



Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní

## Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la Región Oriental del Paraguay

Volumen 1      Proyecto SAG-PY  
Generalidades y resumen

Cooperación Técnica

**BGR** Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe  
GEOZENTRUM HANNOVER

República del Paraguay - República Federal de Alemania

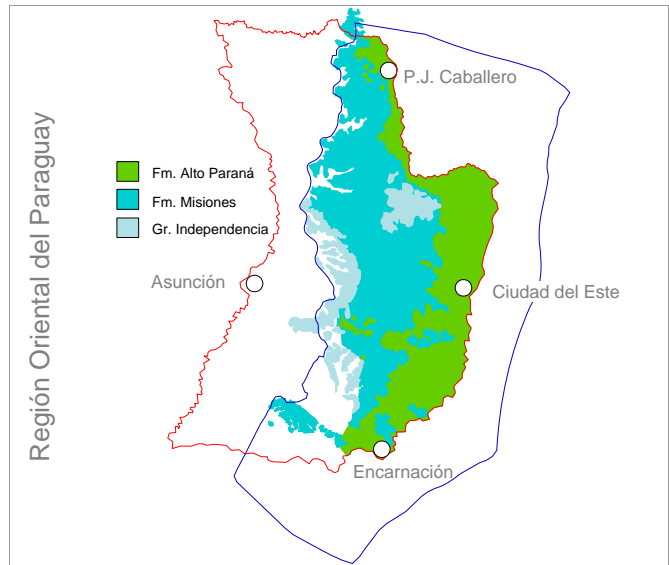
Secretaría del Ambiente SEAM Asunción

Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales BGR Hannover

SAG - PY



SAG - Sistema Acuífero Guaraní



Región Oriental del Paraguay

02/2003 – 02/2009 sagpy@telesurf.com.py www.sag-py.org

Secretaría del Ambiente - SEAM  
Dirección General de Protección y Conservación  
de los Recursos Hídricos

Av. Madame Lynch 3500 Asunción www.seam.gov.py

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - BGR  
Federal Institute for Geosciences and Natural Resources  
Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales

Stilleweg 2 D-30655 Hannover www.bgr.bund.de

BGR Tgb. - Nr. 10 692 / 07



Bundesministerium für  
wirtschaftliche Zusammenarbeit  
und Entwicklung

Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung - BMZ  
Federal Ministry for Economic Cooperation and Development  
Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo BMZ-PN 1994.2029.0



## Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la Región Oriental del Paraguay

Este resumen es el resultado interino de cuatro años de trabajo de Cooperación Técnica entre la Secretaría del Ambiente (SEAM) y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) que fue financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).

La extensión del proyecto está acoplada a la del “Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní” (SAG-GEF) del BM, GEF y OEA.

SAG-PY ha entregado sus resultados al proyecto SAG-GEF y trabajará apoyándolo y en común acuerdo con el mismo hasta el año 2009.

Todos los informes del Proyecto SAG-PY pueden obtenerse de la Cordinación Nacional en la Secretaría del Ambiente (SEAM) Asunción, así como de la Secretaría General del Proyecto del Sistema Acuífero Guaraní (SAG-GEF) Montevideo. Un resumen se encuentra también en la página web del proyecto: [www.sag-py.org](http://www.sag-py.org).

Volumen 1 :	Proyecto SAG-PY – Generalidades y resumen	Gerhard Schmidt
Volumen 2 :	Geología e Hidrogeología	Sandra Fariña
Volumen 3 :	Mapa digital	Néstor Cabral Antúnez
Volumen 4 :	Modelo de aguas subterráneas	Sara Vassolo
Anexo 1 :	Perfiles litológicos	SAG-PY
Anexo 2 :	Mapas	SAG-PY

### **VOLUMEN 1** Proyecto SAG-PY – GENERALIDADES y RESUMEN

Gerhard Schmidt

## INDICE

Nachhaltige Nutzung der grenzüberschreitende Grundwasservorkommen  
des Guaraní-Aquifer-Systems

Environmental Protection and Sustainable Development  
of the Guaraní Aquifer System

La Sistema Acuífero Guaraní	SAG	1
El Proyecto	SAG - GEF	2
El Proyecto	SAG - PY	3
Investigaciones previas		3
Recopilación de datos y censo de pozos		5
Hidrogeología		6
Dirección del flujo subterráneo		6
Química del agua subterránea		7
Isotopía del agua subterránea		9
Mapa digital		10
Modelo conceptual		11
Modelo numérico		12
Futuras actividades		15



## Nachhaltige Nutzung der grenzüberschreitenden Grundwasservorkommen des Guaraní-Aquifer-Systems

Das Guaraní-Aquifer-System belegt mit einer Fläche von fast 1,2 Millionen km<sup>2</sup> den Großteil des Paraná-Beckens und besteht aus Sandstein-Grundwasserleitern, die regional von Basalten überlagert sind. Mit einem geschätzten Volumen von über 25.000 km<sup>3</sup> birgt das Guaraní-Aquifer-System im weltweiten Vergleich eines der größten zusammenhängenden Vorkommen an frischem Grundwasser. Teilhaber an diesem Grundwassersystem sind die Mercosur-Staaten Argentinien, Brasilien, Paraguay und Uruguay.

Zurzeit wird der Guaraní-Aquifer nur in den Gebieten für die Trinkwasserversorgung genutzt, in denen das Grundwasser relativ nah zur Oberfläche erschlossen werden kann. Bereits jetzt ist dieses weitgehend ungeschützte Grundwasser in seiner Qualität durch menschliche Einflüsse bedroht. In Folge der schnellen Entwicklung urbaner Siedlungsräume und des ansteigenden Wasserbedarfs ist ein verstärkter Zugriff auf die länderübergreifende Grundwasserressource vorhersehbar. Deshalb sind eine gemeinsame Bewirtschaftung und der Schutz des Guaraní-Aquifers unter Beteiligung aller Anrainerstaaten notwendig, bevor sich größere negative Folgen durch unkontrollierte Nutzung einstellen.

Das Guaraní-Aquifer-System besitzt strategische Bedeutung für die zukünftige Wasserversorgung der Region. Aus diesem Grund hat die Global Environment Facility (GEF) ein Projekt initiiert, das die Schaffung der institutionellen und technischen Voraussetzungen für ein gemeinsames Management und eine angemessene, nachhaltige Nutzung der Grundwasser-vorkommen unterstützt.

Im Auftrage des BMZ unterstützt die BGR das GEF-Projekt in zweierlei Hinsicht:

- Der am GEF Projekt beteiligte Staat Paraguay wird durch Beratung, Technologie- und Know-how-Transfer bei der Erfüllung seiner technisch-wissenschaftlichen Projektverpflichtungen unterstützt. Dazu wird für den in Paraguay gelegenen Teil des Guaraní-Aquifer-Systems eine Methodik für das Grundwassermanagement - von der Konzeptentwicklung und Schaffung einer adäquaten Datenbasis über die geohydraulische Modellierung bis hin zur Strategieentwicklung - erarbeitet. Die Ausweitung des Pilotgebietes auf angrenzende Bereiche in Brasilien und Argentinien dient dem notwendigen Übertragbarkeitsnachweis.
- Die BGR berät das GEF Projekt bei der Entwicklung einer Projektstrategie sowie durch das Einbringen der wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse aus der Pilotstudie. Weiterhin arbeitet die BGR im fachlich-technischen Steuerungs-Komitee von GEF mit und unterstützt das grenzüberschreitende Management durch die Verbreitung von methodischen Kenntnissen und Know-how, beispielsweise über Workshops.

Das Projekt SAG-PY „Nachhaltige Nutzung der grenzüberschreitenden Grundwasservorkommen des Guaraní Aquifers“ wird vom BMZ als Teilmaßnahme des Sektorvorhabens „TZ mit Überregional, Systematische Abdeckung von Know-how-Defiziten auf dem Geo-Sektor“ finanziert und ist in die Aktivitäten von GEF eingebunden.

Das Projekt hat eine Laufzeit von 6 Jahren und wurde im Mai 2003 in Asunción begonnen, zeitgleich mit dem GEF-Gesamtprojekt. Partner in Asunción ist die DGPCRH (Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos) im Umweltministerium SEAM (Secretaría del Ambiente).

**Kontakt:** Gerhard Schmidt

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Stilleweg 2  
D-30655 Hannover

Phone: +49 511 643-2617  
Fax: +49 511 643-3663



## Environmental Protection and Sustainable Development of the Guaraní Aquifer System

Commissioned by: BMZ - Federal Ministry for Economic Cooperation and Development

Cooperation partner: Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos (DGPCRH) of SEAM (Secretaría del Ambiente)

Period: 2003 – 2009

The Guaraní-Aquifer is probably one of the largest groundwater reservoirs of the planet with estimated water resources of up to 25.000 km<sup>3</sup>. It covers an area of some 1.2 million km<sup>2</sup> and almost the complete Paraná basin.

The aquifer is located in the Centre-South of South America and lies underneath four countries: Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay. Growing industrialisation and urbanisation in the region lead to rapidly increasing groundwater extraction rates and also increasing contamination of the resource.

Sustainable groundwater management is therefore of urgent need to secure the resource for current and future generations. Its importance for the future water supply of that region led to the initiation of the multinational project "Environmental Protection and Sustainable Development of the Guaraní Aquifer System (SAG - Sistema Acuífero Guaraní)". It supports the four countries in jointly elaborating and implementing a common institutional and technical framework for managing the Guaraní Aquifer System.

OAS (Organisation of American States) is the executing agency acting on behalf of the four countries and is responsible to the World Bank and to GEF (Global Environment Facility) to assure that applicable rules and procedures are adhered to.

On behalf of the German Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) supports the SAG-PY-Project through

- assisting Paraguay to meet the requirements resulting from the SAG-PY-Project in the fields of hydrogeology and groundwater resources evaluation and prognosis and
- direct advice to the SAG-GEF-Project e.g. in the formulation of recommendations concerning the groundwater management of the complete aquifer system.

The basis of resource management is knowledge about the resource. Information about the extension of the groundwater aquifer, its water quality and the prognosis for future development is the starting point for exchange and discussion between the riparian states. Therefore the project developed maps and models for parts of the aquifer systems in Paraguay.

These results are brought into the discussion with all four countries through the Coordinating Council and the Project Steering Committee to arrive at a common view of information needed and the water situation in the region as a basis for the technical framework for management.

**Contact:** Gerhard Schmidt

Federal Institute for Geosciences and Natural Resources

Stilleweg 2  
D-30655 Hannover

Phone: +49 511 643-2617  
Fax: +49 511 643-3663

## La Sistema Acuífero Guaraní SAG

El acuífero Guaraní es quizás el reservorio subterráneo transfronterizo de agua dulce más grande del planeta. Se extiende desde la cuenca sedimentaria del Paraná a la cuenca Chaco-Paranaense. Está localizado en el centro-este de América del Sur, entre 12° y 35° de latitud sur y 47° y 65° de longitud oeste. Subyace cuatro países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay.

El nombre Guaraní fue adoptado para unificar las distintas nomenclaturas utilizadas en los países para identificar la misma formación: Tacuarembó en Argentina, Piramboia/Botucatu en Brasil, Misiones en Paraguay y Buena Vista/Tacuarembó en Uruguay. El acuífero está compuesto por areniscas del triásico/jurásico de deposición fluvial lacustrina en la parte inferior y eólica en la superior. Está hidráulicamente conectado a otros acuíferos como las areniscas del pérmico por debajo y los basaltos jurásicos por encima.

Tiene una extensión aproximada de 1,2 millones de km<sup>2</sup>, de los cuales 840.000 km<sup>2</sup> se encuentran en Brasil, 225.500 km<sup>2</sup> en el territorio Argentino, 71.700 km<sup>2</sup> en Paraguay y 58.000 km<sup>2</sup> en Uruguay. Se estima que las reservas permanentes del acuífero son del orden de los 25.000 km<sup>3</sup>.

Uno de los problemas existentes es el riesgo de deterioro del acuífero debido al aumento de los volúmenes explotados y al crecimiento de las fuentes de contaminación tanto puntuales como difusas. Esa situación exige un gerenciamiento adecuado sobre las condiciones de aprovechamiento de los recursos del acuífero por parte de las esferas de gobierno central, departamental y municipal.



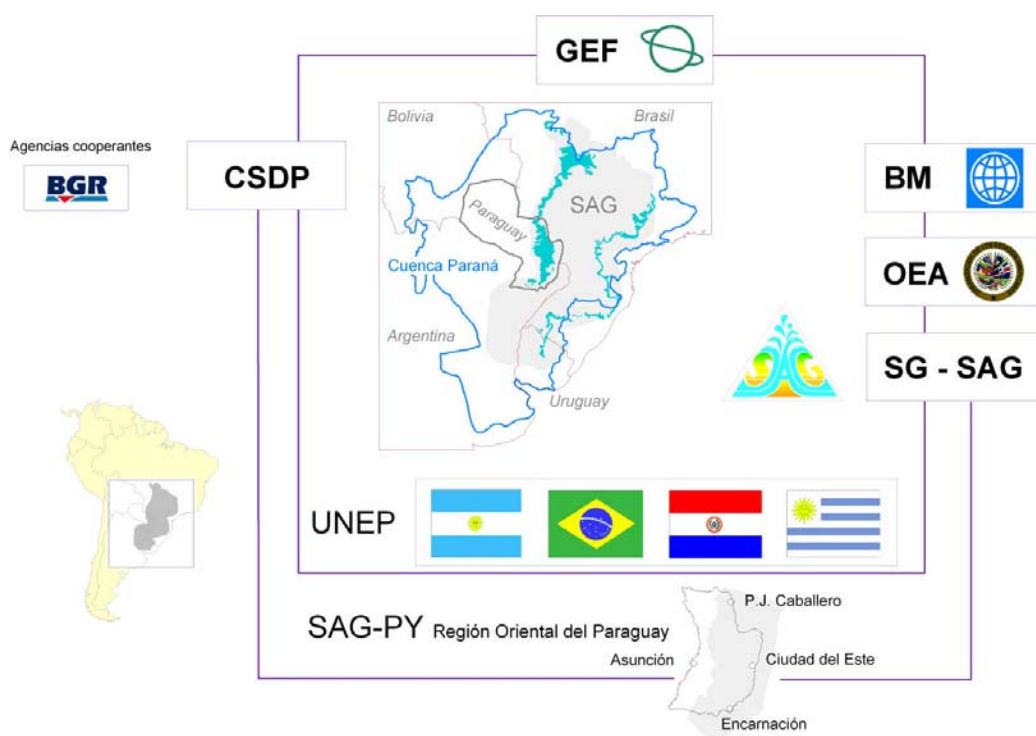
Ubicación del acuífero Guaraní

## El Proyecto SAG - GEF

La finalidad del “Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Acuífero Guaraní” es apoyar a los cuatro países en la elaboración e implementación de un marco común institucional, legal y técnico para manejar y preservar el SAG para las generaciones actuales y futuras.

La OEA, en calidad de Agencia Ejecutora, actúa en representación de los cuatro países y es responsable frente al Banco Mundial (la Agencia Implementadora) y al GEF (Global Environment Facility - Agencia del Medioambiente) en el cumplimiento de las medidas y procedimientos aplicables.

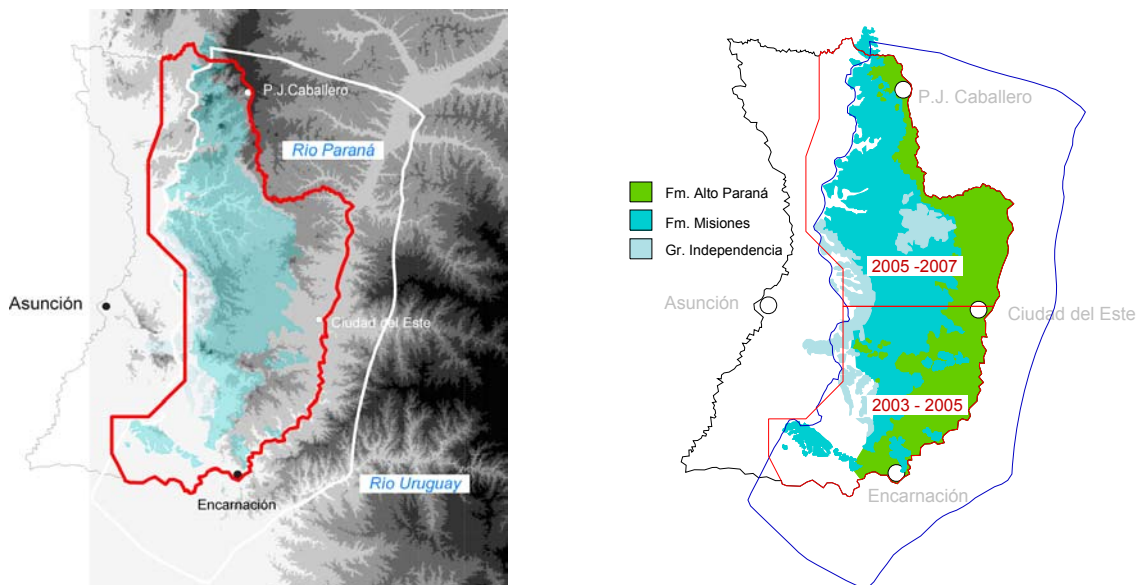
Todas las actividades están dirigidas por el Consejo Superior de Dirección del Proyecto (CSDP), mientras que los aspectos técnicos son responsabilidad del Consejo Coordinador (CC). Las actividades diarias son coordinadas por la Secretaría General bajo la dirección de la OEA y bajo control del CC. Las actividades dentro de cada país están coordinadas por las respectivas Unidades Nacionales de Ejecución del Proyecto (UNEP).



Dentro de las siete componentes previstas por el SAG-GEF, la componente (v) se encarga del desarrollo de medidas para la gestión de las aguas subterráneas y para la mitigación de daños, de acuerdo con las características de la región, en áreas críticas (“hot spots”) que incluyen Itapúa, Ribeirão Preto, Rivera-Santana y Concordia-Salto.



## El Proyecto SAG-PY



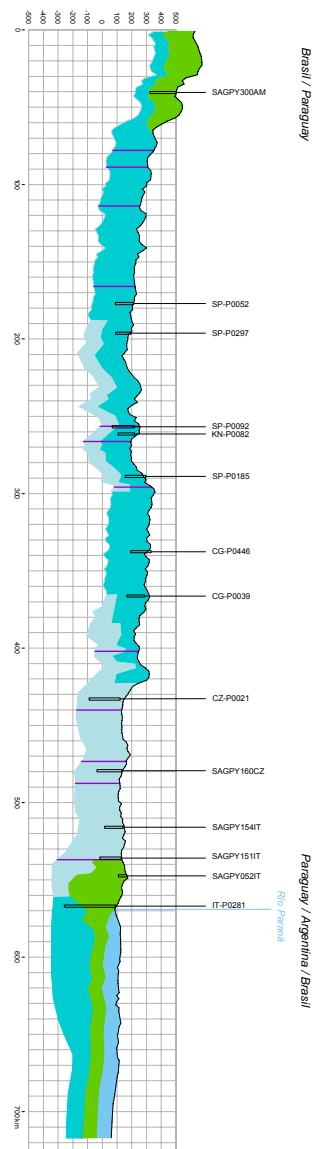
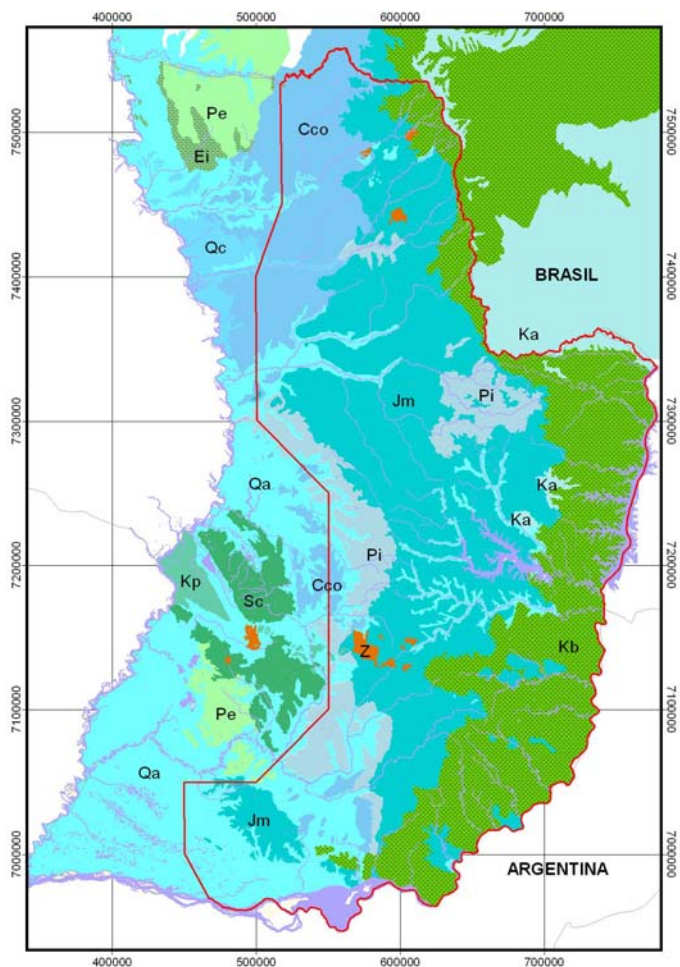
La zona de investigación del proyecto SAG-PY corresponde a la zonas de afloramiento de las areniscas pérmicas, las areniscas del Guaraní, el basalto y depósitos cuaternarios.

Con el fin de ahondar el conocimiento del acuífero Guaraní, mejorar la base de datos existente hasta ese momento y establecer una herramienta para el manejo del acuífero con la mayor rapidez posible, la Dirección General para la Conservación y Protección de los Recursos Hídricos (DGPCRH) de la Secretaría del Ambiente (SEAM) en Paraguay se asoció con el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) de Alemania. Así nació el proyecto bilateral SAG-PY, que se desarrolló de Mayo del 2003 a Abril del 2007 y cuyos resultados se describen en esta publicación.

## Investigaciones previas

Para cumplir las finalidades del proyecto, fue necesario ejecutar previamente las siguientes actividades:

- Recopilación de datos existentes (principalmente ubicación de pozos perforados en el acuífero con el correspondiente perfil litológico) de organizaciones estatales como SENASA y ERSSAN, así como de Itaipú y empresas privadas. La finalidad de esta tarea era el análisis de la geología e hidrogeología de la región.
- Censo de pozos en el campo para chequear la base de datos existente, evaluar la instalación de los pozos y decidir sobre cuáles deberían ser muestreados. Esta tarea no estaba prevista inicialmente, por lo que puede considerarse como adicional al proyecto inicial.
- Muestreo de pozos profundos, pozos someros y aguas superficiales distribuidos homogéneamente en la zona de estudio para hacer análisis químicos completos y tróceres metálicos con el fin de caracterizar las aguas de los acuíferos.
- Muestreo de pozos profundos para análisis de isótopos ambientales y carbono-14 para determinar la posición de la recarga, el origen del agua de recarga y la edad del agua subterránea.



Corte esquemático producido con descripciones litológicas de pozos y geometría del modelo.

ACUIFEROS GRANULARES	
	Kp: areniscas friables fina a media, generalmente con intercalación de arcillas y conglomerados. Acuífero de extensión restringida
	Jm: areniscas eólicas, fluviales en menor proporción. Acuífero regional
	Sc: cuarcitas y areniscas claras masivas de estratificación cruzada. Acuífero local
	Qa: arena, limo, arcilla, algo de grava y orgánicas. Acuífero regional
	Qc: conglomerado de arena, limo, arcilla, algo de grava. Acuífero regional
	Pi: alternancia de areniscas y siltitas. Acuífero local
	Cco: sedimentos de origen glacial, silita, lutita, areniscas. Acuífero local
	Ka: areniscas continentales finas. Acuífero local
ACUIFEROS FRACTURADOS	
	Kb: derrames basálticos y areniscas intercaladas. Acuífero local
	Ei: caliza, margas y lutitas. Acuífero local
	Pe: granitos, esquistos, cuarcitas. Acuífero local
NO ACUIFERO	
	Z: rocas intrusivas. Consideradas no acuífero
ACUIFEROS	
Qa: aluvión; Qc: conglomerado aluvial; Ka: Acaray; Kb: basalto; Kp: Patiño; Jm: Misiones; Pi: Independencia; Cco: Coronel Oviedo; Sc: Caacupé; Ei: Itapucumi; Pe: Escudo precámbrico	
ERAS Y PERIODOS GEOLOGICOS	
Q: Cuaternario; T: Terciario; K: Cretácico; J: Jurásico; P: Pérmico; C: Carbonífero; S: Silúrico; E: Cámbrico; Pe: Precámbrico;	

Mapa hidrogeológico

La línea roja indica la ubicación de la zona de estudio del proyecto SAG-PY.

El acuífero Guaraní en el Paraguay corresponde a las areniscas de la Formación Misiones (Jm).

## Recopilación de datos y censo de pozos

El proyecto se inició con una recopilación de datos existentes provenientes de organizaciones nacionales y privadas. Para mejorar esta base de datos, se llevó a cabo un censo de pozos.

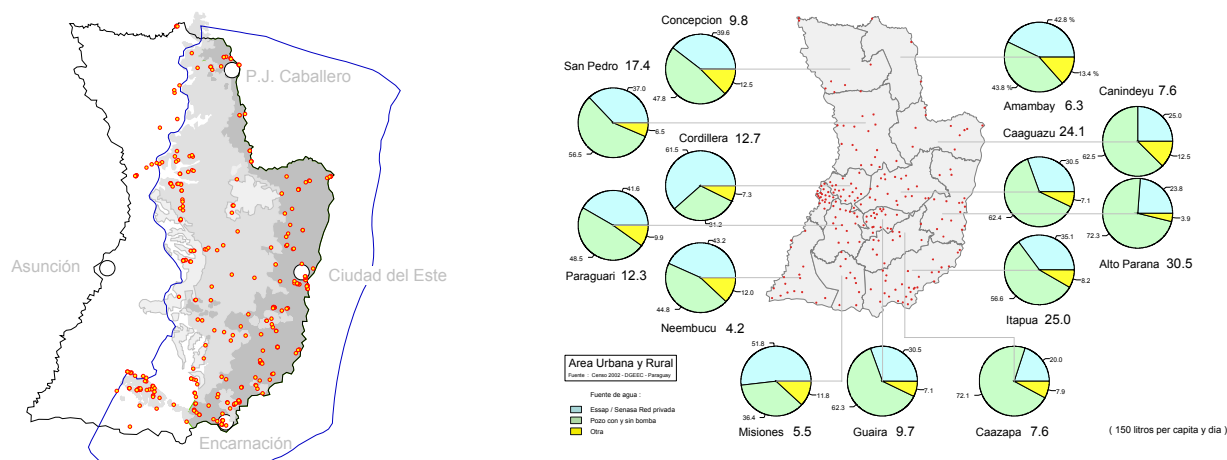
La excelente cooperación por parte de los responsables de las Juntas de Saneamiento, que son las encargadas de la gestión de los pozos así como del cobro de la provisión de agua, permitió obtener datos suficientes y de buena calidad. Durante el censo se localizaron 350 puntos hidrogeológicos.

Todos los datos obtenidos han sido documentados e introducidos en una base de datos digital.

La base de datos incluye:

- Medición de coordenadas con GPS
- Fotografía del pozo e instalación
- Perfil litoestratigráfico del pozo
- Medición del nivel estático
- Medición in-situ de las propiedades químicas del agua

Se evaluó un total de 1.347 pozos incluyendo litología y niveles estáticos del agua subterránea.



La extracción total en la Región Oriental del Paraguay suma unos 173 mill. m<sup>3</sup>/a, de los cuales 135 mill. m<sup>3</sup> corresponden a extracciones del Guaraní.

Ubicación de los pozos censados en la zona de la sistema acuífero guaraní.

El uso doméstico en zonas urbanas es de aproximadamente 50 mill. m<sup>3</sup>/a.

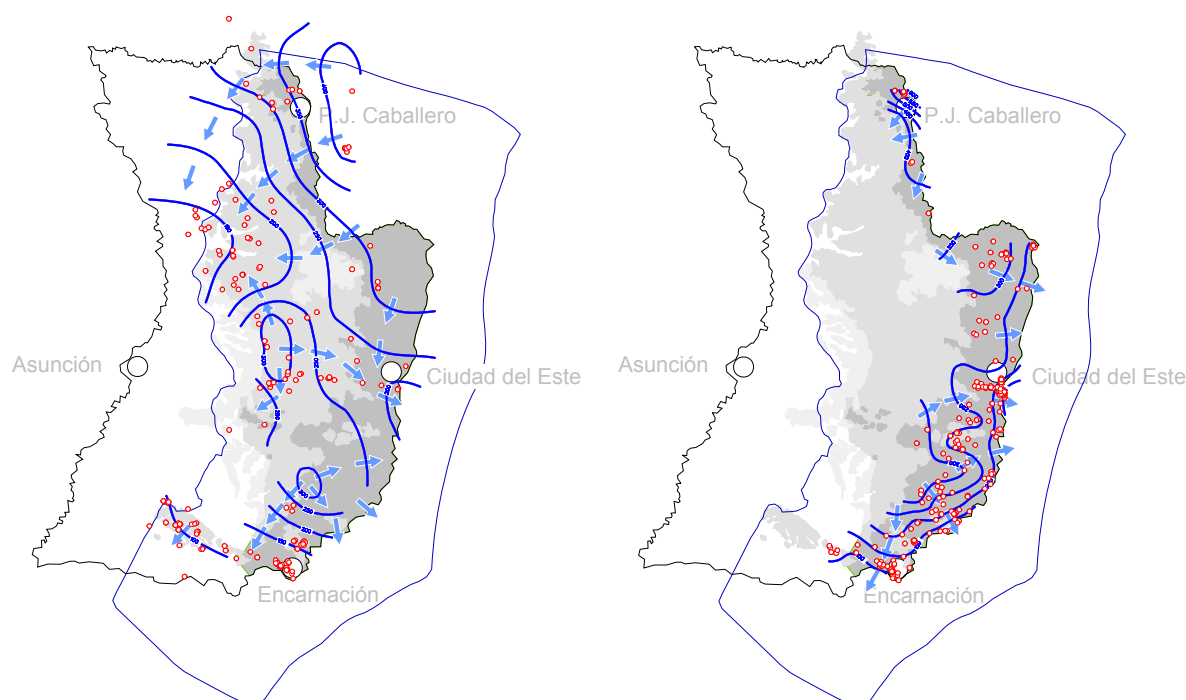
Todas estas investigaciones previas son herramientas comunes en estudios hidrogeológicos utilizadas para diseñar modelos conceptuales, o sea el modelo que explica el comportamiento hidrogeológico del acuífero. Los resultados obtenidos se describen en las secciones a continuación.

## Hidrogeología

### Dirección del flujo subterráneo

La dirección del flujo en un acuífero se determina con la ayuda de las curvas de nivel estático trazadas en base a la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea en pozos profundos perforados en ese acuífero. El flujo es perpendicular a estas curvas.

Las curvas de nivel y direcciones de flujo para el Guaraní y el basalto se muestran en la Figura a continuación.



Curvas de nivel estático y direcciones de flujo para el Guaraní (izquierda) y el basalto (derecha). Los círculos rojos indican los pozos profundos utilizados para el trazado de las curvas.

En el Guaraní existe un flujo regional hacia el suroeste en el norte de la zona de estudio, indicando una recarga en el Brasil. Más al sur aparecen “altos” coincidentes con afloramientos provocados por la recarga directa en esa región. Partiendo de estos altos el agua fluye en forma más o menos radial hacia el norte, oeste y hacia el Paraná.

En cuanto al basalto, existe un flujo hacia el sur-suroeste en la parte norte de la zona de estudio, indicando recarga en territorio Brasileiro. En la zona sur, el flujo es desde la recarga al oeste, dentro del territorio Paraguayo, hacia el Río Paraná.

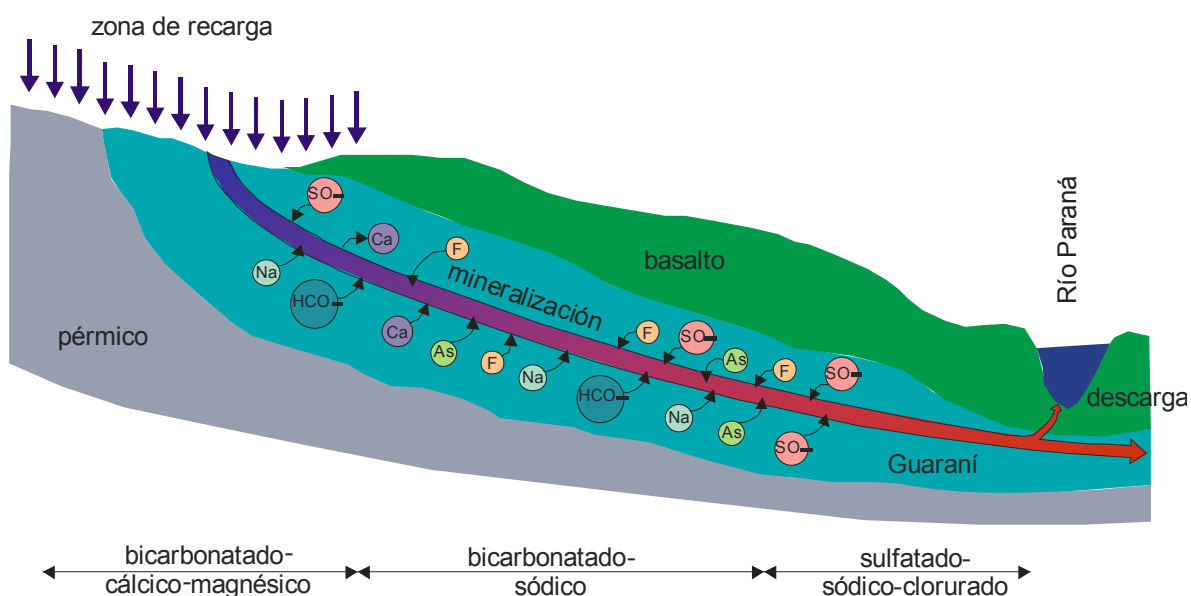
## Química del agua subterránea

La composición química de las aguas subterráneas permite determinar, entre otras cosas:

- Zona de recarga y dirección del flujo.
- Existencia y tipo de contaminación.

A medida que el agua fluye en el subsuelo, sus características cambian de la siguiente manera:

- Aguas recientemente recargadas tienen al bicarbonato como catión más importante y al calcio y magnesio como aniones más importantes.
- A medida que las aguas circulan en el subsuelo los aniones calcio y magnesio van perdiendo importancia y son reemplazados por el sodio. Aguas de este tipo indican una velocidad de flujo lenta y por lo tanto un tiempo prolongado de permanencia en el subsuelo.
- Aguas que prácticamente carecen de movimiento o semi estancadas tienen al sulfato como catión principal y al sodio y cloro como aniones principales. Generalmente estas aguas han permanecido miles de años en el acuífero.



Tipos de agua subterránea en el acuífero según la posición de la recarga, la dirección de flujo y la descarga.

En la zona de estudio del proyecto SAG-PY se tomaron un total de 119 muestras para efectuar análisis químicos completos (12 muestras de aguas superficiales, 4 muestras de pozos someros y 103 muestras de pozos profundos).

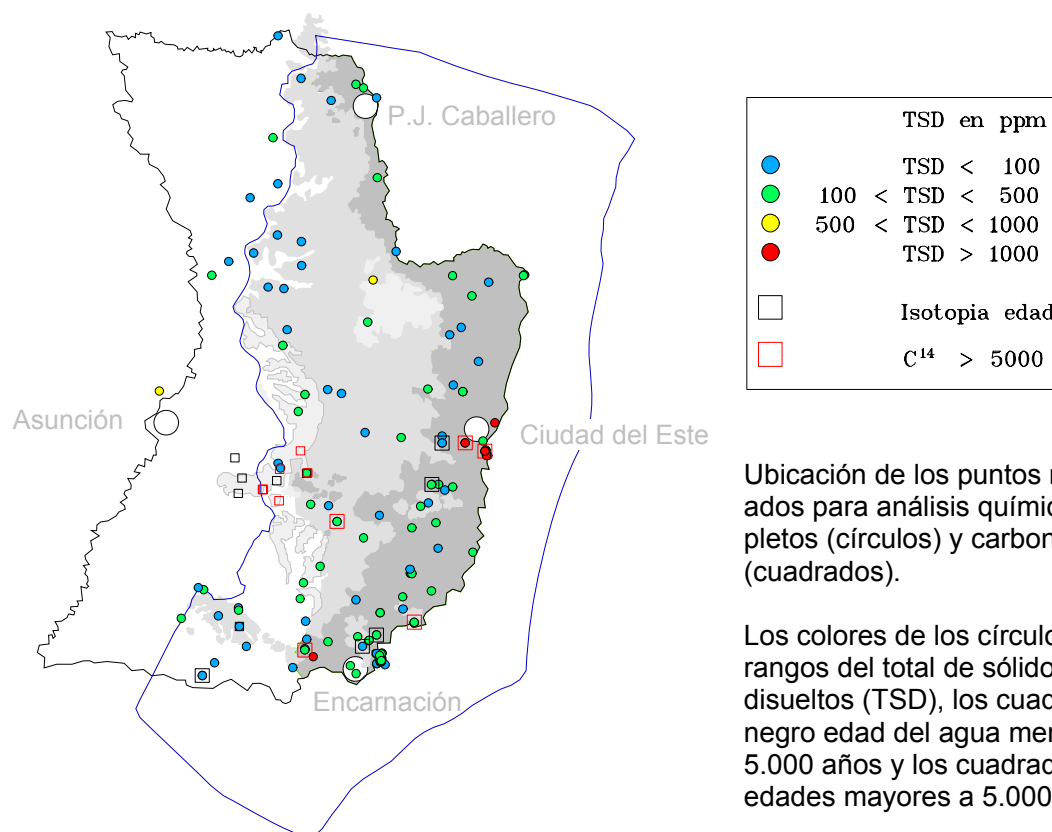
Los resultados obtenidos indican que:

- Todos los acuíferos (pérmico, Guaraní y basalto) tienen recarga, ya que en las tres unidades se encontraron aguas del tipo bicarbonatado-cálcico-magnésico. Este tipo de agua aparece en la zona aflorante de los respectivos acuíferos.
- Todos los acuíferos tienen velocidades de flujo muy bajas, ya que en los tres se encontraron aguas del tipo bicarbonatado-sódico. Este tipo de agua aparece hacia el Río Paraná, indicando un flujo en este sentido y confirmando lo ya indicado por las curvas de nivel
- Existe una zona dentro del acuífero Guaraní en la que el agua está prácticamente estancada, como lo señala la presencia de aguas sulfatadas-sódicas-cloruradas. Esta zona se encuentra en las proximidades de Ciudad del Este.

Para analizar la posibilidad de contaminación del agua subterránea debido al uso intensivo de las tierras, se estudiaron las concentraciones de nitrato medidas. Se observa que sólo 2 pozos presentan una concentración mayor a 50 mg/l (concentración máxima permitida), uno en Pedro J. Caballero y otro en Capitán Bado. Ambos pozos presentan una contaminación directa, ya que están localizados próximos a posibles fuentes de contaminación (letrinas). Por lo tanto puede concluirse que aún no hay contaminación por uso agrícola intensivo.

Se midieron concentraciones de flúor muy por encima de la permitida (1.5 mg/l) en la zona de Ciudad del Este, midiéndose valores entre 8.3 mg/l y 11.1 mg/l. Esta "contaminación" es geogénica o natural debido a la composición del subsuelo en la zona.

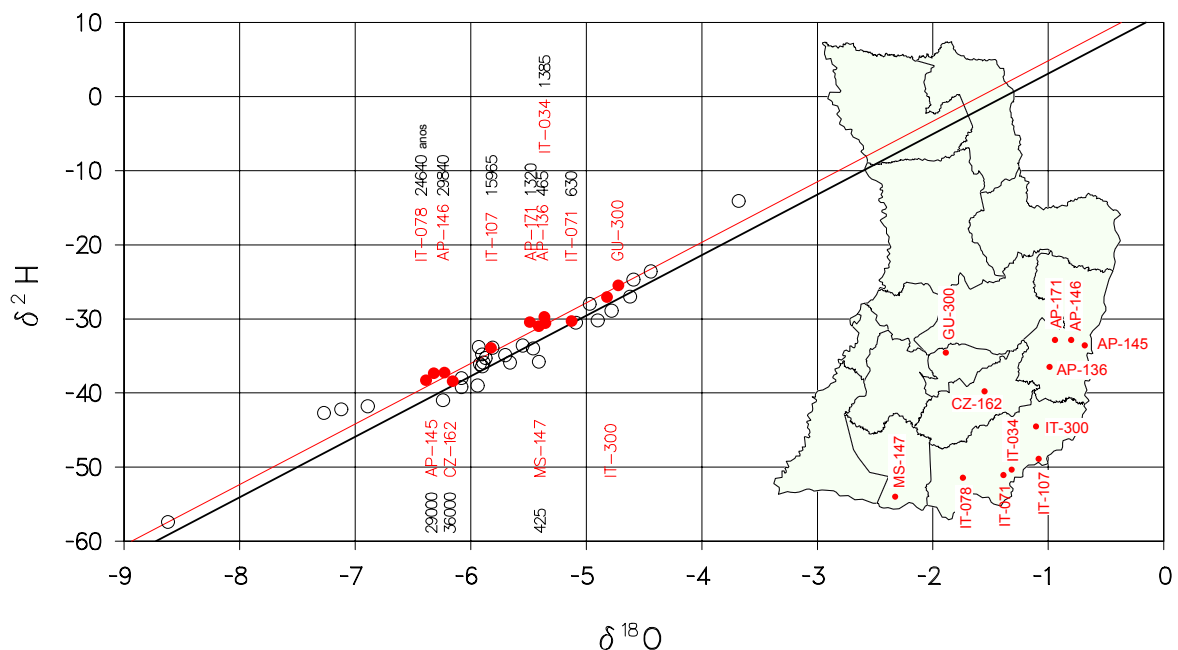
Similarmente existe una contaminación natural con arsénico en las aguas procedentes del pérmico. Mediciones de 50 a 53 µg/l fueron hechas en Toro Blanco, San Juan Nepomuceno y Coronel Bogado (el valor máximo permitido es 50 µg/l).



## Isotopía del agua subterránea

Los isótopos son tracers naturales que se utilizan para evaluar el origen del agua de recarga, la zona donde se produce la misma, la posibilidad de la existencia de aguas de distintos orígenes (aguas mezcla) y también el tiempo de permanencia del agua en el subsuelo. Este último factor se determina a través del método del carbono-14. Los resultados muestran que:

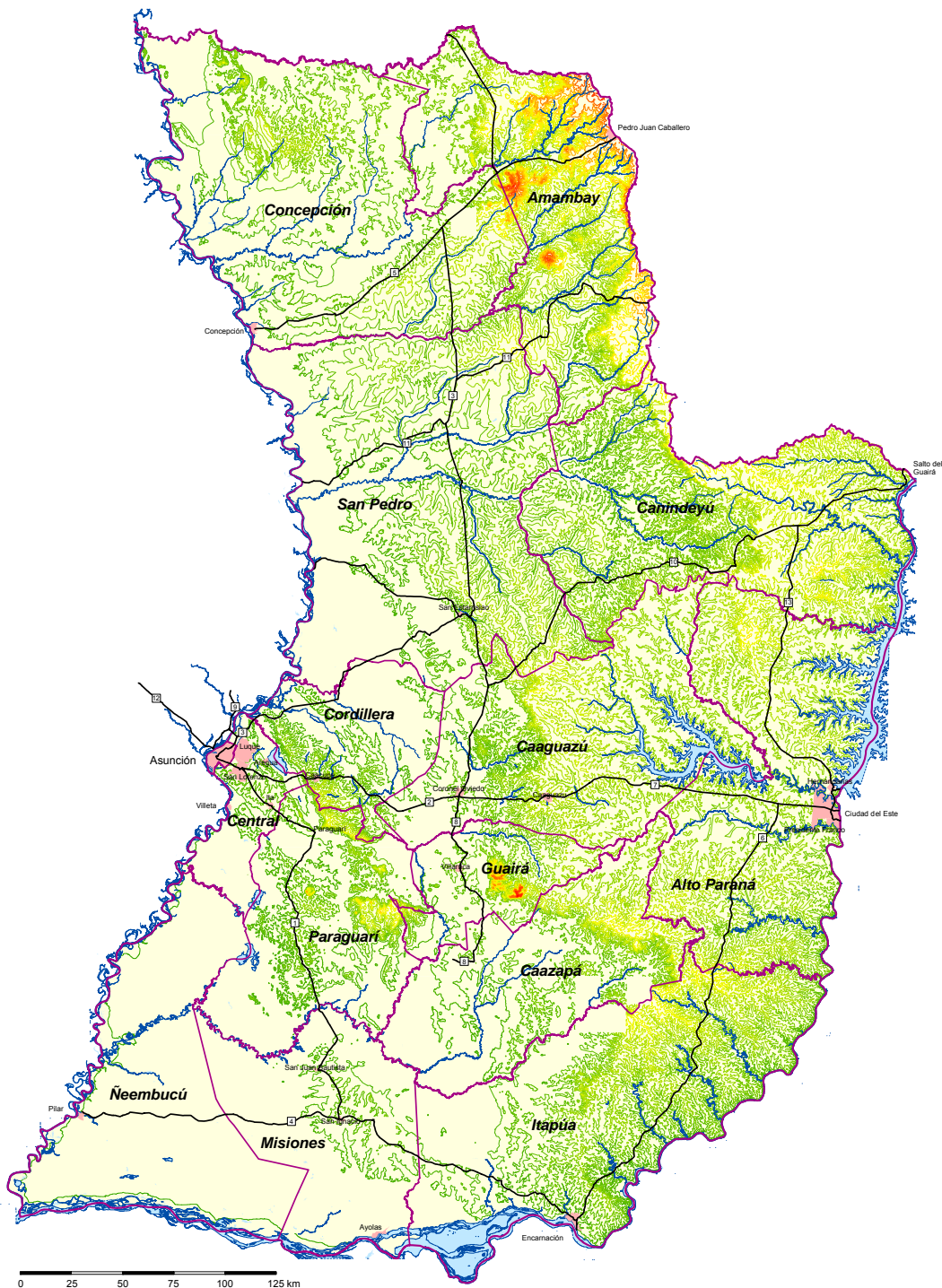
- Las aguas de las areniscas Guaraní aflorantes, como en el Departamento de Misiones, tienen edades entre 100 años (San Ignacio) y 350 años (San Patricio).
- El agua en las proximidades de Ciudad del Este es muy antigua con edades entre 29.000 y 30.000 años.
- El agua en Capitán Meza Puerto fue recargada hace unos 16.000 años.
- En Coronel Bogado el agua tiene unos 25.000 años (mezcla de aguas del Guaraní y del pérmico).
- En la zona correspondiente a las areniscas del pérmico el agua presenta altas edades, en general por encima de los 20.000 años (más de 36.000 años en San Juan Nepomuceno).



**Mapa digital**

En el marco del proyecto se efectuaron también numerosos mapas para la Región Oriental en forma digital, entre ellos el mapa de división política, de vías de comunicación y ciudades principales, de cursos de agua, y de curvas de nivel superficial. Estos mapas fueron entregados por Paraguay como contrapartida al proyecto SAG.

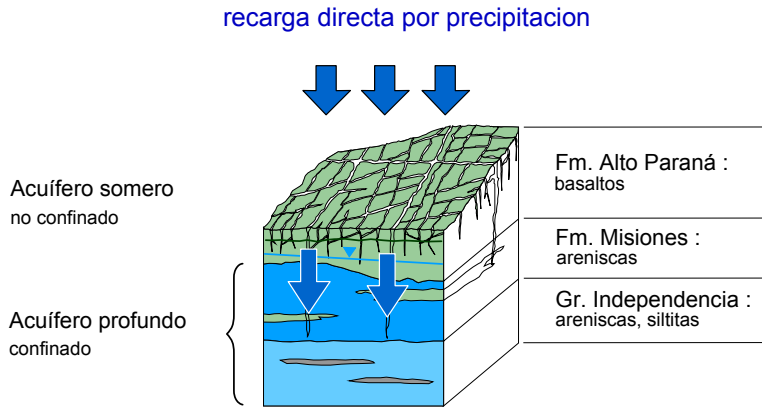
También fueron digitalizados el mapa geológico y el mapa hidrogeológico producido en 1986 para la Región Oriental. De esta manera se tiene ahora ambos en forma digital.





**Modelo conceptual**

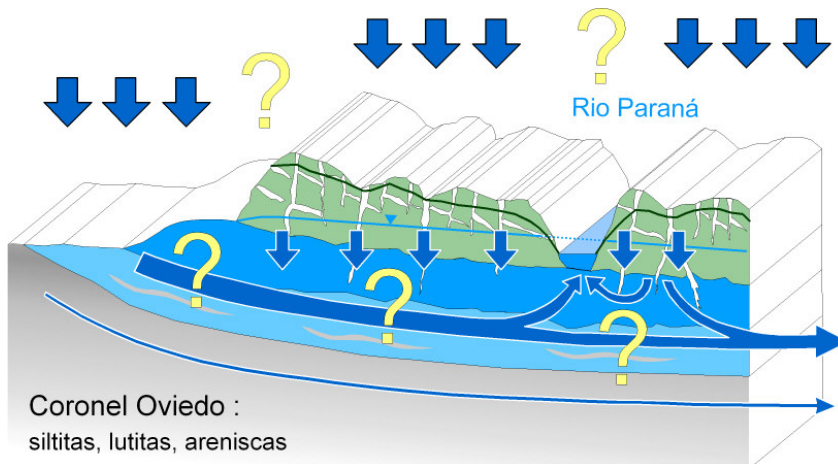
Todas las herramientas detalladas hasta ahora fueron utilizadas para diseñar un modelo conceptual de los acuíferos que aparecen en la zona de estudio. Este modelo conceptual asume que existen 3 unidades regionales hidrogeológicamente interconectadas entre sí: el pérmico, el Guaraní y el basalto (Figura inferior). También supone que existe recarga por precipitación en todas ellas y que existe una cierta recarga indirecta o “goteo” del basalto al Guaraní por debajo.



recarga indirecta por goteo

Modelo conceptual para la región de cobertura basáltica.

El modelo en forma vertical para una sección desde Caaguazú pasando por Ciudad del Este y entrando en territorio Brasileiro (Figura inferior) muestra recarga directa en la zona de afloramiento del pérmico y Guaraní, así como en el basalto. Existe descarga del basalto al Paraná así como “goteo” del basalto al Guaraní. Los flujos subterráneos regionales del pérmico y del Guaraní son hacia el este o suroeste (al Río Paraná), pero se desconoce si existe flujo por debajo del Paraná hacia los países vecinos (Argentina y Brasil).

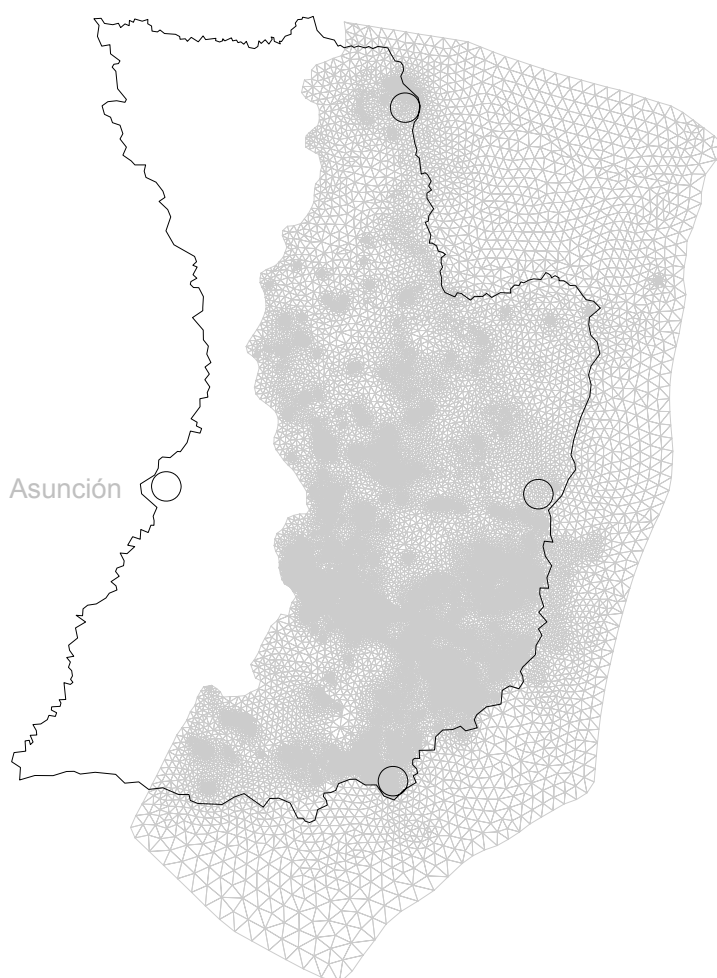


Modelo conceptual de la zona de estudio para un corte vertical de Caaguazú pasando por Ciudad del Este y entrando en territorio Brasileiro.

## Modelo numérico

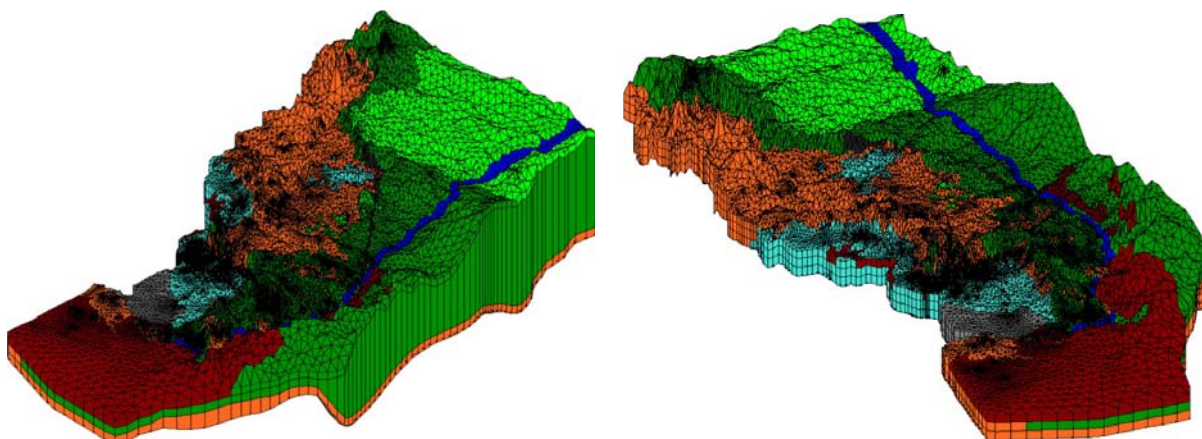
El modelo conceptual explica cómo interactúan las distintas unidades hidrogeológicas en la zona de estudio, pero no es posible cuantificar los flujos entre los acuíferos ni las recargas. Para ello se llevó a cabo un modelo numérico que incorpora todas las características consideradas en el modelo conceptual para obtener valores de recarga. El modelo numérico se extendió más allá de la zona de estudio hasta alcanzar límites hidrogeológicos en territorios Argentino y Brasileiro.

Para poder calcular las alturas piezométricas con la ayuda de un modelo numérico es necesario subdividir la zona de estudio en “elementos”. Debido a que se efectuó un modelo tridimensional, los elementos adoptados tienen forma prismática de bases triangulares de tamaño variable. Se hizo un refinamiento de la malla en torno a los pozos de extracción y a las fracturas regionales para poder obtener resultados más certeros.



Malla de elementos prismáticos con bases triangulares utilizada para resolver las ecuaciones. Se realizó un refinamiento de la malla en torno a los pozos de extracción y a las fracturas regionales para obtener resultados más certeros.

Para poder representar la zona a modelar en la profundidad, se consideraron 3 capas de diferente espesor. La Figura siguiente muestra la superposición de las distintas unidades hidrogeológicas consideradas en el modelo: el carbonífero (la base del modelo), el pérmico, el Guaraní, el basalto, las areniscas cretácicas y los depósitos cuaternarios.



Construcción del modelo tridimensional. En el gráfico se muestra cómo se superpusieron las distintas unidades hidrogeológicas consideradas en el modelo (carbonífero, areniscas pérmicas, Guaraní, basalto, areniscas cretácicas y depósitos cuaternarios).

Con un modelo numérico en estado estacionario (como el que se usó en esta oportunidad), se calcula la altura piezométrica partiendo de los valores de la conductividad hidráulica y de la recarga de cada una de las unidades hidrogeológicas. Estas dos características (conductividad hidráulica y recarga) pueden variarse para tratar de calcular alturas piezométricas similares a las medidas en el terreno, procedimiento que se conoce con el nombre de calibración.

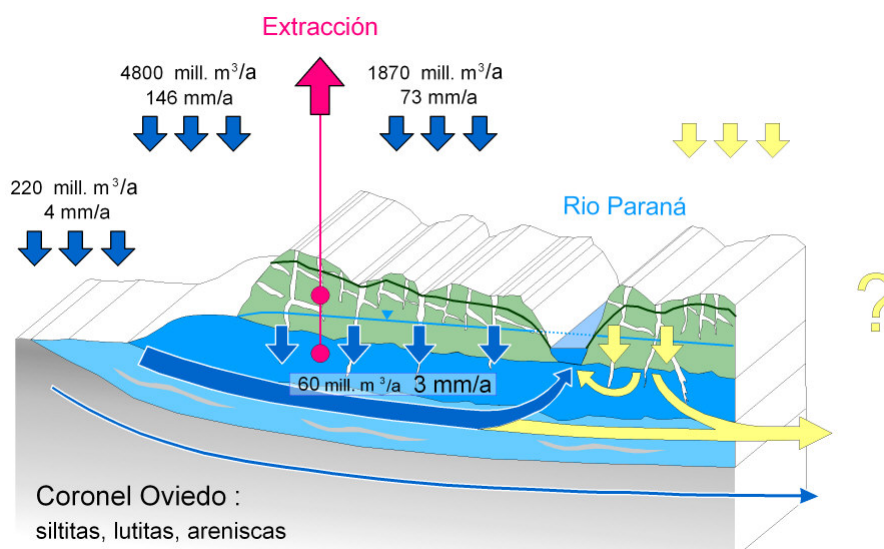
En el caso del modelo aquí descrito se adoptaron los valores de conductividades hidráulicas provistos por ensayos de bombeo (Guaraní y pérmico) o de la literatura (basalto, areniscas cretácicas y depósitos cuaternarios). Las recargas fueron estimadas a través de la calibración del modelo.

La calidad de la calibración puede evaluarse a través de un factor denominado “eficiencia del modelo”. La eficiencia del modelo es muy elevada en el Guaraní (90%), el basalto (94%) y el cuaternario (92%), indicando una calibración adecuada para estas tres unidades. Pero debe tenerse en cuenta que en el cuaternario sólo se cuenta con unas pocas mediciones, lo que le quita fuerza al significado de la eficiencia en esta unidad hidrogeológica. La calibración del pérmico no es tan buena (eficiencia del 41%). Ésto se debe principalmente a las características intrínsecas de la unidad (intercalación de areniscas, lutitas y siltitas).



Un cálculo del balance hidráulico en el modelo indica que:

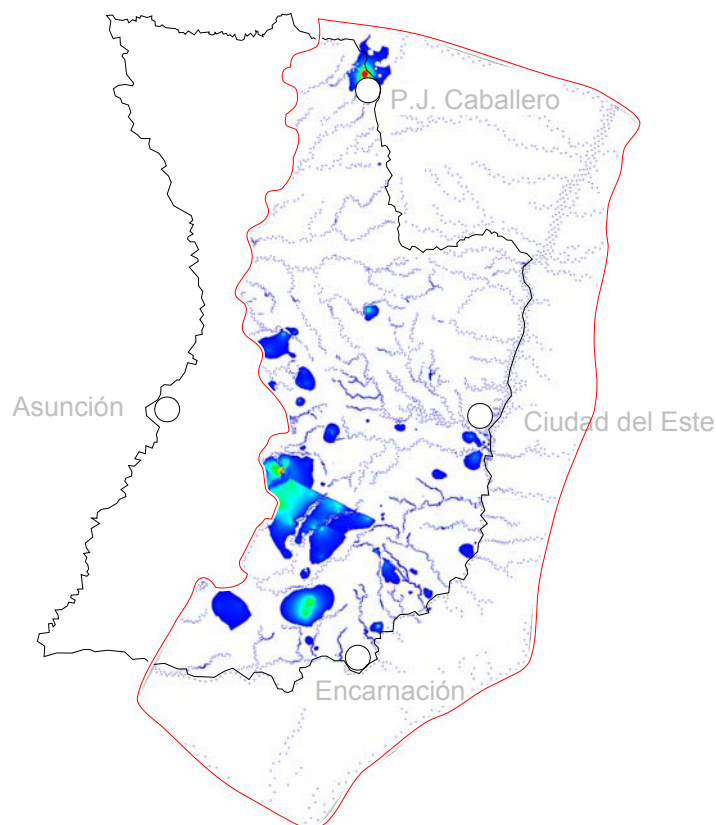
- El Guaraní es el acuífero que recibe la mayor recarga pluviométrica (146 mm/a) seguida por el cuaternario (77 mm/a) y el basalto (73 mm/a). Frente a estas recargas, las que reciben el pérmico y el carbonífero son prácticamente despreciables.
- El sistema recibe una recarga total anual de 10,4 km<sup>3</sup>.
- Existe un “goteo” de 0,18 km<sup>3</sup>/a del basalto al Guaraní.
- Si tenemos en cuenta el bombeo de pozos profundos para satisfacer la demanda doméstica, considerando que cada persona consume 150 l/d, se obtiene una extracción total de 0.05 km<sup>3</sup>/a (0.5% de la recarga). Se concluye entonces que, comparada con la recarga, la extracción es despreciable. Prácticamente la totalidad de la recarga descarga alimentando los numerosos ríos que recorren el área modelada.



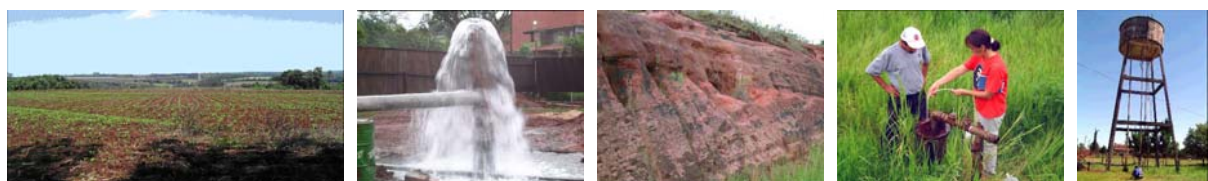
Si bien la extracción es despreciable, una concentración de pozos en las proximidades de una ciudad puede ocasionar conos de depresión considerables con las consecuencias negativas correspondientes.

La Figura siguiente muestra las zonas, dentro del área de estudio, en las cuales la extracción para provisión de agua potable ocasiona conos de depresión medibles (se considera como depresión provocada por extracción aquella que supera los 2 m de descenso).

Los conos de depresión más extensos se aprecian en las areniscas pérmicas, pero también se miden conos de considerable extensión en las proximidades de Pedro Juan Caballero (basalto); Yukyrai, General Artigas y San Pedro del Paraná (carbonífero/pérmico); y San Ignacio, San Antonio y San Patricio (Guaraní).



Conos de depresión originados por la extracción para cubrir la demanda doméstica.



### Futuras actividades

Los resultados obtenidos hasta el momento con el modelo numérico sólo incluyen datos ciertos y homogéneamente distribuidos para el territorio Paraguayo. Lamentablemente, no se cuenta ni con datos ciertos de la hidrogeología ni con mediciones del nivel de agua para la Argentina o el Brasil, por lo que es imposible calibrar el modelo en esas regiones.

Ya que la finalidad del proyecto es obtener un modelo numérico capaz de ser utilizado como herramienta de gestión tanto en el Paraguay como en las zonas aledañas, será necesario ajustar el modelo con los datos obtenidos por el proyecto SAG, principalmente en sus campañas de hidrogeología, geofísica y censo de pozos. Para cumplir con estos requisitos ha sido necesario prolongar el proyecto SAG-PY hasta Febrero del 2009.

