

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍCA DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ (SAG) EN LA REGIÓN ORIENTAL DEL PARAGUAY AL SUR DE LA LATITUD 25°30'

S. Farina¹; S. Vassolo¹; N. Cabral¹; S. Vera² & S. Jara³

Resumen - En este artículo se presentan los resultados obtenidos hasta el presente en el marco de un proyecto bilateral entre la Secretaría del Ambiente (SEAM) del Paraguay y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales alemán (BGR). Es un proyecto de investigación para ampliar los conocimientos sobre el comportamiento hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en el Paraguay. La zona de estudio elegida corresponde al **sur de la Latitud 25°30'** de la Región Oriental.

El Sistema Acuífero contiene aguas de diferente composición físico-química según la situación hidrogeológica presente. Las zonas en que las areniscas son aflorantes, o los basaltos actúan como acuífero, presentan aguas del tipo bicarbonatado-cálcico, con baja conductividad eléctrica de 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como ejemplo, muy similares al agua de lluvia. Cuando las areniscas están confinadas por basaltos densos y compactos, las aguas tienen contenidos más altos de sales, la conductividad eléctrica es mayor y son del tipo bicarbonatado-sódico. En las proximidades de Ciudad del Este las areniscas están confinadas por grandes espesores de basaltos y los pozos perforados allí presentan artesianismo de aguas termales con un alto contenido de sales, de SDT 2.675 mg/L del tipo sulfatado-sódico-clorado y altas concentraciones de flúor, un máximo de 11.1 mg/L. En una primera interpretación, el flujo subterráneo se daría hacia el río Paraná, presentando un tipo de agua bicarbonatada-cálcica-sódica-magnésica.

Abstract - This article summarizes the results of a bilateral project between the Environmental Secretary (SEAM) in Paraguay and the German Federal Institute of Geosciences and Natural Resources (BGR). This project is aimed to enhance the knowledge of the hydrogeological

¹ Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) – Proyecto SAG-PY – Madame Lynch 3500, Asunción, Paraguay – Telefax: +59521601572 – sagpy@telesurf.com.py

² Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos, Secretaría del Ambiente – Madame Lynch 3500, Asunción, Paraguay – Telefax: +59521615811 – vsofiapy@yahoo.com

³ Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental – Mariscal Estigarribia esq. Tacuarí – Telefax: +59521448408 – santjara@jahoo.com

behaviour of the Guaraní Aquifer System in Paraguay. The study area lies to the south of the Oriental Region in Paraguay.

The Aquifer System has waters of different physical and chemical composition, depending on the hydrogeological situation. The areas with sandstone-outcrops or where the basalts act as aquifers are characterized by waters of a bicarbonate-calcium type with low electrical conductivity, which are very similar to rain-water. When the sandstones are confined by layers of compact and dense basalts, the waters present higher salinity content, higher electrical conductivity and are of bicarbonate-sodium type. In the surroundings of Ciudad del Este, the sandstones are confined by very thick layers of basalt leading to artesian boreholes with thermal high salt content waters. These waters are of sulphate-sodium-chloride type and have also a very high content of fluoride. It is shown that the regional groundwater flow is in the direction of the Parana river, which receives water from the aquifer system under investigation in some transects.

Palabras-Clave - Sistema Acuífero Guaraní, Sistema Acuífero Guaraní en Paraguay, acuíferos en Paraguay, agua subterránea, modelo conceptual

INTRODUCCION

En la República del Paraguay, el agua subterránea juega un papel muy importante como fuente de abastecimiento humano, industrial y agrícola, sobre todo en las zonas rurales alejadas de cursos importante de agua superficial. Paraguay posee diversos acuíferos de mayor o menor importancia, pero el más representativo es el Sistema Acuífero Guaraní. Este acuífero está ubicado al este de la Región Oriental conformando una faja que se extiende de norte a sur a lo largo del Río Paraná que constituye el límite oriental del país. Se entiende como Sistema Acuífero Guaraní al paquete de rocas sedimentarias triásicas de la Formación Misiones (acuífero Misiones o acuífero Guaraní) y se le incorpora al estudio del SAG al grupo de rocas volcánicas cretácicas de la Formación Alto Paraná (acuífero Alto Paraná) suprayacentes al Acuífero Guaraní. A pesar de la importancia del Sistema Acuífero Guaraní para el abastecimiento de agua potable, las condiciones hidrogeológicas de este sistema, recarga, descarga, y dinámica del flujo eran hasta ahora casi desconocidas, haciendo prácticamente imposible determinar sus reservas y permitir una gestión racional del recurso. Con el fin de paliar esta situación adversa, la República del Paraguay, a través de la Secretaría del Ambiente (SEAM), específicamente su Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos (DGPCRH), se ha asociado con el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) para llevar a cabo un proyecto de investigación bilateral destinado a ampliar los conocimientos hidrogeológicos del área (SAG-PY). Este proyecto, que

comenzó en Mayo del 2003, tendrá una duración total de 3 años. La primera fase de trabajos, cuyos resultados sirven como base de este artículo, consistió en un relevamiento de datos bibliográficos e informaciones sobre pozos existentes en la zona, un censo de pozos en el campo y la toma de muestra de agua para efectuar análisis físico-químico completos, análisis de isótopos ambientales oxígeno-18 (^{18}O) y deuterio (^2H), así como determinación de la edad del agua a través de ^{14}C y ^{13}C . Los resultados de la isotopía aún no están disponibles.

En este trabajo se compilan y analizan la situación geográfica, geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica de la zona de estudio, que está ubicada al sur del paralelo $25^{\circ}30'$ en la Región Oriental del Paraguay (Figura 5), para converger en un primer modelo conceptual del funcionamiento del sistema acuífero del área de estudio. Este modelo conceptual explica el comportamiento del acuífero que se presenta como libre en algunas regiones y como confinado en otras. También indica la dirección de flujo regional en la zona de estudio. El modelo conceptual será la base para la ejecución de un modelo numérico pudiendo a ser usado como herramienta de gestión del recurso agua subterránea del Sistema Acuífero Guaraní.

GENERALIDADES

Clima y topografía de la región

El Paraguay tiene un clima húmedo mesotermal de gran variabilidad, con índices máximos de humedad en los departamentos de Alto Paraná, Itapúa y Canindeyú, todos ellos incluidos en la zona de estudio. La temperatura, por efectos de continentalidad, experimenta fuertes variaciones espaciales y temporales, siendo la media anual de 21°C . La mayor parte de las precipitaciones son de tipo convectivo producidas por tormentas aisladas o por líneas de turbonada que son frecuentes en primavera y otoño. Los valores más bajos aparecen en la parte más noroccidental del Chaco, en el límite con Bolivia, para aumentar hacia el sureste, alcanzando los valores más altos en los alrededores de Encarnación. En la zona de estudio la precipitación promedio oscila entre los 1.500 mm a más de 1.700 mm por año en Encarnación. La evapotranspiración real en la Región Oriental es menor que la precipitación alcanzando valores promedio de 1050 mm por año. Por lo tanto las precipitaciones satisfacen en gran medida la demanda de agua de la atmósfera durante gran parte del año. Esto genera un excedente importante que se traduce en escurrimiento superficiales perennes (DINAC, 1992).

En la Figura 1, se puede observar el relieve del área de estudio, cuya topografía muestra una meseta ondulada hacia el este, que corresponde a las zonas cubiertas por basaltos. La presencia de suelos lateríticos de buena calidad hace que estas zonas sean empleadas para la agricultura,

especialmente para la siembra de soja. Debido a los suelos de poca calidad que caracterizan a los afloramientos, estas zonas son destinadas principalmente a la ganadería vacuna.

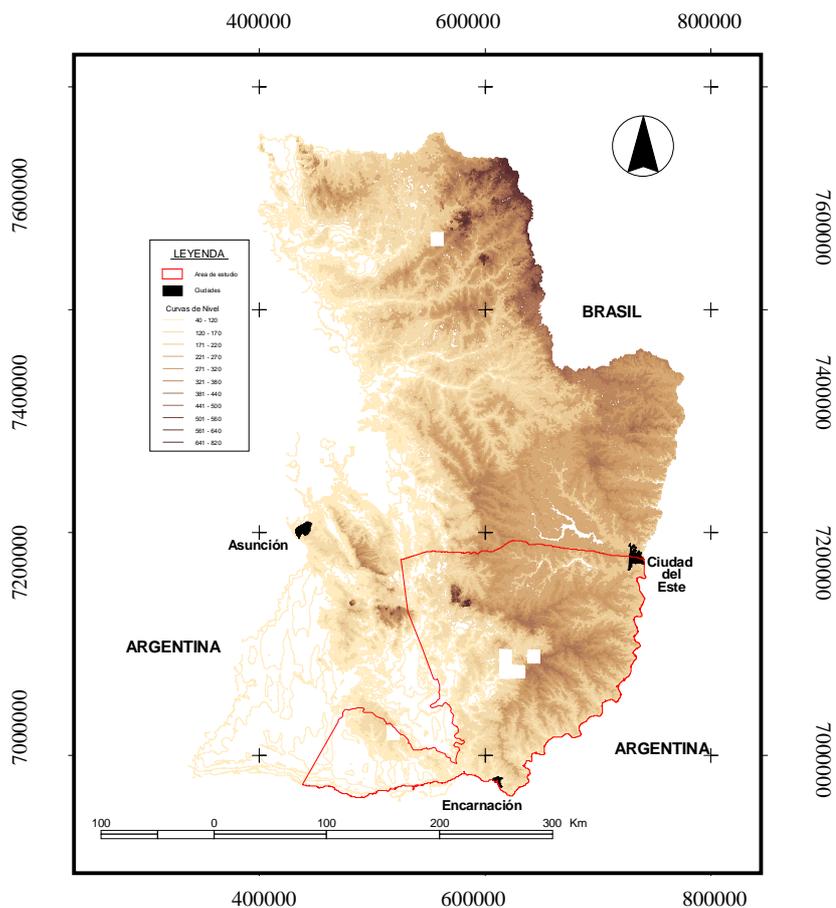


Figura 1 - Mapa base de la parte sur de la Región Oriental del Paraguay, obtenido a partir de las ortofotocartas 1:25.000, elaborado dentro del proyecto SAG-PY, 2004

Geología general

El área de estudio forma parte de una cuenca pericratónica (cuenca del Paraná) ubicada en el sudeste de América del Sur. La cuenca se extiende desde el sudoeste del Brasil a través de la porción oriental del Paraguay, el nordeste de Argentina y noroeste del Uruguay. Geológicamente está compuesta por rocas del basamento precámbrico superpuestas por rocas sedimentarias del Paleozoico inferior y medio (secuencia Gondwánica). Reúne también sedimentos del Paleozoico superior y lavas basálticas, aparte de diques o “sill” de diabasas de edad cretácica. Aparecen rocas alcalinas asociadas que pertenecen tanto al Jurásico superior, como al Cretácico inferior y al Cenozoico y se hallan predominantemente encajadas en rocas Paleozoicas (ORUÉ, 1996). En la Figura 2 se presenta el perfil del flanco oeste de la Cuenca del Paraná, producto de estudios sísmicos y perforaciones petrolíferas efectuadas por la TEXACO (KOVACS, 1990).

La cuenca está subdividida por lineamientos estructurales importantes que se presentan con direcciones preferenciales NW-SE y NE-SW.

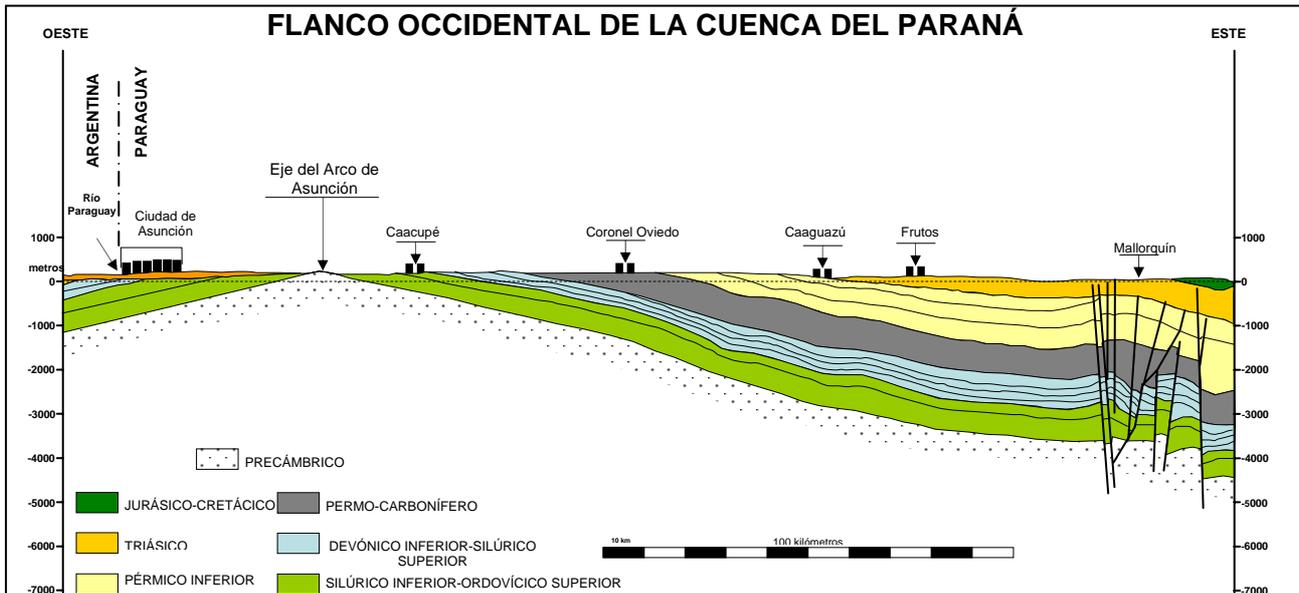


Figura 2 - Corte de la cuenca del Paraná en la Región Oriental del Paraguay
(modificado de KOVACS, 1990)

Formación Misiones

ORUÉ (1996), menciona que Harrington fue el primero en emplear el término Misiones para definir las areniscas que afloran en Bella Vista Norte y Capitán Bado, así como Coronel Bogado y Encarnación con una sección tipo descrita en la región de San Juan Bautista y Santa Rosa de las Misiones. En esta primera caracterización, las areniscas fueron registradas como de color rojo, granulometría media a gruesa formando gránulos bien redondos de cuarzo. La matriz está compuesta de arcilla hematítica localmente silicificada. Este autor adopta una edad Triásica al datar la unidad. Actualmente se considera que la Formación Misiones tiene una edad Triásica a Jurásica. La edad Triásica es fundamentada con los basaltos que ubican a la Formación Alto Paraná entre el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior (VELÁZQUEZ, 1992), siendo la contemporaneidad de estas dos formaciones aceptada sin restricción.

La Formación Misiones presenta dos facies de sedimentación, una de origen fluvial y otra predominantemente eólica. La facie fluvial se presenta en la parte basal, pero también pueden estar presentes sedimentos de facie eólica. Son areniscas macizas, localmente presentan estratificación cruzada, de granulometría fina a medio y capas finas de arcillas intercaladas. Existen también niveles conglomeráticos o brechas con clastos de arcillitas y pizarras. La parte eólica se caracteriza por presentar una bimodalidad en la granulometría en láminas de pocos milímetros y presentan

estratificación cruzada. Esta formación es transgresiva sobre todas las demás unidades sedimentarias de la cuenca del Paraná, inclusive sobre el basamento cristalino.



Figura 3 - Afloramiento de areniscas eólicas triásicas de la Formación Misiones.

Foto tomada en Trinidad, Departamento de Itapúa

Formación Alto Paraná

El proyecto PAR 83/005 (1986) data a los derrames basálticos como correspondientes al período Cretácico. En ese estudio se los describe como constituídos esencialmente por rocas toleíticas, con edades entre 127 a 108 millones de años (Ma) y se los relaciona con a un magmatismo del tipo “hot spot” que dio origen al planalto basáltico del Paraguay. Sin embargo, durante la construcción de represa de Itaipú se detectaron basaltos con espesores de 700 a 800 m evidentemente más antiguos ya que su datación a través del método radiométrico K/Ar indican edades de 132 ± 6 Ma. También existen dataciones de andesitas en la zona de Caaguazú que indican edades de 131 ± 6 Ma., datos extraídos de VELÁSQUEZ, (1992).

Perforaciones realizadas en Itaipú indican una sucesión de hasta 14 derrames basálticos del Alto Paraná de tipo toleítico y coloración gris rosado. Cada colada tiene un espesor del orden de 50 a 80 m, con máximos de 90 m y mínimos de 37 m. La sucesión normal muestra un basalto denso y afanítico en la parte inferior, basalto amigdaloides-vesicular con relleno de cuarzo y calcita en la parte media y un basalto brechoso en la parte superior, en la superficie de contacto con el basalto denso de la colada suprayacente.

Las areniscas de la Formación Misiones que ocasionalmente intercalan a estos basaltos (intertrap) son de origen eólico y en parte fluvial, rosadas, grano fino a medio, poco cementadas, a veces friables y con estratificación cruzada.

Contexto Hidrogeológico

Los trabajos de investigación en el área del SAG en el Paraguay son escasos. Pueden citarse algunas publicaciones relacionadas como ser: GONZÁLES ET AL., 1991; DE SALVO, 1991; GODOY, 1991; LARROZA ET AL., 2001; PASIG, 2002.

Acuífero Guarani

Este acuífero regional compartido por Argentina, Brasil y Uruguay, denominado antiguamente Acuífero Misiones (debido a que su ocurrencia es en las areniscas de la Formación Misiones), tiene en Paraguay un área aflorante de 39.000 km², hallándose confinado por los derrames basálticos de la Formación Alto Paraná (Acuífero Alto Paraná- Serra Geral en Brasil) hacia el este. El espesor del acuífero Guarani varía de 150 a 300 m. Se presenta como un acuífero poroso continuo de gran extensión regional, con características de acuífero libre en las áreas aflorantes y como confinado en las áreas subyacentes a coladas de basaltos. En GODOY (1991), se menciona que en el Brasil, tiene una transmisividad que varía entre 40 y 500 m²/d en áreas aflorantes (conductividad hidráulica entre 0.2 a 4.0 m/d) y entre 200 y 1.300 m²/d en áreas confinadas (conductividad hidráulica de 0.5 a 4.6 m/d). Las areniscas eólicas presentan una porosidad promedio de 17% mientras que las fluviales tienen una porosidad del 16%.

Las aguas del acuífero presentan mayores temperaturas a medida que aumenta la profundidad siguiendo aproximadamente el gradiente geotérmico natural (1°C/35 m) explicado en Silva Gouvêia (1983), donde se propone la siguiente relación entre la temperatura T y la profundidad P desde el techo del acuífero:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 0.0282 * P(\text{m}) + 22^{\circ}\text{C}$$

En el Paraguay las aguas contenidas en el acuífero de la Formación Misiones podrían presentar temperaturas de hasta 43°C. En el pozo surgente ubicado en Puerto Palma (Hernandarias-Dpto Alto Parana), 20 km aproximadamente al norte de Ciudad del Este, las aguas del pozo surgente que tiene 860 m de profundidad, presentan una temperatura en boca de pozo de 34°C luego de doce años de surgencia. En regiones de gran confinamiento, en las que la cobertura de basalto supera los 400 m, los pozos perforados en la arenisca presentan una gran surgencia que tiende a disminuir ligeramente con el correr del tiempo.

Acuífero Alto Paraná

Abarca unos 29.500 km² y forma una franja paralela al río Paraná de unos 50 km de ancho en promedio. Los basaltos son rocas cristalinas generalmente compactas por lo que prácticamente carecen de la posibilidad de almacenar agua, excepto cuando la roca se presenta como fracturada, en las brechas o en los basaltos vesiculares interconectados por diaclasas. La circulación del agua en la Formación Alto Paraná (acuífero Alto Paraná) está asociada con discontinuidades geológicas de las rocas, lo que le confiere características de medio anisotrópico y heterogéneo con conductividad hidráulica muy variable (ROSA FILHO ET AL, 2003). Los caudales específicos de los pozos

perforados en distintas áreas de alforamientos presentan una gran amplitud de valores que van de 0.004 m³/h/m a 32 m³/h/m, aumentando a medida que se avanza hacia el norte.

El acuífero Alto Paraná es muy vulnerable a la contaminación por sus características de acuífero fracturado. Existen fracturas en contacto con la superficie a través del suelo laterítico que constituyen un paso preferencial para agua de recarga y con ello de contaminación (Figura 4).

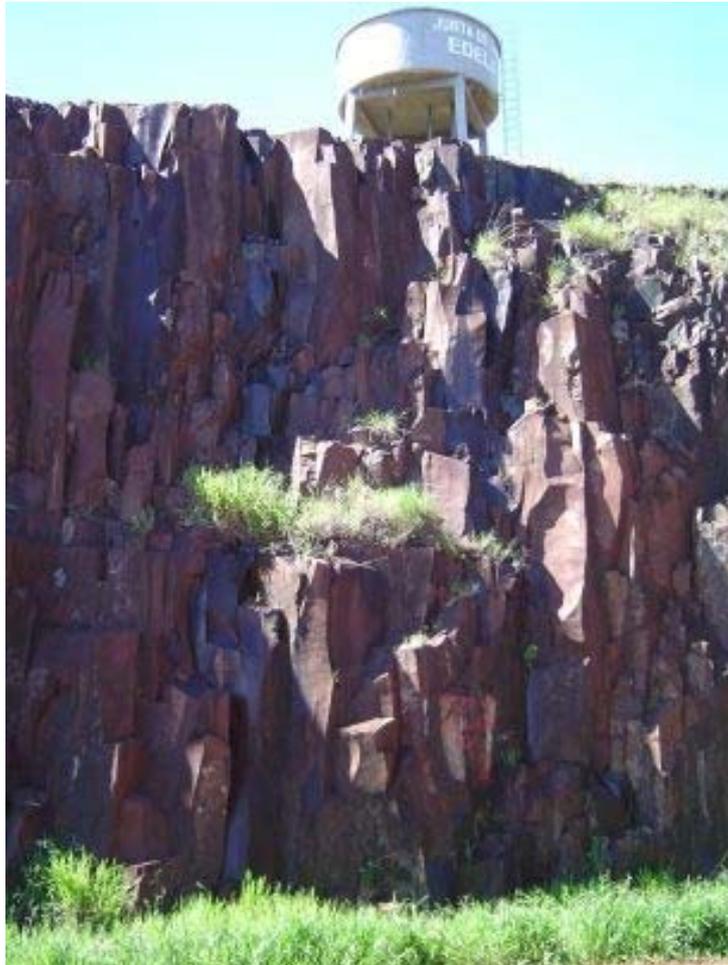


Figura 4 - Fracturamiento del basalto de la Formación Alto Paraná.

Foto tomada en la localidad Edelira, Departamento de Itapúa

El proyecto SAG-PY

Este proyecto bilateral, que lleva el nombre *Uso Sustentable del Acuífero Guaraní en el Paraguay (SAG-PY)*, tiene su enfoque principal en la zona del acuífero ubicada al sur de la latitud 25°30' y cubre los Departamentos de Canindeyú, Alto Paraná, Itapúa, Caaguazú, Caazapá, Guairá y Misiones (Figura 5) y (Figura 1).

Las fases del proyecto incluyen, en el primer año, la recopilación y evaluación de datos existentes, la mejora de la base de datos a través de toma de datos puntuales en el campo y la elaboración de un mapa base de la Región Oriental. En el segundo año se tiene pensado continuar

con la inclusión de datos en el mapa base, la elaboración de mapas temáticos, la elaboración del modelo numérico inicial con los consiguientes ajustes y correcciones al modelo conceptual. Finalmente, para el último año del proyecto se plantea la finalización y validación del modelo numérico en la zona de estudio. También se prevé una ampliación de ese modelo numérico para incluir datos de las zonas adyacentes provenientes del proyecto GEF en la región para terminar con la evaluación de ese modelo numérico general como herramienta de gestión.



Figura 5 - Ubicación del proyecto bilateral SAG-PY dentro de la República del Paraguay

METODOLOGÍA EMPLEADA

El presente estudio está basado en datos técnicos y perfiles de pozos perforados principalmente para abastecimiento humano en la región de estudio. Los datos fueron cedidos por empresas estatales, empresas privadas de perforación y consultores independientes. También se han

empleado los datos de los pozos que fueron utilizados para la elaboración del Mapa Hidrogeológico del Paraguay (1986).

Con el fin de mejorar la base de datos recolectada, se efectuaron campañas de campo en las cuáles se censaron y georeferenciaron 171 pozos (Figura 6). También se midió “in situ” la conductividad eléctrica, pH, temperatura y, en caso de ser posible, el nivel estático en pozos accesibles que estaban fuera de uso. Paralelamente se tomaron 59 muestras de aguas subterráneas en pozos preseleccionados (54) y superficiales (5) para efectuar análisis físico-químicos completos, siguiendo un protocolo del laboratorio de la BGR en Hanover, Alemania, dónde fueron analizadas. Todos los resultados obtenidos hasta el presente también forman parte de este artículo.

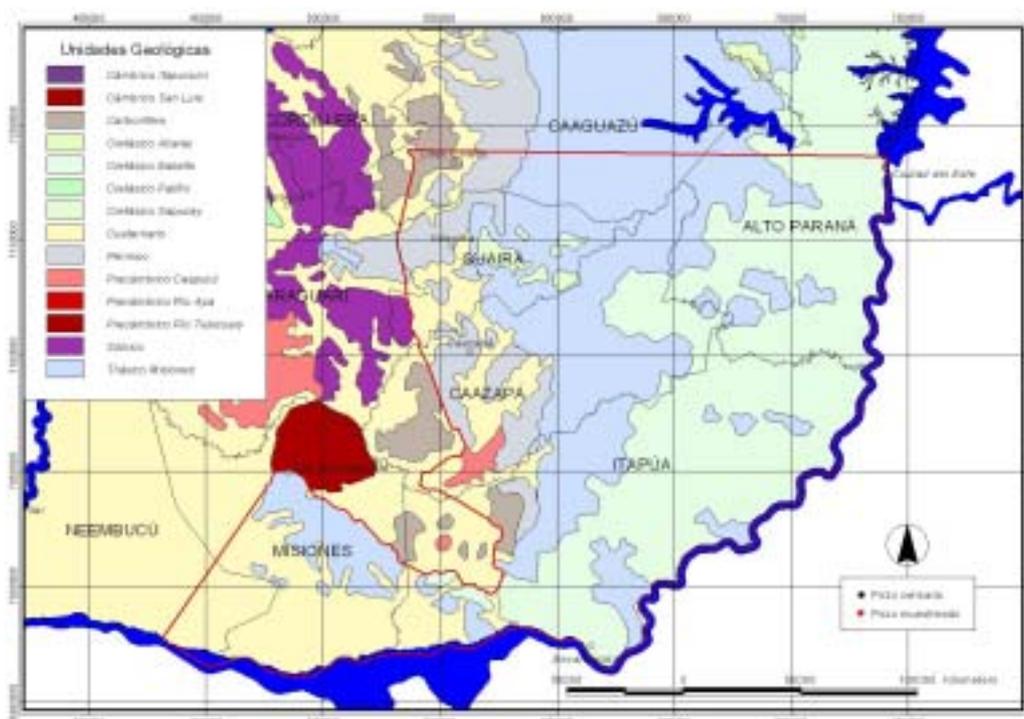


Figura 6 - Ubicación de los pozos censados y muestreados en el marco del proyecto SAG-PY

Se confeccionaron cortes hidrogeológicos del área de estudio en diferentes direcciones con el fin de interpretar la situación hidrogeológica; se ubicaron los pozos censados y muestreados en el mapa geológico utilizando ArcView (Figura 6) mientras que los resultados de los análisis de agua se graficaron en diagramas Piper (HEM, 1992) con el fin de clasificar las aguas subterráneas de las diferentes formaciones.

RESULTADOS OBTENIDOS

Hidrogeología

En el área de estudio se han identificado dos tipos de acuíferos, a) los libres, tanto en áreas aflorantes de la Formación Misiones como de la Formación Alto Paraná, y b) los confinados por potentes derrames basálticos.

Acuíferos libres en áreas aflorantes de la Formación Misiones: Esta situación se encuentra en distintas zonas del área de estudio, especialmente en el Departamento de Misiones y en la zona sur del Departamento de Itapúa. La Tabla 1 a continuación contiene los datos de los pozos censados en el Departamento de Misiones. Todos ellos corresponden al acuífero libre, como se ve en los niveles estáticos medidos.

La Tabla 1 muestra que la conductividad eléctrica de las aguas en el Departamento de Misiones que varía entre 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 427 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Seguro que estas areniscas aflorantes reciben una recarga directa de la precipitación, hecho indicado por las bajas conductividades eléctricas (menores a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y valores de pH entre 5 y 6.

El análisis de un test de bombeo efectuado en San Juan Bautista permite estimar una transmisividad en la zona en 27 m^2/d . Este pozo, que fue perforado hace 26 años, aún sigue en funcionamiento y se bombea con un caudal promedio de 30 a 40 m^3/h . El agua de este pozo tiene una conductividad eléctrica de 239 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un pH de 6.22 y presenta un cierto grado de contaminación humana ya que la concentración de nitrato es de 20 mg/L . A unos 100 metros de este pozo, en una zona de cota más baja (90 m), se encuentra otro pozo con las mismas características, pero surgente cuando se deja de bombear.

El nivel potenciométrico en la zona varía de una máxima de 170 m snm al este a unos 80 m snm hacia el oeste (Figura 7), lo que resulta en un flujo subterráneo con dirección noroeste-oeste-suroeste hacia los humedales del Departamento de Ñeembucú y hacia el río Paraná.

También en el Departamento de Itapúa (Figura 8), específicamente en los distritos de Santa María, Hohenau, Obligado, Jesús y Trinidad, se tiene afloramientos de areniscas dentro del planalto basáltico. Según los datos de un pozo ubicado en la localidad de Trinidad, la arenisca es cuarzosa, rosada a blanquecina, de granulometría fina a muy fina (Figura 3).

Tabla 1 - Datos de los pozos censados en el Departamento de Misiones

Localidad	X (m)	Y (m)	Z (m snm)	Profundidad (m bns)	N.E. (m bns)	C.E. (μ S/cm)	Uso
Santiago	523443	6998003	135	150	12	91	Abastecimiento
San Patricio	517082	7016899	150	112	8.3		Abastecimiento
Santa Rosa Misiones	514781	7026104	190	150	28		Abastecimiento
Santa Rosa Misiones	515192	7025884	171	150			Abastecimiento
San Gabriel	516431	7030866	182	132	25	427	Abastecimiento
Cerro Costa	517031	7030143	182			163	Abastecimiento
Cerro Costa	517022	7030139	202				Sin uso
Cerro Costa	519150	7027287	123	120		56	Abastecimiento
San Juan Bautista	485851	7050186	99		18		Sin uso
San Juan Bautista	484811	7049527	100	120	18.7	239	Abastecimiento
San Juan Bautista	484747	7049716	90	103	0.95	204	Abastecimiento
San Cristóbal	480056	7051473	144	120	42	35	Abastecimiento
San Ignacio de Loyola	496844	7026946	142				Abastecimiento
San Ignacio de Loyola	496727	7026154	160	150			Abastecimiento
San Ignacio de Loyola	495776	7026272	163			22	Abastecimiento
San Ignacio de Loyola	495780	7026279	148				Abastecimiento
San Ignacio de Loyola	496840	7025283	137			38	Abastecimiento
San Ignacio de Loyola	498127	7025741	141	91	15	25	Abastecimiento
San Ignacio de Loyola	497496	7024936	135	120			Abastecimiento
San Ignacio de Loyola	498336	7025508	133	150	*16	37	Abastecimiento
San Cristóbal	479924	7051420	123	114	42.2		Doméstico
San Cristóbal	481746	7050720	129				Doméstico
San Patricio	517126	7016158	165	8	6.76	187	Doméstico
Potrerito Ybate	516913	7014812	125	156	26	24	Abastecimiento
Yacarey/San Francisco	518962	7022206	170			36	Abastecimiento
Gabino Rojas	511456	7025457	175		25.5	39	Abastecimiento
Mburika Retá	490902	7045533	135			38	Abastecimiento
San Antonio de Sta. María	502733	7045067	145			30	Abastecimiento
San Antonio de Sta. Rosa	507963	7024870	171			28	Abastecimiento
San Ignacio de Loyola	498962	7025537	130	19	17.93	58	Abastecimiento
Abay	413505	7024621	152	*100	23.58		Sin uso
Abay	493421	7024699	153	26	24.17	76	Doméstico
San Ignacio de Loyola	498869	7026993	135			40	Abastecimiento
San Ignacio	482306	7027439	112			32	Abastecimiento
Cía. San Pablo	482916	7027497	113	20	19.12	143	Doméstico
Cía. San Pablo	482810	7027342	111	19	15.8	59	Doméstico
35 km ruta a Pilar	464673	7023534	71	20	15.65	254	Doméstico
San Juan Bautista	480167	7051463	134	17	15.37	47	Comunal
Santa María	507259	7037542	139	100			Abastecimiento
Santa María	505402	7037634	162	104		29	Abastecimiento
Itacuribí de Santa María	507242	7042392	143	150	16	29	Abastecimiento
Santiago	522085	6997788	104	150	43.97	33	Sin uso
Yacuty de Santiago	526360	7013362	155			25	Abastecimiento
Yabebyry	483600	6971460	34	57		104	Abastecimiento
Santa Rita	497706	7002095	28	96		109	Abastecimiento

Nota: m snm: metros sobre el nivel del mar

m bns: metros bajo el nivel del suelo

*: datos no medidos sino obtenido en forma oral



Figura 8 - Afloramiento de la Formación Misiones al sur del Departamento de Itapúa.

La Tabla 2 muestra que las conductividades eléctricas en la zona varían entre 89 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 242 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Si bien estas conductividades eléctricas son mayores que las medidas en el Departamento de Misiones, se considera que estas areniscas aflorantes también reciben recarga directa de precipitación, ya que los pH medidos son bajos (varían entre 5 y 6). Pero esta recarga es muy puntual (el área de afloramiento es reducida) y el agua subterránea de la zona muestra una mayor mineralización que en el Departamento de Misiones porque se trata de aguas mezcla (recarga más agua ya contenida en el acuífero).

El nivel potenciométrico en Hoenau (118 m) es prácticamente el mismo que en Trinidad (119 m) siendo mayor en Jesús (145 m). Esto indica que el agua subterránea en esta zona fluye en dirección NW-SE, hacia el río Paraná, en la Figura 8 se puede observar la ubicación de los mismos.

Una mención especial merecen las areniscas aflorantes en el Departamento de Caaguazú. Según datos del Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental (SENASA), existen allí pozos surgentes cuyas aguas tienen conductividades eléctricas menores de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y pH 7. Es decir que aquí se tendrían áreas de recarga próxima a los pozos mencionados, pero en las perforaciones el acuífero tiene un cierto grado de confinamiento por lo que actúa con surgencia. Por otro lado, en la localidad de Juan León Mallorquín, (Fig. 2) al este de Caaguazú, la arenisca está cubierta por un estrato de arcilla marrón-rojizo de unos 40 m de espesor seguida por una arenisca arcillosa parda marrón y arenisca pardo amarillenta a rojiza, que representa la zona de contacto con la Formación Alto Paraná. No obstante ello, el acuífero aquí es libre, el nivel estático está a los 61 m de

profundidad, el agua tiene una conductividad eléctrica de 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el caudal promedio extraído es de 26 m^3/h .

Acuíferos libres en la Formación Alto Paraná: Estos acuíferos predominan en toda la zona aflorante del basalto. Presentan caudales específicos promedio que varían entre 0.99 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ en la parte sur, en el Departamento de Itapúa, y 1.26 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ en la zona norte, en el Departamento de Alto Paraná, es decir que hay un mayor fracturamiento de los basaltos hacia el norte. No existe correlación entre los caudales específicos y las profundidades de los pozos. El pozo de FERTIPAR en el Departamento de Itapúa es una excepción digna de mencionar, ya que presenta un caudal específico de 32 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, probablemente debido a la existencia de una fractura abierta importante en ese lugar.

En general los pozos perforados en basalto cuentan con profundidades entre 70 m y 250 m. Una excepción es un pozo en Bella Vista, Departamento de Itapúa, que alcanza los 350 m de profundidad sin llegar a la arenisca.

Las conductividades eléctricas en estos acuíferos varían entre 25 y 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo existe un pozo de 230 m de profundidad en Ciudad del Este (Hotel Austria), cuya conductividad eléctrica es de 1.245 $\mu\text{S}/\text{cm}$, probablemente debido al aporte de agua del acuífero inferior, como se explica en la sección hidroquímica más adelante.

Podemos decir que el acuífero freático en los basaltos tienen característica de acuífero fracturado en el que la matriz rocosa es prácticamente impermeable. Su conductividad hidráulica es del tipo secundaria dada por las diaclasas, las fracturas y las discontinuidades litológicas. Ensayos de bombeo realizados en Itaipú con el fin de evaluar la conductividad hidráulica de las brechas y sus contactos dieron valores 43 m/d para las brecha ubicadas dentro de las coladas y de 3.500 m/d para las brechas ubicadas en el contacto entre coladas. Es decir que las mejores posibilidades hidrogeológicas de estos basaltos están en la zona de contacto entre los derrames, así como en las áreas con fracturamientos horizontales y verticales (Godoy, 1991; De Salvo, 1991).

Acuífero confinado por potentes derrames de basalto: El macizo rocoso basáltico en el Paraguay presenta un acuñaamiento hacia el oeste. Los espesores mayores se encuentran al borde del río Paraná, especialmente en los alrededores de Ciudad del Este donde las perforaciones profundas han detectado casi 800 m de basalto. Los pozos perforados en esta zona aledaña a Ciudad del Este presentan surgencia de aguas termales por lo que son usados con fines recreativos. Una excepción es el pozo recientemente perforado por Itaipú (abril del 2004) en Ciudad del Este destinado al abastecimiento humano. Este pozo presentó una surgencia inicial de 470 m^3/h que luego disminuyó

a 270 m³/h, manteniéndose constante hasta el momento de su entubación (con tubos de 5" hasta el techo de la arenisca). El entubado redujo el caudal de surgencia a un valor final de 190 m³/h.

Los pozos de Ciudad del Este; Puerto Palma ; Minga Guasú y Puerto Presidente Franco perforados a través del basalto hasta llegar a la arenisca son surgentes. Sus aguas tienen temperaturas entre 30 y 32.4°C, conductividad eléctrica mayor a 3.000 µS/cm y alto contenidos de sulfato y flúor. Uno de los pozos perforados en Minga Guasú presenta un espesor de 562 m de basalto seguido por 142 m de arenisca de la Formación Misiones y 168 m de areniscas de origen Pérmico, lo que comprueba la veracidad del corte efectuado por TEXACO (KOVACS, 1990) (Figura 3). Aparentemente las areniscas del Pérmico en esta zona no tienen un aporte importante de agua, ya que las características físico-químicas del agua de este pozo concuerda con la de los otros pozos aledaños que fueron perforados sin sobrepasar la arenisca del acuífero Misiones.

Existe otro pozo perforado hasta la arenisca Pérmica en Coronel Bogado, Departamento de Itapúa. Aquí se encontró un espesor de basalto de 348 m seguido por 157 m de areniscas del acuífero Misiones y otros 38 m de areniscas del Pérmico. En este caso la situación hidrogeológica es distinta a la del Departamento de Alto Paraná citado anteriormente. El acuífero, si bien confinado, no presenta artesianismo. El agua tiene una conductividad eléctrica de 540 µS/cm y carecen tanto de sulfatos como de flúor.

Hidrogeoquímica

Los resultados presentados en la Tabla 3 a continuación corresponden a 44 puntos muestreados en la zona de estudio (basaltos y areniscas).

Características generales

La temperatura del agua varía entre 21 y 34 °C, dependiendo de la profundidad de los mismos. El pH varía en el rango de 5 a 9. Los valores mayores a 8 fueron medidos en las proximidades de Ciudad del Este donde el acuífero Misiones confinado por potentes derrames de basalto, tantop en pozos perforados hasta la arenisca como en pozos que sólo tienen basalto. Es evidente que en esta zona el agua de los basaltos está siendo contaminada por el agua del acuífero subyacente debido a la mala construcción de los pozos (sin sellado en el basalto). El valor de sólidos totales disueltos (STD) se encuentra entre 14 mg/L en los acuíferos libres y 2.657 mg/L en los altamente confinados.

Clasificación de los tipos de agua encontrados

La Figura 9 muestra los resultados físico-químicos de las 44 muestras ya analizadas en el diagrama Piper (Hem, 1992). En este diagrama se pueden distinguir tres grupos bien diferenciados de aguas:

- a. El grupo (I) corresponde a aguas del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico. Los puntos allí ploteados pertenecen a pozos ubicados en los acuíferos libres, tanto de las areniscas como de los basaltos y coinciden con áreas de recarga.
- b. El grupo (II) corresponde a aguas del tipo bicarbonatado sódico. Los puntos ploteados en esta zona pertenecen a pozos perforados en los basaltos en zonas adyacentes al río Paraná. La mineralización podría ser el resultado de aporte de aguas de acuíferos subyacentes o debida a un mayor tiempo de residencia en el acuífero.
- c. El grupo (III) corresponde a aguas del tipo sulfatado sódico-clorurado. Estas aguas se encuentran en los alrededores de Ciudad del Este, Departamento de Alto Paraná, en pozos surgentes. FRAGA, 1992, propone que estos tipos de agua aparecen en concordancia con el eje que marca la zona más profunda del acuífero. Allí existiría una especie de divisoria de aguas, la velocidad de flujo sería muy próxima a cero y el agua subterráneas estarían sometidas a un cierto estancamiento por lo cuál estarían en condiciones de enriquecerse de minerales. Estas aguas también presentan altas concentraciones de flúor (4 mg/L a 11 mg/L). Pero en también hay un pozo perforado sólo en el basalto (Hotel Austria en Ciudad del Este con 230 m de profundidad) que presenta aguas sulfatadas sódico-cloruradas con alto contenido de flúor. Este es el efecto de contaminación por flujo vertical desde las aguas subyacentes.

La Figura 10 muestra la distribución de esta clasificación química basada en los resultados de 44 muestras para el área de estudio del proyecto SAG-PY

Cabe destacar que esta distribución es provisoria ya que aún falta completar el muestreo para cubrir toda el área de estudio en forma homogénea. La zona correspondiente a los afloramientos del acuífero Misiones en el Departamento del mismo nombre está caracterizada en su totalidad por aguas del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico. También aparecen aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas en una franja a lo largo del límite occidental de los derrames basálticos así como en la región correspondiente a los afloramientos de arenisca Misiones en Jesús, Trinidad y Hohenau (Figura 8). Esto indica que estas regiones reciben recarga directa por precipitación.

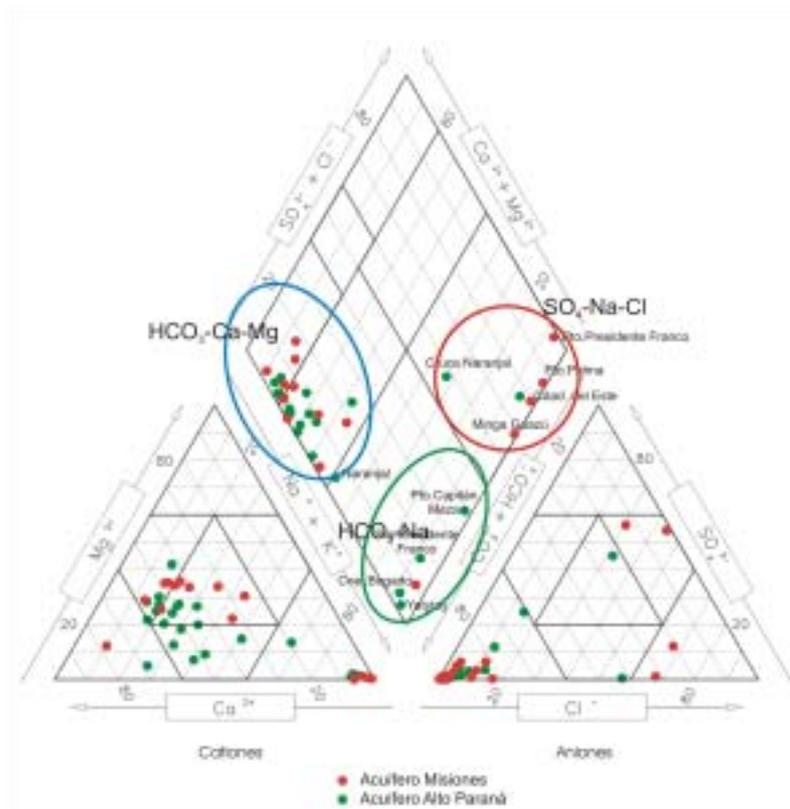


Figura 9 - Calsificación química de las aguas encontradas en la zona de estudio

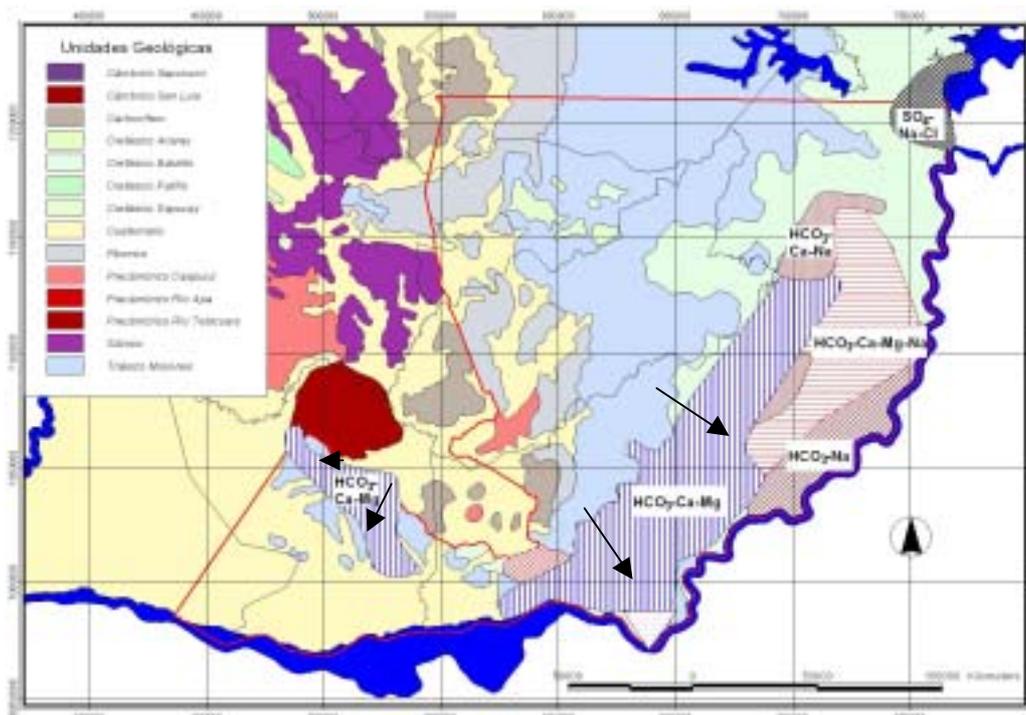


Figura 10 - Distribución de los tipos de agua que existen en la zona del proyecto SAG-PY, teniendo mayor mineralización hacia el río Paraná.

Tabla 3 - Ubicación y propiedades físico-químicas de los puntos muestreados hasta el presente en el proyecto SAG-PY

Localidad	X (m)	Y (m)	E.C. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SDT (mg/L)	pH	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	K (mg/L)	Na (mg/L)	Cl (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)
Estancia Chahã	464673	7023534	254	171	6,8	28,9	2,3	11,6	6,0	1,33	29,8	3,1	115	0,9
San Cristóbal	480054	7051480	35	14	5,2	27	0,3	0,4	1,1	0,65	2,12	0,03	4,1	5,4
Santiago	523443	6998003	91	68	6,1	23,7	5,0	3,7	0,0	2,27	7,33	1,6	44,8	1,2
Fram	597199	7002209	226	157	6,3	23,3	1,1	7,4	7,4	8,85	19,9	3,3	86,1	22,2
Alto Verá	622451	7040380	57	43	5,7	21,4	2,2	1,4	0,6	2,38	4,70	1,3	25,6	5,0
Puerto Cap. Meza	675119	7019929	578	356	9,1	26,4	0,3	115,7	26,8	0,38	2,02	61,7	111	0
Yatytay	690622	7048484	202	184	8	24,2	0,3	47,0	1,2	0,38	1,68	0,4	132	1,1
Río Paraná	674938	7019076	48	37	6,6	28,5	2,7	2,5	2,8	1,63	3,35	1,4	21,8	0,3
María Auxiliadora (manantial)	671674	7064544	31	162	5,7	21,6	0,5	0,8	0,5	1,59	2,65	0,2	12,8	5,6
María Auxiliadora-2	672928	7064225	211	25	6,8	23,8	0,7	13,8	1,6	4,53	20,9	0,9	110	9,2
Kress Burgo	696521	7087224	134	95	6,1	24,8	1,1	6,3	0,7	4,01	11,4	0,3	70,7	0,4
Mayor Otaño	728046	7083692	138	116	7,4		0,9	7,6	0,6	4,21	14,7	0,5	82,1	4,7
Cruce Naranjal	687806	7128552	51	27	5	25,8	0,5	5,7	7,8	0,65	1,52	0,1	7,5	2,5
Iruña	694625	7110472	130	108	6,6	22,5	1,3	4,7	0,7	4,96	14,2	0,3	78,2	2,6
Raúl Peña	672831	7105846	222	182	6,5	22,2	1,1	9,0	1,4	6,16	28,0	0,7	122	12,7
Naranjal	680929	7125475	185	152	6,2	22,8	1,6	21,2	2,4	3,39	12,9	0,9	96,0	12,8
Santa Rita-1	697100	7145453	250	198	6,9	27,3	1,2	24,0	10,5	2,82	24,5	14,6	116	3,2
Santa Rita-2	690580	7145170	234	196	7,5	26,8	1,3	18,9	3,7	5,95	22,2	5,3	135	2,6
Sta.Rosa del Monday	709792	7143141	229	199	7,4	23,6	0,5	17,2	0,3	3,80	27,9	0,9	148	0
Curupayty	702776	7140215	66	48	5,9	23,8	1,4	3,6	1,3	2,01	5,26	0,5	26,3	7,2
Pto. Pdte. Franco	740358	7171757	422	342	8	27,7	0,5	89,9	19,5	1,08	4,83	7,1	189	29,0
Minga Guazú	721000	7183152	3.340	2180	8,5	32	3,2	733	359	1,21	4,30	810	224	0,2
Pto. Pdte. Franco	740413	7171791	4.500	2675	8,5	25	1,7	882	630	0,13	51,6	1051	39	0,2
Ciudad del Este-1	739828	7175858	4.000	2657	8,3	30	3,6	885	445	3,43	9,72	1088	180	0,2
Ciudad del Este-2	739758	7176797	1.263	826	8,1	23,5	0,9	260	130	2,06	11,5	248	135	26,6
Puerto Palma	747960	7201436	3.340	2180	8,3	34,4	4,3	734	348	1,51	6,60	873	208	0,4

Localidad	X (m)	Y (m)	E.C. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SDT (mg/L)	pH	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	K (mg/L)	Na (mg/L)	Cl (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)
San Patricio	517161	7016131	33	19	5,4	22,6	2,3	0,6	0,05	0,80	1,1	0,11	12,5	0,67
Compañía San Gabriel	516431	7030866	427	368	7,5	21,6	3,9	8,4	3,13	6,90	71,6	1,23	271	1,18
Arroyo Tororo	516215	7033116	36	27	6,6	21,4	1,5	1,3	0,99	1,45	2,8	0,88	17,2	0,82
San Juan Bautista	484851	7049537	239	152	6,2	24,9	5,7	16,4	7,95	5,22	12,9	6,03	77	20,4
San Ignacio	498127	7025741	25	18	5,5	22,4	1,2	1,0	0,78	0,90	1,4	0,09	9,8	2,46
Edelira - Km 28	664722	7043063	178	142	7,2	22,0	0,9	9,8	1,20	5,88	17,4	0,40	96,9	9,36
Cruce km 16-Cap. Meza	664920	7032024	112	90	5,8	23,5	1,4	2,9	0,95	3,80	12,6	0,29	44,5	22,5
Pirapó - Centro	644284	7028578	188	152	6,6	22,7	1,4	7,7	0,82	6,38	21,0	1,05	108	5,28
Arroyo Pirapó	644203	7028547	50	37	6,6	22,1	1,7	1,2	0,70	1,79	4,7	0,95	20	5,80
San Cosme y Damián	565368	6978708	78	62	5,9	23,0	1,7	3,6	0,04	3,23	6,5	0,07	46,6	0,01
Bella Vista	641002	7008422	216	185	7,0	25,3	0,9	20,4	0,99	2,00	24,2	0,05	135	0,60
Hoenu-1	634327	7003590	134	110	6,5	22,3	1,5	5,6	0,76	5,72	12,4	0,92	78,9	2,78
Hoenu-2	633869	7003053	89	59	5,7	22,8	1,3	2,4	0,83	3,29	7,2	0,84	37,1	5,75
Jesús	623999	7006820	204	166	6,6	22,0	2,8	8,1	1,86	6,39	22,3	0,19	113	9,99
Kambyreta-Villa EBY	617345	6980507	217	181	6,7	25,0	1,8	9,1	1,37	6,96	25,6	0,60	135	0,15
Kambyreta-Centro	622537	6973246	175	144	6,3	22,4	0,9	9,7	1,62	4,60	20,6	0,13	104	1,88
Cnel. Bogado-Ofic. Adm.	576165	6995899	292	258	8,2	23,8	0,3	63,7	2,52	0,39	4,1	2,11	181	2,64
Cnel. Bogado-Aviación	576206	6994722	558	484	8,3	31,5	0,8	126	7,92	0,85	3,6	18,2	324	0,79

Aguas del tipo bicarbonatado sódico aparecen en el Departamento de Itapúa, en las proximidades del río Paraná. Ya que los pozos muestreados no son profundos (hasta 192 m), se concluye que estas aguas son el resultado de una larga permanencia del agua en el acuífero y no a un aporte de aguas subyacentes. Las zonas intermedias, entre la zona netamente de recarga y la zona de aguas bicarbonatadas sódicas, muestran una mezcla de estos dos tipos principales. Esto indicaría que el río Paraná constituye la zona de descarga del acuífero Misiones, por lo menos en ese transecto. Se tomó una muestra de agua de ese río a la altura de Puerto Capitán Meza (Figura 6) que resultó ser del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico-sódico. Con esto se confirma que, si se descarta la posibilidad de una contaminación con sodio del agua del río, éste recibe descarga del acuífero, ya que las aguas del acuífero en las márgenes del río tienen altos porcentajes de sodio.

Las zonas aledañas a Ciudad del Este muestran aguas del tipo sulfatado sódico-potásico. Se asume que estas aguas provienen de mayores profundidades y que el alto contenido de minerales es producto de la situación hidrogeológica particular de la zona. Aquí las areniscas de la Formación Misiones tienen su cota más profunda y el agua fluye con velocidad prácticamente nula, por lo que está en condiciones de mineralizarse (FRAGA, 1992).

Los ríos y manantiales muestran aguas del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico, lo que indica que la escorrentía es producida principalmente por agua de lluvia o por aporte de los acuíferos que reciben recarga directa.

CONCLUSIONES

Este artículo compila los resultados obtenidos luego de un año de trabajo de investigación en el marco de un proyecto bilateral (SAG-PY) entre el gobierno de la República del Paraguay, a través de la Secretaría del Ambiente, y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania. Las conclusiones de los datos aquí presentados pueden resumirse como:

- En el proyecto SAG-PY se denomina “*Sistema Acuífero Guaraní*” al conjunto compuesto por las areniscas de la Formación Misiones (acuífero Misiones o Guaraní) y por los basaltos de la Formación Alto Paraná. También se incluyen las areniscas que aparecen en algunas brechas separando los derrames basálticos (intertrapp).
- Las agua contenidas en el acuífero Misiones permiten delimitar las zonas de recarga dentro de las zonas aflorantes. Estas aguas son del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico y están caracterizadas por un bajo contenido de minerales, una baja conductividad eléctrica (alrededor de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y pH de 5 a 6, lo que las hace muy similares a las aguas de lluvia.
- La región aflorante del acuífero Misiones en el Departamento del mismo nombre tiene características de acuífero libre. Contiene aguas del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico que

fluyen en dirección noroeste-oeste-suroeste, hacia los humedales del Departamento de Ñeembucú y el río Paraná.

- La región aflorante del acuífero Misiones en los Distritos de Jesús, Trinidad y Hohenau al sur del Departamento de Itapúa también se comporta como libre y sus aguas, aunque tienen una mayor mineralización que en el Departamento de Misiones, son del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico. El flujo tiene una dirección WNW-ESE, hacia el río Paraná.
- La zona aflorante del acuífero Misiones en el Departamento de Caaguazú recibe recarga directa, indicada por las bajas conductividades eléctricas. Según los datos de SENASA esta zona del acuífero tiene un cierto confinamiento ya que hay varios pozos surgentes.
- Los basaltos de la Formación Alto Paraná conforman un acuífero fracturado (acuífero Alto Paraná) de características hidráulicas muy heterogéneas. La matriz es muy compacta y prácticamente incapaz de almacenar agua. Las mejores posibilidades hidrogeológicas están en la zona de contacto entre los derrames, así como en las áreas con fracturamientos horizontales y verticales.
- De acuerdo a los caudales específicos del Acuífero Alto Paraná, el fracturamiento aumenta del sur al norte.
- Las zonas del acuífero Misiones cubiertas por basaltos de la Formación Alto Paraná presentan grados de confinamiento que aumentan al ir hacia el NE de la zona de estudio, alcanzando su máxima expresión en las cercanías de Ciudad del Este. Aquí las coladas de basalto alcanzan los 800 m de espesor.
- Las aguas del acuífero Misiones confinado varían de un tipo bicarbonatado cálcico-magnésico al oeste a un tipo bicarbonatado sódico en la parte oriental, a la altura de Puerto Capitán Meza en el Departamento de Itapúa. Esta variación se debe al aumento del tiempo de residencia del agua en el acuífero.
- El agua del río Paraná a la altura de Puerto Capitán Meza es del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico-sódico. Dado que las aguas del acuífero en las márgenes del río tienen altos porcentajes de sodio se concluye que en esta zona el río Paraná es alimentado por el acuífero.
- Las aguas del acuífero Misiones confinado en las proximidades de Ciudad del Este presentan un tipo sulfatado sódico-clorurado. Aquí se supone el eje más profundo del acuífero que daría lugar a una divisoria de aguas en el que la velocidad de flujo es muy próxima a cero. Las aguas subterráneas están sometidas a un cierto estancamiento y tienen tiempo de mineralizarse. Estas aguas también presentan altas concentraciones de flúor.
- Los ríos y manantiales muestreados tienen aguas del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico, por lo que se concluye que la esorrentía es producida principalmente por agua de lluvia o por aporte de los acuíferos que reciben recarga directa.

LITERATURA

- [1] DE SALVO, O.E. – 1991 – Contribución al Conocimiento Hidrogeológico de las Rocas Basálticas de la Formación Alto Paraná. *1er. Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforaciones de Pozos en el Paraguay*. Pp 101-117.
- [2] DINAC – 1992 – Balance Hídrico Superficial del Paraguay – Programa Hidrológico Internacional (PHI) patrocinado por la Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe de la UNESCO. *Memoria Descriptiva de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil*.
- [3] FRAGA, C.G. – 1992 – Origem de Floureto em Águas Subterráneas dos Sistemas Aquíferos Botucatu y Serra Geral da Bacia do Paraná. *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, 178 pp.
- [4] GODOY, E.V. – 1991 – Acuíferos Potenciales del Paraguay. *1er. Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforaciones de Pozos en el Paraguay*. Pp 49-66.
- [5] GONZÁLES, P.; PFLUGFELDER, P.M.; BENÍTEZ, J.C. – 1991 – Algunas Consideraciones sobre Acuíferos de los Basaltos y Areniscas de la Cuenca del Paraná. *1er. Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforaciones de Pozos en el Paraguay*. Pp 119-130.
- [6] HEM., J.D. – 1992 – Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geol. Survey. Third Edition, fourth printing
- [7] KOVACS, J. S. – 1990 – Final Well Report TEXACO Mallorquín No. 1, Alto Paraná, Paraguay. *Informe interno*.
- [8] LARROZA, F.; FARIÑA, S.L.; PAREDES, J.L. – 2002 – Consideraciones Preliminares del Acuífero Guaraní en el Paraguay Oriental. *II Simposio Paraguayo de Geología y III Simposio Paraguayo de Agua Subterránea y Perforación de Pozos*. Asunción, Paraguay.
- [9] ORUÉ, D. – 1996 – Síntese da geología do Paraguai Oriental, com Ênfase para o Magmatismo Alcalino asociado. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, 163 pp.
- [10] PASIG, R.; ROJAS, C.; GEYH, M. – 2002 – Estudios hidrogeológicos e isotópicos en áreas marginales del Acuífero Guaraní, sobre el sector Paraguayo. Trabajo presentado en el Día del Agua en Asunción, Paraguay.
- [11] PROYECTO PAR 83/005 – 1986 – Mapa Hidrogeológico del Paraguay 1:1.000.000 – PNUD – CNDICh / MDN, mapa y texto explicativo inédito, Asunción, Paraguay.
- [12] ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E.; PIERES, S.; FONSECA, J. F.; BITTENCOURT, A.V.L – 2003 – Sistema aquífero Guaraní – Consideraciones Preliminares sobre a Influencia do arco de Ponta Grossa no Fluxo das Águas Subterráneas. *Rev. da Associação Bras. de Agua Subt.*, N° 17, pp. 91-111.

- [13] SILVA, R.B.G. – 1983 – Estudo Hidroquímico e Isotópico das Águas Subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, 133 pp.
- [14] VELÁSQUEZ, V.F. – 1992 – Provincia Alcalina Central, Paraguai Centro Oriental: Aspectos Tectônicos, Petrográficos e Geocronológicos. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, 119 pp.