado en las zonas de afloramiento del SAG y en algunas localidades adyacentes donde los basaltos tienen poco espesor y están fracturados. En las zonas de acuífero confinado, incluso cerca de las de afloramiento, las aguas son prístinas. Esto se debe a que a poca distancia de las zonas de recarga las aguas son ya bastante antiguas.
- Desde el punto de vista del control hidroquímico y de la calidad del agua, el mayor esfuerzo debe estar en las zonas de recarga y enfocado a la contaminación antrópica. Para las zonas de acuífero confinado, puesto que no se han observado cambios significativos de composición a lo largo de los veinte años de los cuales se ha recopilado información, sería suficiente con realizar análisis de control con periodicidad anual o mayor. Esta información se puede complementar con la obtención de medidas automáticas de algún parámetro significativo, como es la conductividad eléctrica.
- En cualquier caso, el diseño de las redes de control debería servir tanto para completar el conocimiento aún no existente como para observar posibles cambios y tendencias no deseados en la cantidad y la calidad del agua del acuífero.

Referencias

- Aravena, R. 2008. *Estudio de la dinámica del agua subterránea en el Sistema Acuífero Guaraní (SAG) mediante técnicas isotópicas*. Informe realizado para el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní a través del consorcio de empresas Tahal Consulting Engineers, SEINCO S.R.L. Hidroestructuras S.A., Hidrocontrol S.A. e Hidroambiente S.A., 54 pp.

- BGR. 2007. *Proyecto SAG-PY: Uso sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la región Oriental del Paraguay, SEAM-BGR*. Informe no publicado. Asunción-Hannover.
- Bonotto, D.M. 2006. Hydro(radio)chemical relationships in the giant Guarani aquifer, Brazil. *Journal of Hydrology*, 323, 353-386.
- Bonotto, D.M., Mancini, L.H., da Silveira, E.G. y Tonetto, E.M. 1995. Isótopos de uranio como contaminantes naturales de acuíferos brasileiros. En: *IAEA-International Atomic Energy Agency. Isotope Hydrology Investigations in Latin America*. Viena: IAEA- International Atomic Energy Agency, 1995, (1), 75-90.
- Cresswell, R.G. y Bonotto, D.M. 2007. Some possible evolutionary scenarios suggested by ³⁶Cl measurements in Guarani aquifer groundwaters. *Applied Radiation and Isotopes*, 66, 1160-1174.
- Da Rosa Filho, E.F., Lima, A.V., Hindi, E.Ch. y Aravena, R. 2005. Caracterização hidroquímica do aquífero Guaraní na porção centro-norte do Estado do Paraná, Brasil. *Águas Subterrâneas*, 19(1), 87-94.
- Da Rosa Filho, E.F., Lima, A.V., Hindi, E.Ch. y Bittencourt, A. 2006. Estudo sobre os tipos das águas e as condicionantes estruturais do Sistema Aquífero Guaraní no extremo Oeste do Estado do Paraná. *Águas Subterrâneas*, 20 (2), 39-48.
- Da Silva, R.B.G. 1983. *Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo*. Tesis Doctoral, Universidade de São Paulo, Brasil.
- De Souza, A.A. 2004. *Caracterização da bacia do rio Iguaçú, a jusante do município de Reserva do Iguaçú, como área de descarga do aquífero Guaraní*. Tesis de Maestría. Universidade Federal de Paraná, Brasil. 85 pp.
- Foster, S., Hirata, R., Vidal, A., Schmidt, G. y Garduño, H., 2009. The Guarani Aquifer Initiative –Towards Realistic Groundwater Management in a Transboundary Context. *GW-Mate Sustainable Groundwater Management, Lessons for Practice, Case Profile Collection Num. 9*. Disponible en: http://siteresources.worldbank.org/INTWAT/Resources/GWMATE_English_CP_09.pdf.
- Gastmans, D. 2007. *Hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guaraní na porção ocidental da bacia sedimentar do Paraná*. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 238 pp.
- Gallo, G. y Sinelli, O. 1980. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas na região de Ribeirão Preto (SP), *Rev. Bras. Geoc.*, 10: 129-140.
- Gastmans, D. y Chang, H.K. 2005. Avaliação da hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guaraní (SAG) no Estado de Mato Grosso do Sul. *Águas Subterrâneas*, 19(1), 35-48.
- Invernizzi, A.L. y Barros de Oliveira, S.M. 2004. Hydrochemical characterization of a watershed through factor analysis. *Águas Subterrâneas*, 18, 67-77.
- Kittl, S.T. 2000. *Contributions to the knowledge on the stratigraphy and hydrochemistry of the giant Guaraní Aquifer System, South America*. Tesis de Maestría. Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, Germany. 90 pp.
- LEBAC. 2008. *Mapa Hidrogeológico do SAG*. Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní. Laboratório de Estudos de Bacias, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 47 pp + Anejos.
- Manzano, M. y Guimaraens, M. 2009a. *Hidroquímica regional del SAG. Estudio del origen de la composición química de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní*. Informe realizado para el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní a través del consorcio de empresas Tahal Consulting Engineers, SEINCO S.R.L. Hidroestructuras S.A., Hidrocontrol S.A. e Hidroambiente S.A. 223 pp.
- Manzano, M. y Guimaraens, M. 2009b. El origen del fondo químico natural del Sistema Acuífero Guaraní. 6° Congreso Argentino de Hidrogeología y 4° Seminario Internacional sobre Temas Actuales en Hidrología Subterránea. En: *Aportes de la Hidrogeología al conocimiento de los recursos hídricos*. E. Mariño y C. Schulz (eds.). ISBN: 978-987-1082-36-0. Tomo II, 661-670.
- Machado, J.L. 2005. *Compartmentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guaraní no Rio Grande do Sul*. Tesis Doctoral. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 237 pp.
- Meng, S.X. y Maynard, J.B. 2001. Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from the Botucatu aquifer in Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology* (250), 78-97.
- Oleaga, A. 2002. *Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector Uruguay*. Un enfoque integral. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de Méjico. 120 pp.
- Parkhurst, D.L. y Appelo, C.A.J. 1999. PHREEQC (Version 2) *A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 310 pp.
- Teissedre, J.M. y Barner, U. 1981. Comportamento geotérmico e geoquímico das águas do aquífero Botucatu na bacia do Paraná, *Revista Águas Subterrâneas* 4, 85-95.
- Tonetto, E.M. y Bonotto, D.M. 2005. Hydrochemical relationships in groundwater from central Sao Paulo State, Brazil. *Environ Geol* (47), 942-955.
- Silva Busso, A.A. 1999. *Contribución al Conocimiento de la Geología e Hidrogeología del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina*. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires, Argentina, 351 pp.
- Szikszay, M., Teissedre, J.M., Barrer, U. y Matsui, E. 1981. Geochemical and isotopic characteristics of springs and groundwater in the state of Sao Paulo, Brazil. *Journal of Hydrology*, 54, 23-32.

Recibido: diciembre 2012

Revisado: febrero 2012

Aceptado: febrero 2012

Publicado: julio 2012

