

Gestión Sustentable del Agua Subterránea

Conceptos y Herramientas

Colección de Casos Esquemáticos Caso 9

Brasil, Paraguay, Uruguay, Argentina: Iniciativa Para la Gestión Transfronteriza del Agua Subterránea en el Acuífero Guarani

2002-2005

Autores: Stephen Foster, Karin Kemper y Héctor Garduño

Gerentes de Proyecto: Abel Mejía y Samuel Taffesse (Banco Mundial - LCR)

Principales Organismos Contraparte: SSRH-Argentina, SRH-Brazil, SEAM-Paraguay,
DNH-Uruguay, Secretaría General del Guarani de la OEA

Este caso esquemático describe brevemente la situación y visión del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guarani, cuyo monto asciende a US\$ 26,7 millones, de los cuales el 50% proviene del Global Environmental Facility (GEF). Las naciones del MERCOSUR (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay) iniciaron el proyecto en mayo de 2003, implementado (I'm not sure this is correct. The WB doesn't implement projects, maybe "puesto en marcha" would be a better wording) por el Banco Mundial y ejecutado por la Organización de los Estados Americanos (OEA), con apoyo de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y asistencia técnica alemana (BGR). El GW•MATE se involucró desde la preparación detallada del proyecto (en 2000) y continúa prestando apoyo para implementarlo, en especial para (a) evaluar los asuntos importantes sobre el desarrollo regional y la gestión del acuífero (b) promover medidas prácticas de protección del acuífero a nivel local a través de cuatro proyectos piloto, y (c) definir un marco legal e institucional apropiados para realizar una gestión transfronteriza transparente del agua subterránea.

Características del sistema acuífero del Guarani

Estructura hidrogeológica

- El Acuífero Guarani es un sistema hidrogeológico de gran extensión que cubre por lo menos una superficie de 1.200.000 km² en Brasil (en donde se ubica el 70% de su área conocida), Paraguay, Uruguay y Argentina (Figura 1). Tiene un espesor promedio de 250 m y llega a alcanzar profundidades mayores a los 1.000 m. El volumen total de agua dulce almacenada se estima en aproximadamente 40.000 km³, equivalente al caudal acumulado durante 125 años del Río Paraná. Se cree que la mayor parte del agua almacenada es de calidad potable, aunque en algunas zonas profundas puede haber un exceso de fluoruros o de salinidad.
- El acuífero se encuentra en dos cuencas estructuralmente semi-independientes: la región central del Paraná (relativamente bien conocida) y la región sudoeste del Chaco en el Bajo Paraná (donde la geología y la distribución del agua dulce son menos conocidas). Estas dos cuencas se encuentran separadas por la zona estructural elevada de Asunción-Río Grande (Figura 1) y es probable que ésta y otras zonas estructurales elevadas (como la de Punta Grossa ubicada en el estado de Paraná, Brasil), afecten la estructura general del acuífero y controlen la presencia de intrusiones magmáticas, y como consecuencia tengan una fuerte influencia en el régimen del agua subterránea.

- El sistema Acuífero Guaraní (conocido como SAG tanto en español como en portugués) abarca una secuencia de areniscas eólicas y fluviales débilmente cementadas de las épocas del Jurásico Superior y del Cretácico Inferior, cubiertas extensamente por flujos laminares basálticos del Cretácico Superior (Figura 1). La continuidad geológica de estas areniscas no fue reconocida sino hasta los años 1990, como resultado de las perforaciones de pozos exploratorios para buscar petróleo, y su posterior interpretación estratigráfica fue realizada por investigadores que denominaron al sistema como 'Guaraní' en homenaje a la población indígena que se encuentra en el área.
- Antes de que se reconociera como un sistema, el SAG era localmente denominado de las siguientes maneras:
 - Formación Tacuarembó, en Uruguay y Argentina
 - Formación Botucatu, en Brasil
 - Formación Misiones, en Paraguay.

Algunas formaciones subyacentes, como la de Pirambóia en São Paulo, Brasil son lo suficientemente permeables como para formar la parte inferior del SAG, aunque por ser de origen más lacustre y fluvial tienden a tener un menor rendimiento y a contener agua subterránea de mala calidad.

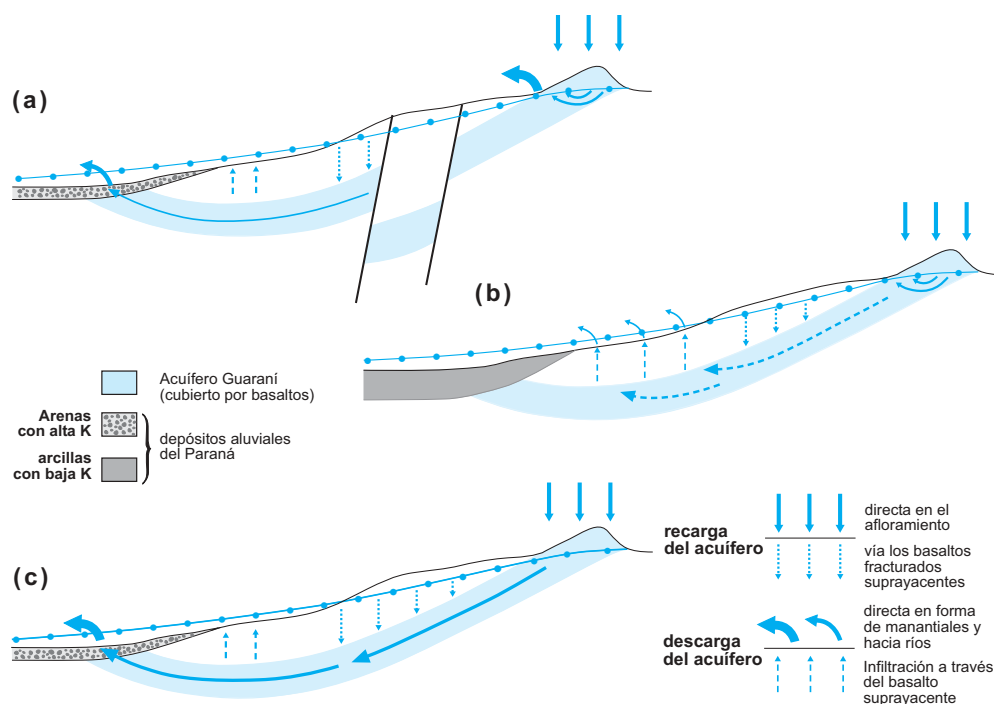
Figura 1: Mapa hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní, con la ubicación de los proyectos piloto de gestión de agua subterránea



Régimen del Flujo y Calidad del Agua Subterránea

- La recarga del SAG se produce por infiltración del agua excedente de lluvia, así como también por el flujo que baña el 'área de recarga', la cual se considera que abarca tanto el afloramiento de areniscas (que se limita a aproximadamente 150.000 km²) como otra zona mucho más extensa y adyacente a la anterior, en donde la arenisca se encuentra cubierta por una capa relativamente delgada de basaltos fracturados (Figura 1). En forma preliminar se estima que la tasa total de recarga es de 50 a 160 km³/año.
- Conforme se acerca a las cuencas estructurales del centro, el agua subterránea del SAG se ve progresivamente más confinada por los basaltos suprayacentes que incrementan su espesor y se observa una carga artesiana que derrama en un área grande (Figura 1). Al incrementar la profundidad y el confinamiento, la temperatura del agua subterránea se eleva sustancialmente (Tabla 1), rebasa ampliamente los 400C, y llega en algunos puntos a los 600C, aunque los mecanismos que controlan dicho fenómeno no son aún bien conocidos. Asimismo, como resultado de la variación en la viscosidad del agua subterránea, la temperatura produce un efecto notable en la conductividad hidráulica aparente (permeabilidad) del acuífero.

Figura 2: Secciones transversales hipotéticas del Sistema Acuífero Guaraní que muestran una perturbación potencial tectónica significativa y característica de la cubierta aluvial del Paraná para controlar el régimen de descarga



- La descarga natural del SAG todavía se desconoce en gran medida. En 'condición no desarrollada' una cantidad considerable de 'recarga rechazada localmente' parece producirse en varias de las zonas adyacentes al área de recarga del acuífero, con el componente profundo natural del agua subterránea hacia la sección confinada del acuífero limitado por la estructura geológica (compárense las Figuras 2a y 2b con la 2c). Sin embargo, pueden existir algunos sitios de 'descarga regional del acuífero' (Figura 1), particularmente como flujo base de las secciones intermedias del Río Uruguay (en la región sur del Brasil) y como flujo ascendente a los humedales Esteros de Iberá (en el extremo noreste de Argentina), aunque las líneas del flujo del agua subterránea correspondientes no están aún confirmadas.

- La composición química del agua subterránea muestra cambios importantes naturales en zonas más bajas que el afloramiento (Tabla 1), tales como:
 - las reacciones de intercambio catiónico en las cuales el Na reemplaza al Ca en solución
 - algunos incrementos de F y/o salinidad total, probablemente asociados con infiltraciones ascendentes verticales o la difusión de compuestos de la formación basal del SAG
 - aumento de $d_{13}C$ por la disolución de CO_2 en condiciones cerradas
 - un mayor contenido de d_2H ligero y $d_{18}O$ que sugiere la presencia de agua subterránea fósil proveniente de la recarga durante condiciones climáticas más húmedas

La aparente presencia de una recarga moderna marcada contrasta con la de agua mucho más vieja a distancias relativamente cortas de los pozos profundos, lo que sugiere ya sea un largo (árido y/o frío) período con poca recarga, o bien, la ausencia de flujo en el acuífero profundo con rechazo de recarga.

Tabla 1: Cambios químicos e isotópicos típicos del agua subterránea en el Acuífero Guaraní, al bajar hacia el oeste a partir de Ribeirao Preto en São Paulo, Brasil

PARÁMETRO (unidades)		POZOS EN EL AFLORAMIENTO	POZOS EN ZONAS MÁS BAJAS QUE EL AFLORAMIENTO (distancia del afloramiento)	
			30km	150km
<i>Características Químicas</i>				
T (0C)	temperatura	24	26	42
pH	acidez	6,5	8,5	9,5
Ca (mg/l)	calcio	30	20	2
Na (mg/l)	sodio	1	5	90
HCO ₃ (mg/l)	bicarbonato	15	75	160
Cl (mg/l)	cloruros	1	2	10
F (mg/l)	fluoruros	< 0,1	0,2	> 1,0
SiO ₂ (mg/l)	sílice	15	20	30
<i>Isótopos indicadores</i>				
D 2H (0/00)	deuterio	- 50	- 70	- 65
D 18° (0/00)	oxígeno-18	- 7	- 9	- 10
D 13C (0/00)	carbono-13	18	- 10	- 8
14C (pme)	carbono-14	> 80	30	< 5

(datos seleccionados de Silva, 1983; Kimmelman et al, 1989; Sracek e Hirata 2002; Silva et al, 2002)

- Existen también algunas preocupaciones referentes a si el acuífero confinado profundo pueda o no contener cantidades significativas de isótopos de U soluble, radio y gas radón, por lo que en general los elementos traza ameritan un estudio detallado.

Explotación actual y desarrollo potencial

- A pesar de que no se dispone de un inventario completo de los pozos de agua, la explotación actual del SAG es relativamente modesta. Se estima que hay alrededor de 1.000 pozos profundos en operación, aun cuando el número total pudiera ascender a 3.000 o más si se consideran los pozos que se encuentran en las zonas basálticas donde apenas llegan las areniscas. La mayoría de los pozos en operación pueden producir por lo menos 1.000 m³/h con bombeo, pero menos de 500 m³/h en donde derraman.

- Se estima que la producción total de agua subterránea es del orden de 1.000 a 3.000 Mm³/año, concentrada principalmente en Brasil. El 80% de ésta se usa para suministro público urbano (500 poblaciones brasileñas son total o parcialmente alimentadas del SAG), 15% para fines industriales y 5% para usos turísticos en balnearios ('SPA').
- La población que se localiza en la vasta área del SAG es de 15 millones de habitantes, pero aumenta a más de 70 millones si se consideran las áreas adyacentes. La zona es principalmente sub-tropical con recursos de agua superficial abundantes, pero con frecuencia contaminados, que experimenta marcadas épocas de estiaje e incluso ocasionalmente sequías. De ahí que, si la demanda para uso agrícola de alto valor e industrial aumentara sustancialmente, la necesidad de fuentes confiables de suministro de agua potable (que requiera tratamiento de bajo costo) se elevaría considerablemente.
- El SAG también representa un recurso geotérmico importante de distribución muy amplia y baja entalpía (con amplio artesianismo) con diversas aplicaciones potenciales, entre las cuales destacan:
 - el desarrollo de nuevos balnearios en el noroeste de Uruguay y las partes vecinas de Argentina, e incluso posiblemente también más al norte, en la zona turística internacional de Iguazú
 - numerosos usos agrícolas e industriales
 - generación de energía de baja entalpía.

OBJETIVOS REGIONALES DE LA INICIATIVA

Alcance y Estructura del Proyecto

- El Proyecto del Acuífero Guaraní no se limita a la investigación científica, sino que abarca también el desarrollo de un amplio marco de gestión, donde los criterios ambientales y de sostenibilidad predominen, particularmente aquéllos con repercusiones transfronterizas.
- Durante la fase de preparación, se identificó la siguiente lista de asuntos y preocupaciones clave:
 - información básica sobre el agua subterránea del SAG, así como de sus usuarios y usos es insuficiente, debido a que los datos son dispersos e incompletos pero también a que se encuentran inadecuadamente compilados y divulgados
 - conflictos potenciales a causa del bombeo excesivo o indiscriminado en algunos puntos y una protección deficiente contra la contaminación en las zonas de recarga del acuífero
 - preocupación por la posibilidad de efectos extensos aunque sutiles de interferencias de bombeo en la zona del sistema acuífero altamente confinado, con el riesgo de disminuir la carga artesiana y el derrame de los pozos, el flujo base de los ríos durante estiaje y el nivel de los humedales dependientes de la descarga del acuífero
 - una ausencia generalizada de políticas nacionales y transfronterizas de desarrollo y gestión del agua subterránea, especialmente en términos de 'reglas de operación' y 'protocolos de toma de decisiones' a nivel local
 - falta de códigos de prácticas de buen diseño, construcción y operación que se hagan valer
 - un inadecuado marco legal para la gobernanza del agua subterránea, con procedimientos poco claros para asignar el agua y otorgar permisos de extracción
 - falta de experiencia internacional en el manejo de los acuíferos transfronterizos, ya que sólo se consiguen algunos borradores de esquemas legales para la gestión del agua subterránea transfronteriza
 - puntos de vista divergentes (entre los gobiernos nacionales y federales y las autoridades estatales o provinciales) sobre lo que se requiere como 'autoridad del recurso hídrico' y, como consecuencia, sobre cómo identificar las organizaciones apropiadas que deban ser las responsables de la gestión del agua subterránea transfronteriza (en parte porque Argentina y Brasil son países federales en los cuales el agua subterránea es de responsabilidad fundamentalmente del estado o la provincia con variaciones entre los estados o provincias)

- a pesar de que existe una experiencia científica bien desarrollada y ampliamente distribuida en el tema del agua subterránea, hace falta capacidad práctica para la gestión y protección del recurso, la evaluación de riesgos socio-políticos y la resolución de conflictos
 - escaso conocimiento por parte de la sociedad de lo que es el agua subterránea, en general, y del SAG en particular y, como consecuencia, participación insuficiente de los grupos interesados en la gestión y protección ambiental del recurso.
- El Proyecto (con duración de 4 años) está diseñado para abordar las deficiencias anteriores, y sus componentes, junto con cuatro proyectos piloto de gestión y protección del agua subterránea, proporcionarán los fundamentos necesarios y serán el medio para lograr un nivel adecuado local y regional para la administración del recurso de agua subterránea.

Tabla 2: Resumen de los principales componentes del Proyecto del Acuífero Guaraní

COMPONENTE	PROPORCIÓN DEL COSTO TOTAL	RESULTADOS
Expansión y Consolidación del Conocimiento Científico	33%	<ul style="list-style-type: none"> • definición de la geometría y propiedades del acuífero • evaluación de la estructura compartimentalizada del acuífero • calidad del agua subterránea, firma isotópica y riesgos de contaminación • evaluación de las tasas y mecanismos de recarga • estudio de los mecanismos y de las funciones de la descarga del acuífero • modelación numérica de la gestión regional/local del acuífero • especificaciones para diseño y construcción de pozos • evaluación de los recursos hidrogeotérmicos y definición de sus aplicaciones
Desarrollo de un Marco Legal e Institucional	12%	<ul style="list-style-type: none"> • revisión del marco legal e institucional existentes • definición de las necesidades legales e institucionales futuras • negociación de un marco de gestión coordinada • identificación e implementación de las acciones prioritarias de manejo
Participación de los Grupos Interesados e Información a la Sociedad	8%	<ul style="list-style-type: none"> • desarrollo de un plan estratégico para la participación • inicio de un proceso de gestión participativa • desarrollo de un plan de educación pública • inicio de campañas informativas en escuelas, con la sociedad y en medios de comunicación
Proyectos Piloto de Gestión y Protección del Acuífero	41%	<ul style="list-style-type: none"> • componentes críticos en términos del objetivo global del programa (detallados en la siguiente sección)
Administración, Monitoreo y Divulgación del Proyecto	6%	<ul style="list-style-type: none"> • arreglos normales para la administración del proyecto (no detallados en este documento)

Escalas y niveles de las necesidades de gestión del acuífero

- Durante la definición del proyecto y en su inicio, fueron evidentes las interpretaciones deficientes y generalizadas del SAG, en especial sobre la naturaleza de sus recursos de agua subterránea, la escala de los problemas que podrían afectarlo y el nivel más apropiado de gestión para la resolución de los mismos. Por ello, se desarrolló un marco de referencia indicativo (Tabla 3) que aporta un resumen realista y balanceado de estos aspectos, el cual puede ser usado para:
- comunicación en los debates nacionales sobre la política del agua y del medio ambiente
 - divulgación entre las diversas agencias internacionales involucradas o interesadas.

- Este marco, que ha sido cuidadosamente diseñado y críticamente revisado, muestra claramente que:
 - el Proyecto SAG (P-SAG) es de carácter ‘preventivo’, ya que no hay ‘asuntos críticos’ que resolver y sí muchos beneficios potenciales como resultado de la cooperación
 - los asuntos actuales del agua subterránea transfronteriza no tienen grandes ‘implicaciones aguas arriba – aguas abajo’, sino que su extensión se encuentra estrictamente delimitada y son de naturaleza esencialmente local, por lo que su solución puede darse por medio de acuerdos y acciones en el nivel pertinente
 - los efectos potenciales transfronterizos en el agua subterránea sólo podrían crecer de una escala local a la cuenca si ocurrieran cambios muy importantes en el uso agrícola del suelo y/o se intensificara el empleo del agua subterránea para riego—en combinación con condiciones hidrológicas específicas (que no han sido aún verificadas).
- Un asunto relacionado con lo anterior es la selección de un modelo físico aceptable sobre el cual se base el desarrollo del marco legal transfronterizo adecuado para la gestión del acuífero. Una y otra vez se hace referencia a las siguientes analogías:
 - un ‘río subterráneo’ para dar a entender ‘flujo de agua hacia una descarga común’, con la implicación de que el tiempo de residencia fuera limitado puesto que el flujo domina sobre el almacenamiento
 - un ‘reservorio de hidrocarburos’, completamente aislado de los procesos superficiales sin que el recurso se rellene
 - un ‘lago subterráneo’ en el cual domina el almacenamiento pero con la propagación inmediata de perturbaciones físicas.

Tabla 3: Marco de las necesidades de gestión del Sistema Acuífero Guaraní y los niveles apropiados para su resolución

ACCIONES LOCALES DE COOPERACIÓN CON BENEFICIOS MUTUOS	SITUACIONES ACTUALES Y POTENCIALES CON EFECTOS TRANSFRONTERIZOS LOCALES	SITUACIONES POSIBLES CON IMPACTOS SIGNIFICATIVOS A ESCALA DE CUENCA
<ul style="list-style-type: none"> evaluación de la incidencia y control de la contaminación natural del agua subterránea (F, U, Rd, Rn) que afecta el uso del agua para suministro potable 	<ul style="list-style-type: none"> contaminación de los pozos de agua potable por el saneamiento inadecuado y el uso no planificado del suelo 	
<ul style="list-style-type: none"> definición de estrategias para la explotación eficiente y la gestión sostenible del recurso evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y medidas adecuadas para proteger las zonas de recarga 	<ul style="list-style-type: none"> posibles impactos en los humedales* y reducción del flujo base de los ríos* como posible consecuencia de explotación potencial intensiva del agua subterránea para el riego agrícola posibles impactos en la calidad y tasa de recarga del acuífero como resultado de cambios extensivos en el uso del suelo agrícola así como en los tipos y sistemas de cultivo 	<p>los impactos descritos podrían crecer si las políticas agrícolas regionales y el mercado favorecieran el uso intensivo y extensivo del suelo local y/o de los recursos de agua subterránea, pero solamente si las investigaciones en curso confirmaran (a) el papel ecológico actual que juega la descarga del acuífero y (b) la continuidad hidráulica del sistema acuífero en las zonas correspondientes</p>
<ul style="list-style-type: none"> evaluación de las opciones económicas y eficientes del uso de los recursos geotérmicos del acuífero. 	<ul style="list-style-type: none"> reducción del artesianismo y geotermalismo del acuífero a causa de la explotación no controlada de los pozos geotérmicos 	
<i>Nivel Apropiado de Resolución</i>		
SP-SAG- y CSDP al servicio de los organismos estatales y nacionales involucrados	SG-SAG mediante intervención del CSDP junto con los países e instituciones locales involucrados	CSDP en consulta con organizaciones supra nacionales y con el apoyo del Proyecto-SAG

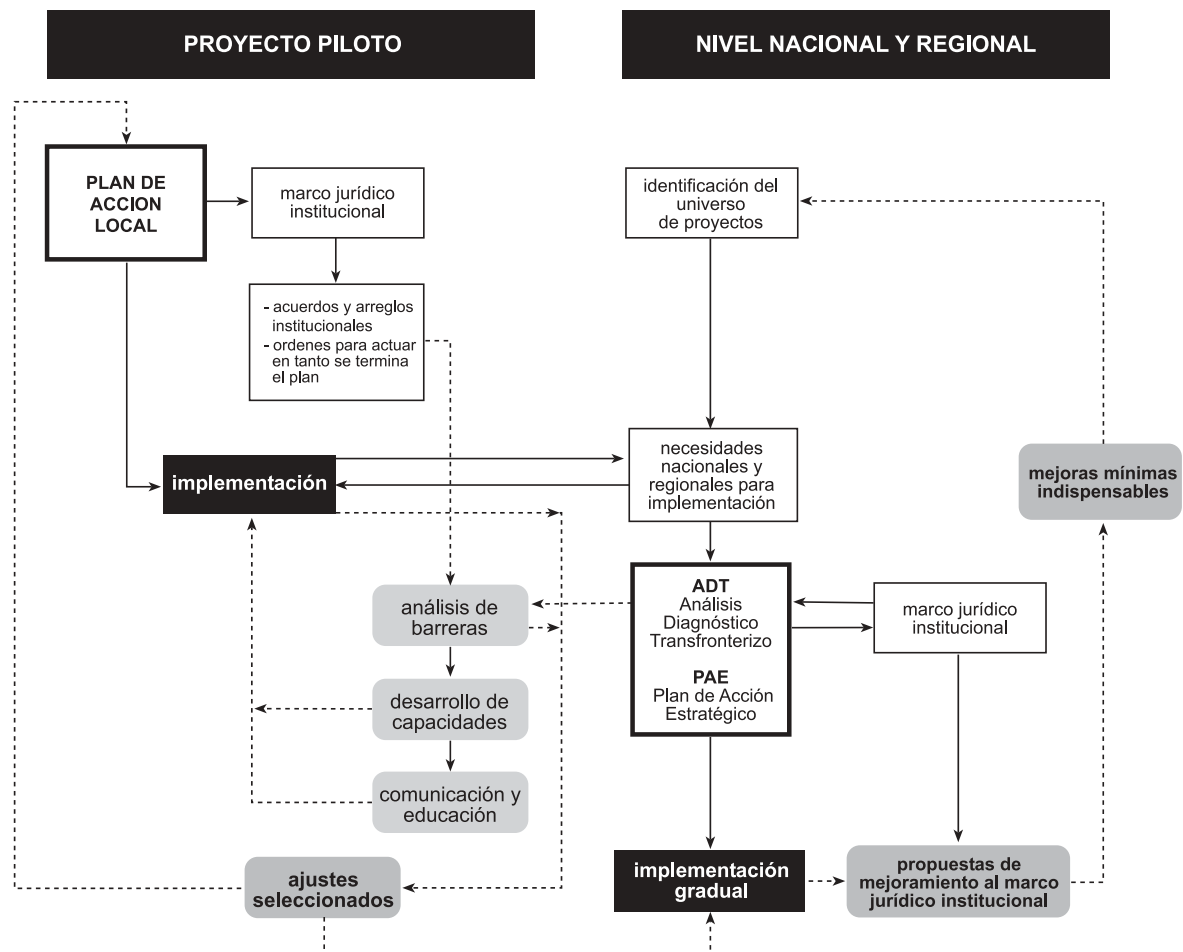
* principalmente los Esteros de Ibera (Argentina) y Niembucu (Paraguay), así como del Río Uruguay, respectivamente

- Pero ninguno de los términos anteriores es realmente apropiado para muchos acuíferos y mucho menos para el SAG, porque tiene una enorme capacidad de almacenamiento (en comparación con la recarga anual), tiempos de residencia muy largos, y las direcciones de su flujo natural pueden ser modificadas, al menos localmente, como resultado de la extracción de agua. Como todos los 'acuíferos granulares' el SAG tiende también a localizar los impactos de la extracción y de la contaminación, y además posee un importante (pero no bien entendido) grado de compartimentalización con trayectorias del flujo de agua subterránea y regímenes de descarga inciertos. Para fines de la gestión, es mucho más apropiado identificar 'cuerpos de agua subterránea' (como se hace en la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, 1999) como sub-unidades del SAG, lo cual podrá ser hecho en forma eficaz una vez que el 'componente sobre el estudio básico' haya avanzado en el conocimiento del flujo de agua subterránea y del régimen de almacenamiento.

De la Implementación del Proyecto a la Gestión Transfronteriza del Acuífero

- En el MERCOSUR, hay una larga historia de cooperación en materia de aguas internacionales y existe una compleja red de tratados multilaterales y bilaterales, los cuales pueden afectar pero también apuntalar la presente iniciativa para la gestión del recurso de agua subterránea del SAG.
- Desde un principio no fue vista con buenos ojos la creación de una 'comisión del acuífero transfronterizo' semi-independiente, debido a los elevados costos de transacción que implicaba así como por el riesgo de perder el contacto con los asuntos, capacidades y procedimientos nacionales y estatales de gestión del agua subterránea. El modelo institucional preferido para el inicio fue la creación de un Comité Superior de Dirección del Proyecto del Guaraní (CSDP en español y portugués), con apoyo de una 'secretaría general del proyecto esbelta' (desarrollado como parte del actual proyecto) con la participación de las personas directamente responsables de los recursos de agua subterránea a nivel nacional (o sus representantes).
- Una posibilidad sería que el CSDP evolucionara a una estructura más permanente y se constituyera en un mecanismo para:
 - realizar consultas, evaluar conjuntamente y negociar explotaciones importantes del acuífero con efectos potenciales transfronterizos
 - movilizar inversiones para explotar localmente el agua subterránea y apoyar a las instituciones de gestión
 - desarrollar una 'visión compartida' del estado del recurso, del potencial del acuífero y de sus necesidades de gestión, así como promover acciones subsidiarias locales por medio de intervenciones de gestión apropiadas y procedimientos de gestión rutinarios.
- Es de esperarse entonces que se tenderá a que las decisiones de asignación del recurso se basen en evaluaciones pragmáticas del riesgo y de los posibles impactos, en lugar de enfoques arbitrarios como el de 'fuerza mayor' o extensión superficial, etc. Los puntos clave para desarrollar tanto una 'visión compartida' como la base para una gestión cooperativa son: (a) desarrollo de un conocimiento básico común, (b) sistemas de información compartidos, (c) protocolos de monitoreo acordados con propósitos claros, que alimenten a los modelos numéricos del acuífero en diferentes escalas (pero con condiciones de frontera compatibles) para evaluar las conexiones actuales, las dependencias existentes y los impactos potenciales, así como para predecir escenarios de gestión y explotación.

Figura 3: Interacciones de los proyectos piloto con los componentes nacionales y regionales del Proyecto SAG



Gestión en la Práctica: el Papel de los Proyectos Piloto

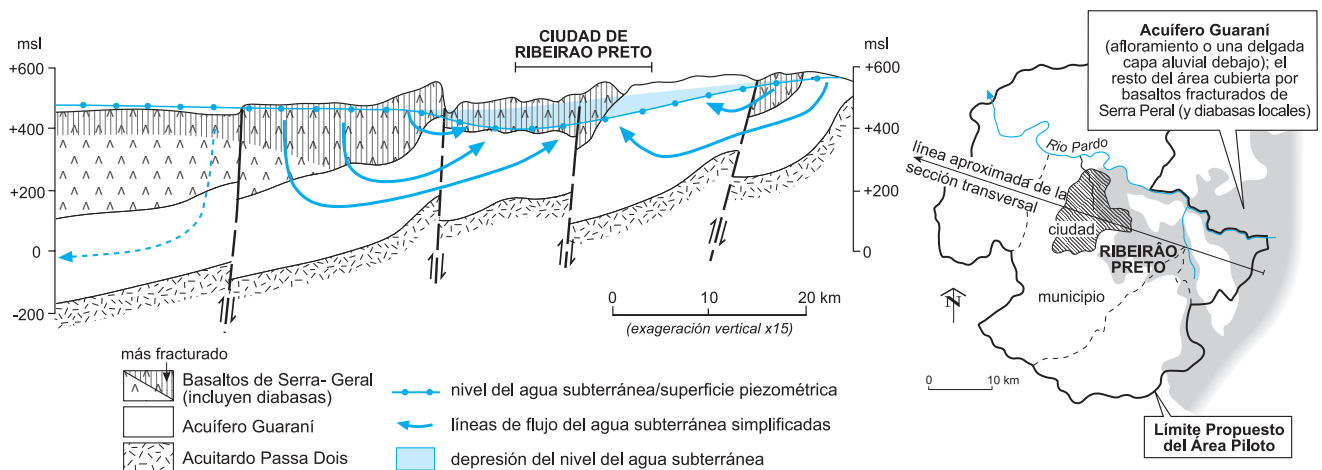
- Se identificaron y diseñaron 4 proyectos piloto para la gestión del agua subterránea, con el objetivo de identificar y promover acuerdos locales y acciones sobre ‘problemas tipo’ específicos de la gestión y protección del agua subterránea en el SAG. Dos proyectos son de carácter transfronterizo mientras que otros dos se restringen a un solo país y estado. Las interacciones entre los proyectos piloto y el proyecto global se presentan en la Figura 3.

Ribeirão Preto-Brazil

- El proyecto piloto de Ribeirão Preto (RP) se centra en la municipalidad del mismo nombre, localizada en la parte noreste del Estado de São Paulo, Brasil, con una población de 505.000 habitantes. Comprende un área de 651 km², que incluye 137 km² del afloramiento del acuífero Guaraní, pero que se extiende principalmente a los basaltos suprayacentes de Serra Geral (Figura 4).

- La infiltración a través del afloramiento de areniscas ocurre durante los meses de noviembre a marzo y se estima en 135 mm/año, aunque la zona de recarga del acuífero Guaraní se extiende mucho más allá de este afloramiento puesto que en donde la capa suprayacente de los Basaltos de Serra Geral es delgada, están densamente fracturados y permiten la percolación desde su zona freática (Figura 4) a una tasa menor de 50 mm/año debido a que sus suelos rechazan la mayor parte de la precipitación pluvial intensa.
- El área de Ribeirão Preto tiene una productividad agrícola importante, siendo los cultivos dominantes la caña de azúcar (para alcohol destilado), el café y la naranja para jugo. La ciudad también es un importante centro industrial, con empresas de destilación del combustible de alcohol, y en productos y servicios agro-industriales, y posee una amplia variedad de emprendimientos manufactureros muy activos.
- En la zona en general, el SAG es explotado con más de 1.000 pozos. El DAERP (Departamento de Águas e Esgotos) tiene 97 en operación muy activa con una producción de cerca de 3.700 l/s y una producción actual estimada en 65 Mm³/año, aproximadamente. Sin embargo, el grado de incertidumbre sobre la cantidad real de agua subterránea extraída es importante, pero se estima que ha crecido de 45 Mm³/año en 1976 a 96 Mm³/año en 1996.
- El proceso de la explotación del recurso de agua subterránea y la disminución del nivel freático ha reducido y, de hecho, prácticamente ha eliminado la descarga natural a las corrientes superficiales de agua (reemplazándolas casi totalmente con descargas de aguas residuales). La extracción excede la recarga actual del acuífero y en una amplia extensión de la ciudad los niveles freáticos han caído de 15 a 25 m en relación con el nivel de los años 1970. Entre los efectos colaterales observados se encuentran:
 - incremento de los costos de operación del suministro del agua potable, debido al abatimiento del nivel freático y la disminución de la productividad de los pozos a causa de haberse perdido las secciones superiores de sus ademes
 - pérdida del confinamiento del agua subterránea en algunos pozos
 - algunos cursos de agua que antes eran efluentes son ahora afluentes, lo cual incrementa el riesgo de contaminar el agua subterránea.

Figura 4: Esquema hidrogeológico y sección del área del Proyecto Piloto de Ribeirão-Preto

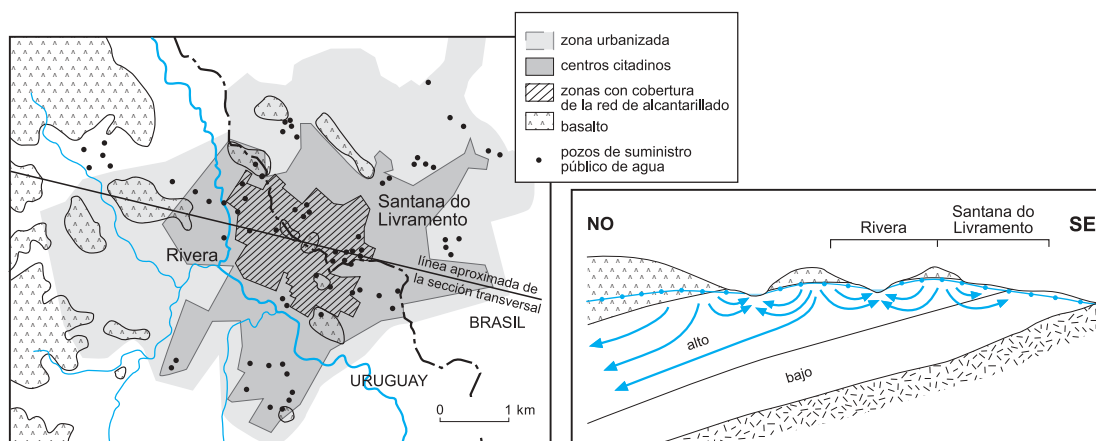


- La calidad del agua subterránea se reporta como buena, con excelente calidad microbiológica, salinidad total excepcionalmente baja, ligeramente ácida (pH de 6,0 a 6,5) y concentraciones de nitratos por debajo de 10 mg/l en los pozos de la DAERP. Los herbicidas móviles (terbutiourón, diurón, ametrina, etc.) ampliamente aplicados a la caña de azúcar, no han sido detectados en muestras de agua subterránea. Sin embargo, la zona vadosa es espesa (con frecuencia 30 a 60 m) y los ademes de alimentación de los pozos de agua son profundos, por lo que a los contaminantes persistentes provenientes de las actividades de saneamiento, los efluentes industriales y la agricultura, les llevaría muchas décadas migrar a tal profundidad, y es necesario evaluar la necesidad de aplicar medidas preventivas oportunas.
- La legislación estatal de São Paulo y los decretos municipales de Ribeirão Preto establecen varias medidas para la gestión y protección del acuífero que por lo menos son parcialmente puestas en práctica, pero requieren una mejor integración, aplicación y vigilancia de su cumplimiento mediante cooperación institucional e involucramiento de los usuarios. Adicionalmente, varias iniciativas locales contribuyen al desarrollo de una visión más holística del futuro:
 - el CBPH (Comité da Bacia Hidrográfica do Pardo) está promoviendo acciones para limitar la demanda de agua por parte de la población urbana
 - el IGSP (Instituto Geológico de São Paulo), con cooperación técnica alemana, inició la elaboración de mapas de la vulnerabilidad del acuífero, la evaluación del riesgo de contaminación y la definición de la zona de protección de la fuente de abastecimiento a nivel piloto.
- Los aspectos que deben ser atendidos con mayor urgencia por el Proyecto Piloto RP son:
 - en primer lugar, y antes que nada, promover la planeación del uso del suelo en la zona de recarga del Acuífero Guaraní, de forma congruente con su función principal como fuente de suministro de agua potable municipal de bajo costo y alta calidad; dicha acción se debe basar racionalmente en mapas de vulnerabilidad del acuífero, así como en la delimitación de áreas de protección de la fuente de abastecimiento de agua subterránea
 - en segundo lugar, evaluar los riesgos que representan para el agua subterránea las actividades de saneamiento, industriales y agrícolas, así como promover acciones para manejar aquellos que resulten significativos y probados; en particular, es necesario entender mejor el ciclo hidrológico urbano para realizar el manejo desde las fuentes de suministro hasta el reúso del agua
 - en tercer lugar, el consumo promedio actual de agua doméstica es muy alto, de 350 l/hab/d, y con una demanda total municipal que se estima ascenderá en 65% (para alcanzar 105 Mm³/año en 2020) como resultado del crecimiento poblacional a 830.000 habitantes; es preciso identificar medidas para disminuir dicha demanda en 20-30% y poder reducir la presión sobre el recurso de agua subterránea, así como también definir un valor mínimo sensato para la extensión de suelo que se debe proteger en beneficio del suministro de agua municipal potable
 - en cuarto lugar, a nivel de planeación es necesario considerar el desarrollo de la capacidad municipal para producir agua subterránea en las zonas confinadas que son las más protegidas del sistema acuífero, por una parte para reemplazar las fuentes con riesgo elevado de contaminación y, por otra parte, atender la creciente demanda de agua.
- A pesar de las limitaciones que pueda tener la calibración del modelo numérico del acuífero y las dificultades potenciales para definir sus condiciones de frontera, se considera que será una herramienta rigurosa para integrar todos los datos existentes y para verificar la bondad del modelo conceptual. Posteriormente, podrá servir para identificar necesidades clave de investigación y monitoreo, evaluar posibles escenarios de explotación y gestión, y facilitar el diálogo entre grupos interesados y autoridades. Este tipo de modelación del acuífero también permitirá definir las zonas de captura y de flujo alrededor de cada pozo municipal y campos de pozos como dato esencial para el ordenamiento territorial.

Rivera-Uruguay / Santana do Livramento-Brasil

- El proyecto piloto de Rivera / Santana do Livramento (R-SL, Figura 5) comprende un área de 750 km², montado sobre la frontera entre Uruguay (Departamento de Rivera) y Brasil (Estado de Río Grande do Sul), coincide con el afloramiento del Acuífero Guaraní y el nivel del agua subterránea en esa zona es somero. El flujo de agua subterránea se concentra principalmente en los horizontes más permeables del acuífero, en un espesor que varía entre 40 y 80 m, con dirección natural nor-este pero modificada por la extracción, la cual ha abatido los niveles del agua subterránea en alrededor de 5 m en los últimos 10 años.
- Las ciudades de Rivera y Santana do Livramento tienen una población conjunta de 170.000 habitantes, dividida en partes casi iguales, con un crecimiento rápido, y que viven e interactúan casi como una sola ciudad. La principal actividad económica se basa en la agricultura (ganado y ovejas de lana, producción de carne y pieles, uvas, maíz y cada vez más soja), y además en el lado uruguayo hay producción forestal y de madera. Las fuentes potenciales de contaminación son los rastros y los aserraderos.
- Ambas ciudades poseen una urbanización fragmentada como resultado de la topografía ondulante del terreno y la presencia de cañadas de arroyos, pero con zonas céntricas más densamente pobladas. La cobertura de la red de suministro de agua es elevada (superior a 95%) pero la de alcantarillado es muy limitada, de alrededor del 30% en Rivera y 40% en Santana do Livramento.
- El SAG es la principal fuente de suministro de agua con cerca de 170 pozos que incluyen los de Obras Sanitarias del Estado (OSE) en Rivera y los del Departamento de Aguas y Esgotos (DAE) en Santana do Livramento (Figura 5). Estos pozos abastecen hasta 5,1 y 8,7 Mm³/año aproximadamente, lo que representa alrededor del 70% y 100% del total del suministro público, respectivamente.

Figura 5: Mapa esquemático de la infraestructura de agua y sección hidrogeológica del área del Proyecto Piloto de Rivera – Santana do Livramento



- En general, la calidad del agua subterránea es buena, con bajo contenido de minerales por CaHCO_3 , pero con un pH ácido bajo (menor de 6,0) y se han reportado elevadas concentraciones de NO_3 (superiores a 50 mg/l) en el lado uruguayo. El principal problema de la gestión del agua subterránea se asocia con la falta de alcantarillado, que genera una carga sustancial de aguas negras a un acuífero de relativa alta vulnerabilidad a la contaminación, ya sea en forma directa de los pozos negros o indirecta a partir de corrientes contaminadas. La historia de tiraderos anárquicos de desechos sólidos municipales, la infiltración al suelo de una variedad de efluentes industriales y la existencia de varias gasolineras con mantenimiento deficiente, representan amenazas adicionales a la calidad del agua subterránea.

- Con objeto de promover el proyecto piloto se formó una Comisión Transfronteriza del Acuífero Guaraní (COTRAGUA), con representantes de cinco organizaciones de usuarios locales de cada país, que incluyen oficinas gubernamentales locales, empresas de agua (OSE y DAE), perforistas de pozos, varias ONG, y organismos relacionados con la agricultura, la hidrología y la salud pública. Sus funciones serán:
 - ayudar a integrar información técnica, económica, y legal relevante, y diseminarla a la comunidad
 - funcionar como el núcleo de levantamiento de información social y de promoción de las acciones que requieren participación comunitaria para la toma de decisiones relacionada con la gestión del agua subterránea, especialmente el monitoreo y la denuncia de perforación clandestina de pozos, así como vigilar el cumplimiento de la reglamentación sobre descargas contaminantes
 - coordinar los esfuerzos locales para desarrollar la capacidad de los grupos interesados.

Existen algunos acuerdos internacionales de carácter local, entre los que destaca el ‘Acuerdo sobre Cooperación Brasil-Uruguay en Materia Ambiental de 1992’, los cuales junto con la tradición cooperativa en temas de medio ambiente entre las dos ciudades, debería constituir un excelente punto de partida para la presente iniciativa.

- Los principales productos esperados del proyecto piloto R-SL son:
 - planificar el incremento de la cobertura de la red de alcantarillado y otras medidas de prevención de la contaminación en las zonas vulnerables del acuífero, en aras del interés común de preservar la calidad del agua subterránea
 - establecer zonas o perímetros de protección para las fuentes más importantes de suministro público de agua por medio del ordenamiento adecuado del uso del suelo (tanto urbano como rural), con el fin de asegurar su sostenibilidad y de proteger las inversiones realizadas en las fuentes mismas y en la infraestructura asociada.

Para estos propósitos se requiere desarrollar varias herramientas específicas de gestión (Tabla 4).

Tabla 4: Resumen de los resultados esperados y las herramientas de gestión correspondientes para el área del proyecto piloto de Rivera – Santana do Livramento

RESULTADOS ESPERADOS	HERRAMIENTAS DE GESTIÓN POR DESARROLLAR
Gestión Coordinada del Recurso Agua subterránea: – resolver conflictos – disminuir la contaminación del agua subterránea – proteger las fuentes de suministro público de agua – controlar la interferencia hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> • bases detalladas de datos hidrogeológicos locales y mapas accesibles a través del nodo local del sistema de información geográfica del acuífero (SISAG) • modelos conceptual y numérico del acuífero adecuados para evaluar escenarios de gestión del recurso y definir zonas de protección • estudio para el diagnóstico de los asuntos transfronterizos del agua subterránea, como son los efectos de interferencia hidráulica y el origen y transporte de la contaminación
Movilizar Inversiones para un Plan de Acción Conjunto para Mejorar el Saneamiento Urbano y el Ordenamiento Territorial	<ul style="list-style-type: none"> • sistema para la gestión coordinada del acuífero con reglas acordadas para el ordenamiento territorial, las áreas de protección de cabezales de pozos, y el espaciamiento, diseño, construcción y operación de pozos
Producción de Agua Subterránea para Suministro Público Concentrado en Campos de Pozos Protegidos de la Expansión Urbana Indiscriminada y de las Prácticas Intensivas de Agricultura	<ul style="list-style-type: none"> • mecanismo institucional de consulta y acuerdo sobre las propuestas de desarrollo futuro del recurso y las medidas de protección
Optimización de los Beneficios Socioeconómicos y Ambientales derivados del Uso Sostenible de los Recursos de Agua Subterránea	<ul style="list-style-type: none"> • plan conjunto de acción con mejoras prioritarias de la cobertura de alcantarillado y el depósito final del agua residual • red coordinada para monitorear el nivel, temperatura, calidad y uso del agua subterránea, así como el establecimiento de un sistema conjunto de información

Departamento de Itapúa – Paraguay

- El proyecto piloto del Departamento de Itapúa (DI) involucra predominantemente zonas agrícolas y ganaderas en 800 km² del extremo sureste de Paraguay, y abarca los distritos de Bella Vista, Jesús, Trinidad, Hohenau y Obligado. El afloramiento del Acuífero Guaraní constituye alrededor del 50% del área y el resto corresponde a flujos basálticos volcánicos de espesor variable. Unos 50 pozos han sido registrados por el Servicio Nacional de Agua y Saneamiento (SENASA), e inspeccionados por el proyecto en curso de asistencia técnica alemana junto con la Secretaría del Ambiente (SEAM). La profundidad de estos pozos varía entre 70 y 120 m aunque llega a los 300 m en áreas cubiertas por espesas capas de basaltos. Unos cuantos de los pozos más someros muestran signos de contaminación incipiente por nitratos.
- Originalmente, el área estaba poblada por indígenas del Guaraní, e incluye importantes sitios coloniales españoles (ruinas de misiones Jesuitas). Hoy en día la población de 45.000 habitantes es cosmopolita con inmigrantes provenientes de más de 20 países.
- Los principales objetivos de este proyecto piloto son:
 - revisar la evolución socioeconómica y agrícola de la zona para determinar su impacto en el agua subterránea del SAG
 - predecir las tendencias futuras e identificar las necesidades de acciones de gestión para asegurar el desarrollo sostenible del recurso de agua subterránea y proteger al medio ambiente
 - establecer el potencial del SAG para sostener la agricultura de riego
 - desarrollar la capacidad local institucional y de los usuarios para manejar el suelo y los recursos de agua subterránea.

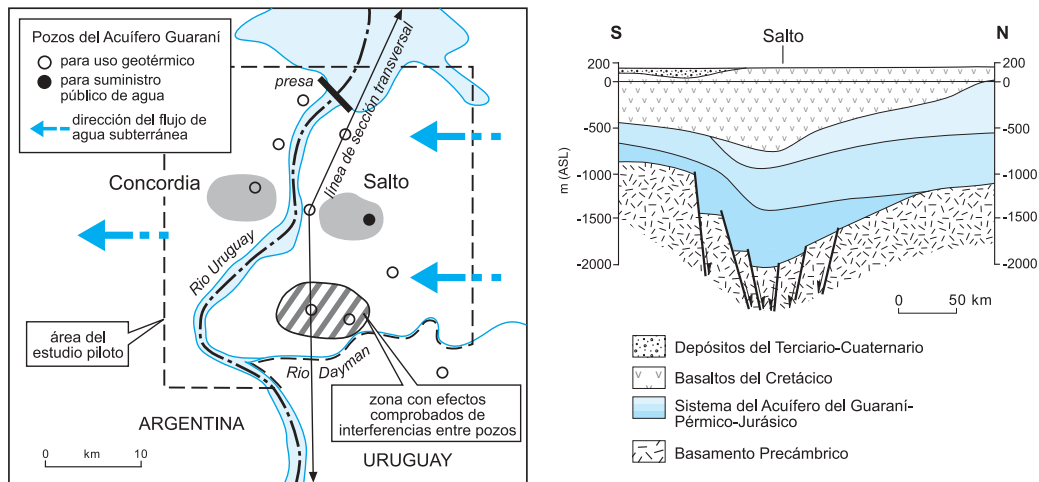
Es claro que para lograr el éxito del proyecto será necesario movilizar la participación de los ‘actores fundamentales’ de los sectores agrícola e hídrico, de los representantes locales del gobierno y de los líderes de la comunidad

- Algunos puntos de particular interés y de una relevancia más amplia para la protección del agua subterránea del SAG son:
 - el efecto de la deforestación sobre la recarga del SAG y su transformación en zona de pastoreo
 - el efecto de transformar las zonas de ‘pastoreo permanente’ en zonas con agricultura intensa (por ejemplo, con maíz y soya) en donde se aplican grandes cantidades de fertilizantes y de pesticidas
 - la importancia relativa de estos ‘procesos de desarrollo’ en áreas con suelos de diferentes características, con efectos más contrastantes entre las zonas de afloramientos de areniscas y las de basaltos
 - la vulnerabilidad relativa a la contaminación del SAG en las zonas debajo del afloramiento, con capas de areniscas de espesor variable.
- En el Proyecto Piloto del DI también se desarrollarán herramientas generales para la gestión del agua subterránea como las descritas para el proyecto piloto R-S (Tabla 4), por lo que no se presentan nuevamente aquí. También se generará un modelo integral de desarrollo sostenible del recurso agua subterránea y uso del suelo para los gobiernos provinciales y los diversos municipios que conforman el área.

Concordia-Argentina / Salto-Uruguay

- El Proyecto Piloto de Concordia/Salto (C-S) ocupa un área de 500 km² en ambas vertientes del Río Uruguay (Figura 6), que forma la frontera internacional entre Argentina y Uruguay. En contraste con las otras ‘áreas piloto de gestión’, aquí el Acuífero Guaraní se encuentra debajo de 800 a 1.000 m de flujos basálticos (Figura 6) y su agua subterránea presenta derrames artesianos y marcado potencial geotérmico (temperaturas de 44 a 48°C). El rendimiento de los pozos geotérmicos usualmente es de 100 a 300 m³/h, con profundidades de perforación de hasta 1.400 m. La parte superior fracturada de los basaltos, junto con una cubierta local de arenas del Terciario/Cuaternario conforman una fuente complementaria de ‘agua fría’ que se usa para suministro público y riego en baja escala.

Figura 6: Mapa hidrogeológico esquemático y sección transversal del área del Proyecto Piloto de Concordia-Salto



- El proyecto piloto de C-S también abarca la zona más poblada de la región fronteriza Argentina-Uruguay con alrededor de 200.000 habitantes, repartidos en forma aproximadamente igual en cada lado de la frontera. La principal fuente de ingresos en el área son las industrias cítrica y hortícola en expansión. Salto (Uruguay) es el área termal de balneario turístico más desarrollado en el MERCOSUR con más de diez años de desarrollo. A finales de los años 1990 el número de turistas anuales alcanzó la cifra de 368.000, lo cual generó ingresos por cerca de 58 millones de dólares y 3.500 empleos directos e indirectos. En contraste, Concordia (Argentina) apenas recientemente inició su primer complejo de desarrollo turístico termal. En esta zona el SAG no constituye una fuente significativa de agua potable, pues el suministro se hace fundamentalmente a partir de potabilizadoras que se abastecen del Río Uruguay y se complementa con algunos pozos someros de depósitos delgados y someros del Terciario y Cuaternario.
- Ambientalmente el SAG se encuentra bien protegido por la espesa cubierta superior de basaltos y su alto grado de confinamiento, y en este caso los problemas potenciales del agua subterránea principales son:
 - interferencia hidráulica entre pozos vecinos (a la fecha ya existen ocho pozos geotérmicos en una zona relativamente restringida), lo que reduce (e incluso puede llegar a eliminar) los derrames de flujo artesianos que son la atracción turística de la zona y puede también disminuir la temperatura del agua subterránea
 - riesgo de intrusión salina, proveniente del sur-sureste donde el SAG contiene agua termal con elevada salinidad de origen natural.

En general, el agua subterránea del SAG es del tipo Na-HCO_3 (bicarbonato de sodio). En las Termas de Daymán se ha observado un incremento de sodio de 135 a 205 mg/l en el período 1992-2000. Asimismo, el sodio y los cloruros han aumentado en pozos que extraen agua de las zonas más profundas, en algunos casos con incrementos de menos de 100 hasta más de 200 mg/l de cloruros.

- Muchos de los balnearios termales no cuentan aún con gestión adecuada de la demanda y del uso del agua, y por tanto hay necesidad de desarrollar y diseminar en la comunidad prácticas de gestión más eficientes del uso del agua geotérmica, que incluyan: (a) el reciclado, (b) el cultivo de jardines más atractivos, (c) la calefacción de algunos espacios en las instalaciones hoteleras, (d) el reúso y depósito final seguro de los efluentes (en particular si poseen una salinidad elevada), y (e) combinar convenientemente el recurso termal con el agua fría del acuífero somero para usos que no requieran agua caliente. También existe la necesidad apremiante de definir y aplicar buenos criterios estandarizados de diseño, construcción y operación de pozos termales, y evitar así el innecesario

ingreso del agua del acuífero somero de baja temperatura y/o la pérdida de la presión artesiana. En forma general, es necesario desarrollar la capacidad para la gestión de los recursos hídrico y geotérmico.

- Se formó un Comité Local de Apoyo al SAG—Proyecto Piloto Concordia/Salto—con representantes de los gobiernos locales, los municipios, y agencias provinciales y federales tanto de Argentina como de Uruguay, asociaciones de usuarios del agua geotérmica y de universidades, con las funciones siguientes:
 - coadyuvar en la integración de material relevante de carácter técnico, económico y legal, y en la divulgación de información a la comunidad
 - funcionar como el núcleo de levantamiento de información social y de promoción de las acciones que requieren participación comunitaria para la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua subterránea, e incluso la prevención de perforación clandestina de pozos
 - coordinar los esfuerzos locales para desarrollar la capacidad de los usuarios.
- Los arreglos institucionales actuales para la gestión del agua son diferentes en cada lado de la frontera. La Secretaría de Recursos Hídricos de Entre Ríos y las instituciones federales de los Departamentos Nacionales de Hidrografía y de Medio Ambiente (DNH & DENAMA) son los responsables respectivos en Argentina y Uruguay. Las disposiciones legales aplicables tienen muchos puntos en común (aunque también hay diferencias significativas) y podrían ser fácilmente la plataforma para desarrollar un 'conjunto de regulaciones legales paralelas'.
- El proyecto piloto de C-S tiene la finalidad de establecer las bases científicas e institucionales para la gestión sustentable y eficiente de los recursos hidrogeotermiales del SAG en una zona donde el acuífero se encuentra altamente confinado, y para lograrlo se desarrollará un 'juego de herramientas de gestión' (Tabla 5).

Tabla 5: Resumen de los resultados esperados y las herramientas de gestión correspondientes para el área del proyecto piloto de Concordia-Salto

RESULTADOS ESPERADOS	HERRAMIENTAS DE GESTIÓN POR DESARROLLAR
Gestión Coordinada del Recurso de Agua Subterránea: <ul style="list-style-type: none"> – resolver conflictos – preservar el flujo artesiano – conservar la temperatura del agua – minimizar la salinización Optimización de los Beneficios Socioeconómicos y Ambientales para el Uso de los Recursos Hidrogeotérmicos	<ul style="list-style-type: none"> • bases detalladas de datos hidrogeológicos locales, así como mapas accesibles a través del nodo local del sistema de información geográfica del acuífero (SISAG) • modelos conceptual y numérico del acuífero adecuados para evaluar escenarios de gestión del recurso • diagnóstico del potencial geotérmico transfronterizo • sistema para la gestión coordinada del acuífero con reglas acordadas para el espaciamiento, diseño, construcción y operación de pozos y para el uso del agua • mecanismo institucional de consulta y acuerdo sobre las propuestas de desarrollo futuro del recurso y de las medidas de protección • red coordinada para monitorear e intercambiar información sobre el nivel, temperatura, calidad y uso del agua subterránea,

Publicación

La Colección de Casos Esquemáticos del GW•MATE ha sido publicada en inglés por el Banco Mundial, Washington, D.C., EEUU. La traducción al español fue realizada por Héctor Garduño. También está disponible en formato electrónico en la página de Internet del Banco Mundial (www.worldbank.org/gwmate) y la página de Internet de la GWP – Asociación Mundial del Agua (www.gwpforum.org).

Los resultados, interpretaciones y conclusiones expresados en este documento son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Directorio Ejecutivo del Banco Mundial ni de los gobiernos en él representados.

Patrocinio económico



El GW•MATE (Groundwater Management Advisory Team – Grupo Asesor en Gestión de Aguas Subterráneas) es parte del Bank-Netherlands Water Partnership Program (BNWPP) y usa fondos de fideicomiso de los gobiernos holandés y británico.

