

Gestión Sustentable del Agua Subterránea

Conceptos y Herramientas

Colección de Casos Esquemáticos Caso 6

Argentina: Enfoque de Gestión Integrada Para la Conservación del Agua Subterránea en los Acuíferos de Mendoza

2002-2005

Autores: Stephen Foster y Héctor Garduño

Gerente de Proyecto: Alvaro Soler (Banco Mundial - LCR)

Organismo Contraparte: Provincia de Mendoza - Departamento General de Irrigación (DGI)

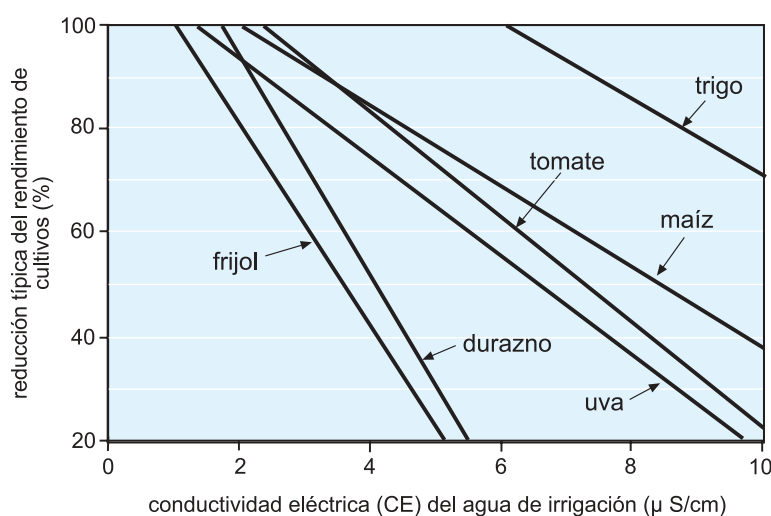
Este caso esquemático trata sobre el apoyo proporcionado al DGI-Mendoza (la agencia provincial reguladora de los recursos hídricos) como una forma de contribuir a los esfuerzos técnicos e institucionales realizados por esta agencia para conservar y proteger los recursos hídricos subterráneos en una región árida. El trabajo se llevó a cabo en coordinación con el ministerio provincial del ambiente (MAyOP). En dos zonas importantes de la provincia de Mendoza los procesos de salinización amenazan la buena calidad natural del agua subterránea y provocan preocupación por los viñedos y zonas frutícolas comerciales de la región que son sensibles a la sal. Las actividades en campos petroleros y la refinación que se llevan a cabo también en la región representan una amenaza adicional a la calidad del agua subterránea que incluso podrían hacerla inadecuada para el consumo humano. En la preparación de este documento se aprovechó mucha de la información resultante de diversas investigaciones que han sido publicadas y/o que fue proporcionada por el Instituto Nacional del Agua (INA) – CRA, CELAA y CRAS. Las actividades del GW•MATE fueron realizadas dentro del componente del DGI-Mendoza 'Calidad del Agua y Suelo' del programa PROSAP del Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo, con el apoyo de GWP-SAMTAC en el planteamiento del trabajo.

A: REVISIÓN DEL ENFOQUE GENERAL PARA LA GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

- El DGI aborda con iniciativa el suministro de los recursos hídricos para el desarrollo de la agricultura de irrigación y el abastecimiento con fines urbanos mediante un enfoque que procura integrar de forma más consistente al agua subterránea con la planificación de los recursos hídricos y el desarrollo de la infraestructura hidráulica que tienen una larga historia. Esto se ha facilitado gracias a que el DGI es la autoridad única y autónoma de los recursos hídricos en la provincia y a que cuenta con buenos registros hidrológicos así como con información sobre el uso del agua en la agricultura.
- La gestión de los recursos hídricos subterráneos inicialmente se enfocó a:
 - fomentar la perforación de pozos para irrigación en donde fuese factible pero en áreas fuera del área dominada por los canales de agua superficial existentes
 - permitir la perforación de pozos en zonas en las que los canales existentes no pudieran proporcionar un suministro confiable durante periodos de máxima demanda de agua de los cultivos.

Pero, en algunas zonas, ha habido problemas para llevar a cabo esta estrategia debido a que el comportamiento del acuífero no ha sido como se esperaba. En particular, la tendencia creciente a la salinización - que se ha desarrollado ampliamente en dos zonas de viñedos y huertos de exportación gracias a la irrigación intensa con agua subterránea (Figura 1) - está afectando la productividad.

Figura 1: Sensibilidad de una gama de cultivos a la salinidad del agua de irrigación



- Un componente importante de la estrategia general de gestión de los recursos hídricos subterráneos es el levantamiento detallado, apoyado con Sistemas de Información Geográfica (SIG), de los derechos existentes de uso así como de las prácticas de irrigación con agua subterránea y agua superficial (Figura 2), como base para conocer a los usuarios de agua, comprender los incentivos a los que responden y facilitar una mayor participación en la gestión del recurso.
- Se deben resaltar las características sociales y relativamente inusuales de Mendoza:
 - un alto porcentaje de importantes productores internacionales recién establecidos que utilizan métodos de irrigación modernos y muy eficientes entre los usuarios de agua subterránea
 - un predominio de pequeños propietarios de gran antigüedad que usan técnicas de irrigación tradicionales y poco eficientes entre los usuarios de agua superficial.

La reasignación de los recursos hídricos de los usuarios de agua superficial a los de agua subterránea, necesaria para realizar la gestión del acuífero, tiende a recibir fuerte oposición, a causa de fricciones sociales generalizadas y a que se alegan 'derechos de propiedad'. Por ello, se han buscado apoyos financieros para modernizar las formas de riego con sistemas presurizados de goteo y micro-aspersión, donde sea factible, a cambio de reducir los derechos de uso del agua.

Zonas de Agua Subterránea Vedadas

Se considera que la estrategia de establecer 'zonas de agua subterránea vedada' es una contribución útil a la gestión de los recursos hídricos subterráneos, porque permite controlar la extracción, y además hace posible lo siguiente:

- la construcción de más pozos con equipos ahorradores de energía (con igual rendimiento y para el mismo uso) para reemplazar pozos existentes, con la condición de sellarlos
- la reasignación de agua subterránea a usos de alto valor, al comprar y sellar los pozos existentes (con precios de venta que han excedido los US\$ 10.000), y perforar pozos equivalentes en zonas cercanas pero con una nueva ubicación— este mecanismo ha sido necesario puesto que la ley provincial de aguas no permite la comercialización de derechos de agua

Es importante destacar que una cláusula de la ley provincial de aguas exige el ‘uso benéfico’ y no permite el acopio de derechos de extracción de agua subterránea.

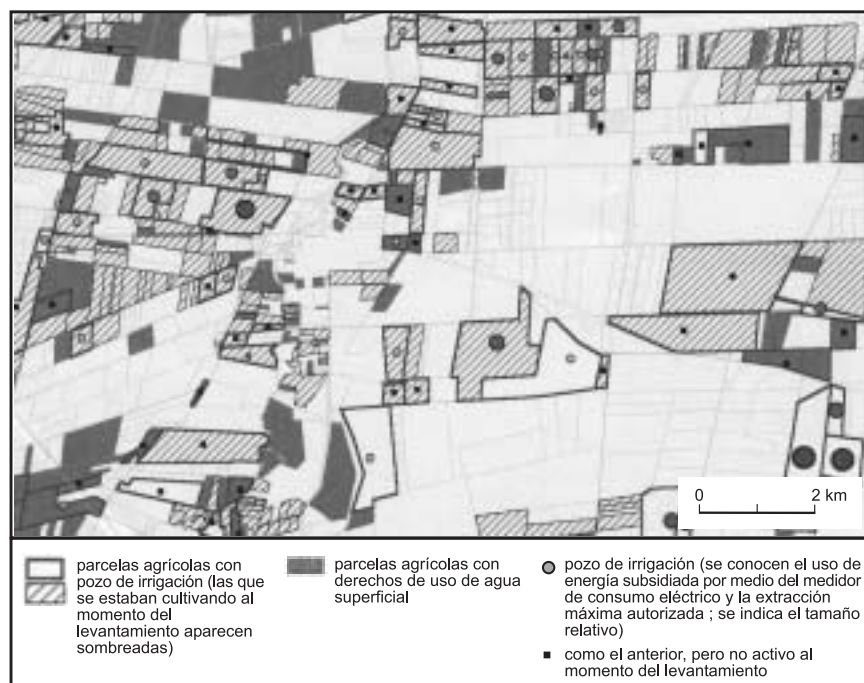
La ‘venta’ de asignaciones de agua superficial excedente (pero no de derechos) está permitida, con el DGI actuando como intermediario. Sin embargo, como el costo local de modernizar el riego es de 1000 US\$/ha aproximadamente, ello no representa en términos generales un incentivo lo suficientemente atractivo como para que quienes usan agua superficial para irrigación hagan inversiones en medidas para ahorrar agua. Además, el DGI aún no tiene ni la capacidad legal ni los recursos financieros adecuados para:

- transmitir el excedente de agua superficial, donde la haya, a zonas que no tengan derechos
- reducir los derechos en zonas ribereñas cuando el uso del agua sea ineficiente.

Medición de la Extracción y Cobro

- El sistema existente de derechos para la extracción y uso del agua subterránea en Mendoza estipula un cobro anual basado en el diámetro del pozo (como sustituto de la capacidad potencial instalada de bombeo), sin hacer distinciones relacionadas con la eficiencia del uso del agua para irrigación ni por el nivel de estrés hídrico del área en cuestión. El DGI podría incrementar considerablemente sus ingresos si tuviera un mejor nivel de recaudación y más aún si estableciera cobros diferenciales en zonas críticas (tales como las zonas de aguas subterráneas vedadas). Esto podría financiar la solución de problemas locales del recurso hídrico e intensificar el estudio de zonas problemáticas.
- La inversión para instalar medidores y los problemas operativos asociados, dificultan evaluar directamente la cantidad de agua subterránea que bombean los pozos de irrigación (a menos que los usuarios soliciten medidores y ellos mismos les den mantenimiento). Esto ha disuadido su instalación y se ha acudido a un procedimiento indirecto, mediante un proyecto piloto de tamaño adecuado, con la colaboración de EDEMSA, la empresa privatizada de energía eléctrica. Con este proyecto se explora el empleo de medidores de consumo eléctrico como apoyo para regular la extracción del agua subterránea. Para continuar con este desarrollo se requiere de un gran esfuerzo para consolidar, en una plataforma de SIG, el inventario de pozos de irrigación y hacer referencias cruzadas de éstos con el medidor de electricidad correspondiente. De esta forma se puede correlacionar el uso del agua subterránea con el consumo eléctrico (y cómo varía según la condiciones del pozo y de la bomba), y trazar un mapa de uso del suelo en términos del área cultivada y de los campos irrigados total o parcialmente con agua subterránea (Figura 2). Se considera que este enfoque tiene un potencial considerable en términos de:
 - la identificación de pozos de irrigación clandestinos y de bombeo excesivo en pozos existentes con derechos de extracción
 - el uso de las facturas de consumo eléctrico para el cobro de extracción de agua subterránea, lo que se traduce en una mejor a estimación del uso real en lugar de basarse en la capacidad potencial de extracción.

Figura 2: Detalle de un mapa de pozos para irrigación y uso de agua subterránea elaborado con SIG



- El tema del subsidio provincial de energía eléctrica es complejo, aunque hay pocas dudas de que en principio se podría reorientar de manera útil. Sin embargo, en la actualidad la mayoría de los usuarios paga unas 7 veces más por el agua subterránea que por el agua superficial para irrigación (Tabla 1), ya que:
 - históricamente, toda la infraestructura de agua superficial para irrigación ha sido subsidiada total o parcialmente, según su nivel
 - los usuarios de agua subterránea tienen que financiar la perforación de pozos, aunque sí se benefician del subsidio eléctrico provincial
 - el nivel de recaudación de tarifas de agua (cánones) aún no es adecuado para los usuarios de agua superficial y es muy bajo para los usuarios de agua subterránea.

Tabla 1: Comparación del costo agrícola para usuarios de agua subterránea y de agua superficial en irrigación agrícola

COMPONENTE DE COSTO	POZOS DE AGUA SUBTERRÁNEA	CANALES DE AGUA SUPERFICIAL
Permiso para Construir	20-40 US\$/año/pozo	no aplicable
Tarifa por Uso del Recurso Hídrico		10 -15 US\$/año/ha irrigada
Costos de Operación y Mantenimiento	cubiertos parcialmente por la tarifa del DGI/AUA, pero también se incluye abajo	algunos costos locales están incluidos en la tarifa de DGI/AUA, pero otros los solventa el gobierno local
Provisión para Depreciación del Capital	se incluye en el cálculo de abajo	el gobierno local proporciona la infraestructura hidráulica sin recuperación de costos
Costo Típico Equivalente al Regante	0.015 US\$ /m ³ **	0.002 US\$ /m ³

* expresado como US\$ pero basado en costos en pesos argentinos en junio de 2002, con un tipo de cambio de aproximadamente 3.0 pesos/US\$

** después de deducir un subsidio de aproximadamente 240 US\$/año

Participación de los Usuarios de Agua en la Gestión del Recurso

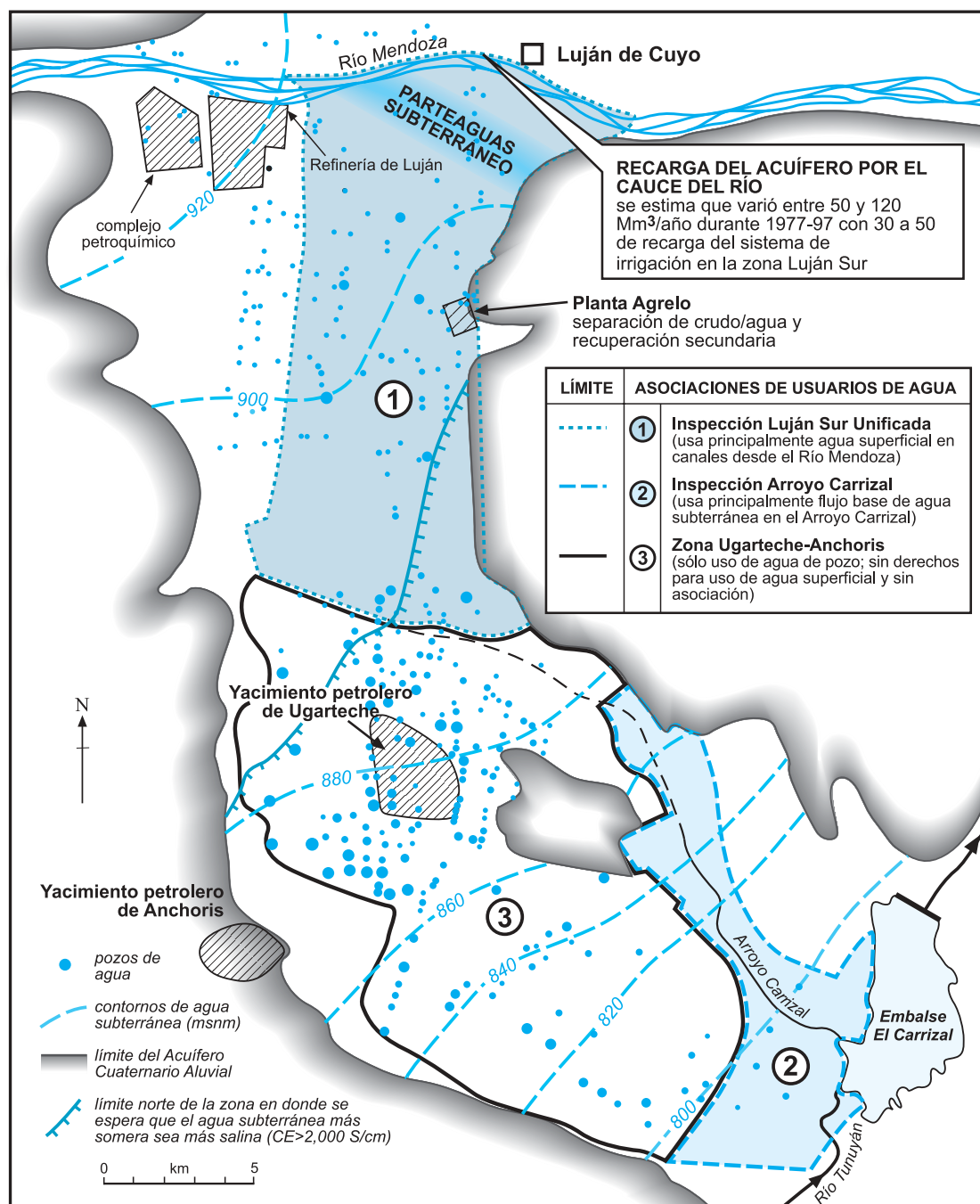
- Las asociaciones de usuarios de agua (AUA), conocidas a nivel local como 'Inspecciones de Cauce' y basadas en la infraestructura primaria de canales de irrigación con agua superficial, han sido exitosas. Recientemente, el DGI está ensayando en áreas piloto transferirles también algunas responsabilidades de gestión del recurso hídrico subterráneo, como el cobro de las cuotas, la medición del uso del agua y la actualización del inventario de pozos.
- Sin embargo, hay factores importantes que impiden involucrar más a los usuarios en la gestión de los recursos hídricos subterráneos:
 - históricamente, las AUA se organizaron en torno a los canales primarios de irrigación, y ni su escala territorial ni sus límites son adecuados para la gestión de acuíferos
 - los regantes que sólo usan agua subterránea ubicados fuera de los límites de las AUA están renuentes a afiliarse y contribuir a las AUA vecinas, pues se dice que no hay 'beneficios visibles' para los usuarios de agua subterránea
 - las AUA, por lo general, no logran alcanzar un alto nivel de cobro de cuotas y no se ha establecido un mecanismo para sancionar a las que sean poco efectivas en las tareas que se les asignan
 - se corre el riesgo de que algunas AUA se conviertan principalmente en 'grupos de cabildeo político' para buscar aumentar su suministro con agua superficial subsidiada.
- Por lo tanto, el enfoque preferible es promover la formación de una organización de gestión de acuíferos (OGA) para la sub-cuenca, que involucre a los usuarios de agua subterránea (que de preferencia estén agrupados en una AUA nueva), representantes de las AUA existentes, la empresa pública de servicios de agua y otros grupos interesados. La existencia de AUA fuertes basadas en los canales de irrigación es una complicación que debe superarse. La existencia de una OGA también es importante para el desarrollo y la aceptación de políticas eficaces que controlen y mitiguen los efectos de la contaminación local del agua subterránea.
- Sin embargo, se reconoce que la combinación de las disputas legales en curso para obtener 'indemnización por daños individuales' en algunas zonas con la intervención de la Fiscalidad del Estado, ha producido un clima social que dificulta al DGI promover la participación comunitaria en la gestión del agua subterránea en tanto no se genere un entendimiento técnico inequívoco e incontrovertible.

B: GESTIÓN DEL RECURSO Y PROTECCIÓN DE SU CALIDAD EN EL ACUÍFERO CARRIZAL

Principales Inquietudes sobre el Agua Subterránea

- La Sub-Cuenca Carrizal, que ocupa 240 km² del Departamento Luján de Cuyo, es un paleo-valle ubicado entre los cursos actuales de los ríos Mendoza y Tunuyán (Figura 3). La parte norte del valle está llena de depósitos Cuaternarios de piemonte, que forman un importante acuífero no confinado de alta permeabilidad, pero hacia el sur el espesor de estas gravas disminuye abruptamente (Figura 6), y la línea de flujo hacia el Río Tunuyán se ubica parcialmente en una Formación Terciaria (Mogotes).

Figura 3: Bosquejo del sistema acuífero Carrizal



- La recarga natural de agua subterránea ocurre por infiltración a lo largo de 10 km del lecho del Río Mendoza. La descarga del acuífero crea el Arroyo Carrizal (tributario del Río Tunuyán). La tasa de recarga a través del lecho fluvial (determinada mediante la diferencia de los caudales medidos) varía considerablemente con el régimen del flujo del río, pero se estima que en promedio fue de cerca de 85 Mm³/año en el periodo 1979-94. Además, se estima que otros 40 Mm³/año que en promedio se derivan para irrigación en la zona de Luján Sur recargan el agua subterránea.

- Los probables incrementos o decrementos en la recarga por el cauce del río, resultantes de la derivación del flujo para generación de energía en la nueva presa de Potrerillos, añaden una nueva dimensión a la gestión del recurso hídrico subterráneo. El régimen del flujo en el río empezó a cambiar en el año 2000 y a principios de 2003 inició la derivación completa, con lo cual se reduce en más del 60% la longitud del cauce en donde ocurre la recarga, pero también se producen condiciones de ‘infiltración de aguas claras’ tanto en el cauce del río como en el sistema de distribución de irrigación de la zona.
- Tradicionalmente, el ‘valle’ del Carrizal (con una precipitación anual de unos 200 mm/año) era una zona hortícola, pero durante la década de 1990 se descubrió que su suelo y micro-clima eran ideales para la producción de vinos y frutales con calidad de exportación. Como resultado, ha habido importantes inversiones para el desarrollo de la agricultura de irrigación, y la extensión total cultivada ha alcanzado de 12,000 a 14,000 ha, de las cuales 9,000 cuentan con sistemas presurizados y 1,500 tienen irrigación por goteo.
- Mucha de la explotación agrícola reciente se ha basado en el uso eficiente pero intenso de los recursos hídricos subterráneos, y en la actualidad hay de 600 a 700 pozos de producción activos en el valle, lo que genera inquietud por el abatimiento de los niveles del acuífero y la competencia entre los usuarios del agua subterránea, así como entre ellos y quienes dependen de la descarga del acuífero en el Arroyo Carrizal. Por este motivo, se declaró una ‘zona de agua subterránea vedada’ en 1997, ya que la demanda estimada excedía los recursos disponibles en años en los que la recarga por el cauce era inferior a la media.
- La yuxtaposición de una industria petrolera - igualmente importante en el valle -, que data de la construcción en 1943 de la Refinería Luján de Cuyo de YPF (Yacimientos Petrolíferos Federales, organismo argentino reemplazado por la empresa multinacional REPSOL que opera actualmente) en la punta norte de la sub-cuenca, (Figura 3), ha provocado peligros ambientales significativos, como es la preocupación por la contaminación con hidrocarburos del agua subterránea. Los campos petroleros de Ugarteche y Anchoris en la parte sur del valle todavía están en producción activa, y junto con las industrias petroquímicas asociadas han incrementado el riesgo de contaminar el agua subterránea—especialmente por la generación de agua salina en el campo petrolero (Tabla 2) así como por las fugas y derrames de hidrocarburos. Actualmente, las inquietudes sobre la calidad del agua subterránea y las necesidades de protegerla son prioritarias para la agencia reguladora.

Tabla 2: Características químicas del ‘agua de formación’ del campo petrolero Ugarteche

PARÁMETROS MAYORES		PARÁMETROS MENORES	
parámetro	rango (mg/l)	parámetro	rango (mg/l)
CE (conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$)	70.000 – 75.000	B (boro)	10
Cl (cloruro)	19.000 – 26.000	Li (litio)	5
Na (sodio)	2.000 – 16.000	Sr (estronecio)	25 – 30
SO ₄ (sulfato)	900 – 1.100	As (arsénico)	0,04 – 0,08
K (potasio)	220 – 250	Cd (cadmio)	0,02 – 0,07
N (nitrógeno inorgánico)	5 – 25	Cr (cromo)	menor que 0,01

Figura 4: Perfil hidrogeológico a lo largo de la dirección del flujo en el sistema acuífero Carrizal

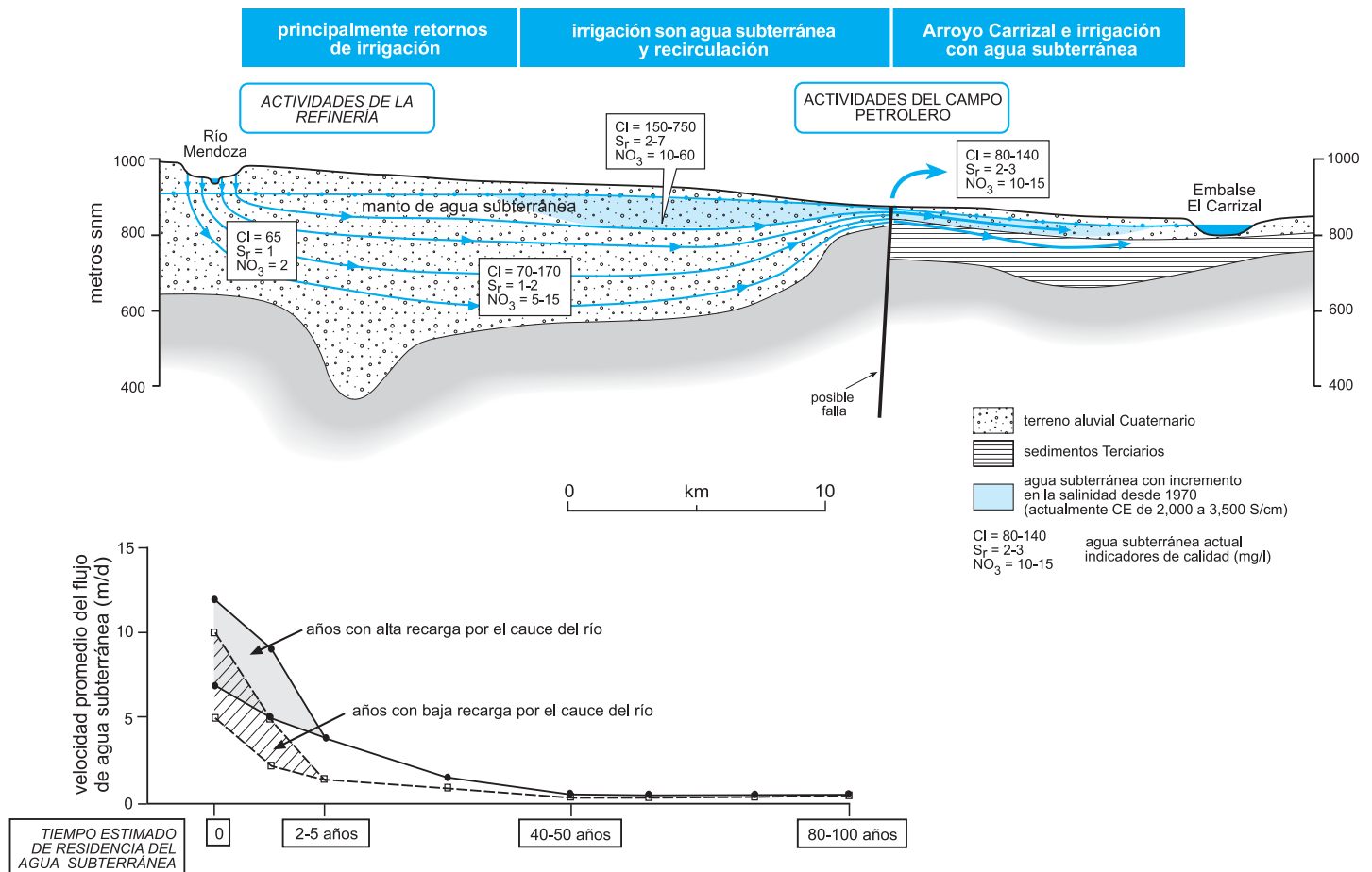


Figura 4: Perfil hidrogeológico a lo largo de la dirección del flujo en el sistema acuífero Carrizal

Programas Cooperativos de Investigación

El DGI está tratando de resolver los conflictos mediante un programa agresivo ('proactive') de gestión y protección del agua subterránea. El paso inicial para resolver estos conflictos ha sido promover una serie de acuerdos de cooperación con otros grupos interesados, con el fin de mejorar la comprensión científica del comportamiento de los acuíferos. Este 'enfoque participativo' (que involucra organismos tanto públicos como privados) pretende ampliar progresivamente la participación de los grupos interesados para fomentar una comprensión firme y colectiva de los problemas. Representa la mejor opción factible para movilizar la inversión y la cooperación adecuadas para lograr una gestión efectiva de los recursos hídricos subterráneos del valle, y actualmente incluye los siguientes componentes:

- **INA-CRA y CELLAA:** Modelación Numérica del Acuífero Carrizal como base para el Análisis Técnico y Económico de Medidas Potenciales para la Gestión del Recurso Hídrico
- **REPSOL-YPF:** Evaluación y Remediación de los Riesgos de Contaminación por Hidrocarburos en la Refinería Luján de Cuyo
- **MAyOP e INA-CRAS:** la Evaluación de Problemas de Salinidad en el Agua Subterránea

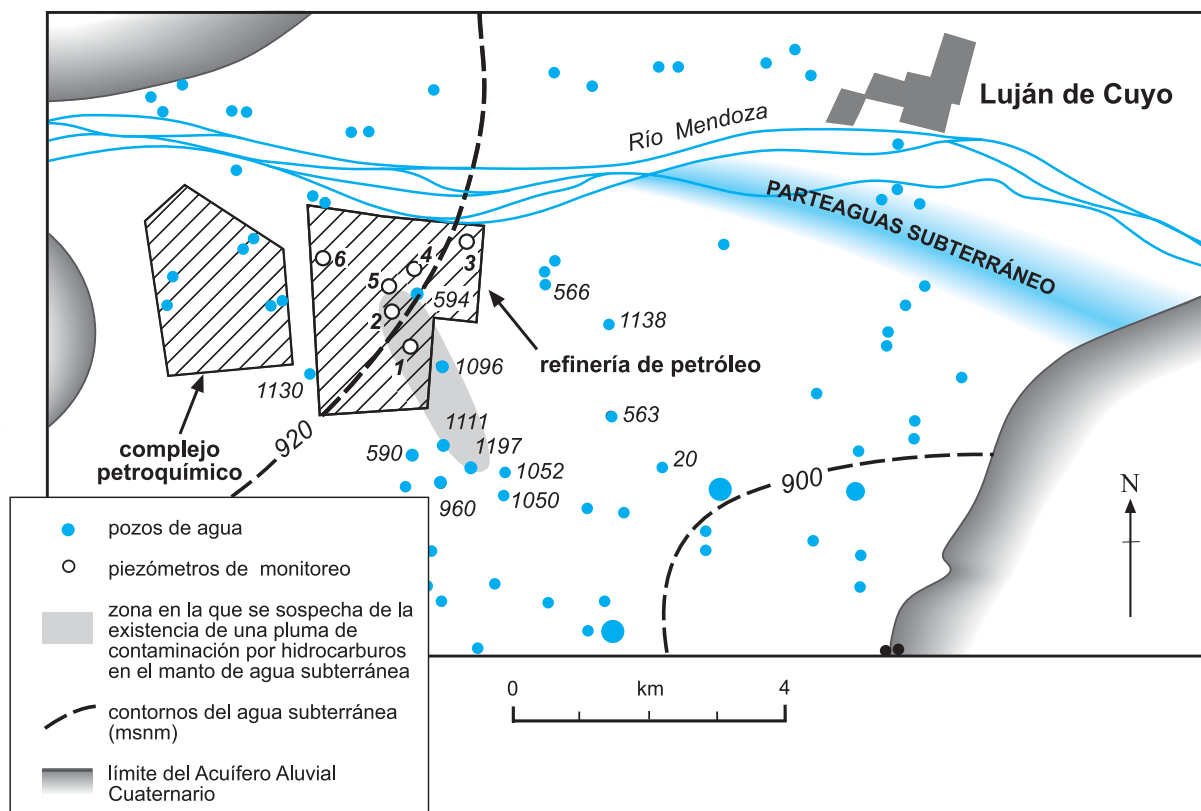
Modelación Numérica del Acuífero Carrizal

- La elaboración del modelo del acuífero (con el programa Modflow) es una herramienta clave para la gestión del recurso hídrico subterráneo – puesto que puede proporcionar una plataforma de fácil comprensión para el usuario ('user-friendly') para la evaluación y sobre el régimen de flujo del acuífero, los posibles escenarios de los recursos y las acciones de gestión – y para la comunicación con los grupos interesados.
- El desarrollo del modelo requirió de un importante trabajo en campo para mejorar las bases de datos existentes sobre la estructura hidrogeológica y los patrones de extracción y uso de los pozos de irrigación. Se ha logrado una calibración satisfactoria de los niveles de agua subterránea para el período 1979-99 (un período con escurrimiento superficial y recarga por el cauce del río relativamente abundantes) mediante la utilización de valores razonables para los parámetros del acuífero (K y Sy con valores máximos de 50m/d y 0,20, respectivamente), aunque todavía existen incertidumbres sobre la descarga al Arroyo Carrizal y la descarga superficial hacia el Valle Tunuyán.
- Las implicaciones del modelo, con su calibración actual, son:
 - el equilibrio a largo plazo del sistema de agua subterránea, pero con extracciones significativas del almacenamiento del acuífero (hasta 60 Mm³/año)
 - un parteaguas subterráneo entre el acuífero carrizal y el Oasis Norte en Mendoza cuya posición varía significativamente (hasta 3 km) en periodos con recarga inferior al promedio
- El modelo tiene un potencial considerable para varias aplicaciones, desde ser una guía para la gestión del recurso hasta evaluar problemas de calidad, incluyendo particularmente:
 - la evaluación de escenarios de gestión – tales como (la posibilidad de) relajar el 'control de restricción de área' y permitir un aumento en la extracción o (la probable necesidad de) imponer controles más estrictos y reducir la extracción para conservar la calidad del agua
 - evaluar los impactos de la operación de la nueva presa Potrerillos en el sistema acuífero, como resultado de cambios en el régimen de recarga en el río Mendoza y sus canales de irrigación
 - ubicaciones preferibles de la derivación de agua superficial adicional a la zona para sustituir agua subterránea y/o para mejorar directamente la recarga del acuífero (que sería posible cuando el escurrimiento en el río Mendoza excediera 80m³/s)
 - utilizarlo como punto de partida para una modelación más detallada que permita evaluar la influencia del flujo de agua subterránea en el transporte potencial de contaminantes en la vecindad del complejo de la refinería REPSOL-YPF
 - proporcionar la base física para modelar el balance de sales y los problemas de salinidad del agua subterránea a nivel de acuífero.
- Sin embargo, es necesario evaluar los siguientes aspectos del modelo de agua subterránea existente antes de que pueda considerarse como una herramienta robusta de gestión.
 - la recarga del río Mendoza fue estimada a partir del escurrimiento del río con una relación empírica (basada en mediciones incrementales del flujo a principio de los 80) cuya validez puede cuestionarse a causa de: (a) los depósitos formados durante los siguientes años en el cauce del río inmediatamente aguas arriba de la estructura de derivación Cipoletti, y (b) los cambios en el régimen del escurrimiento en el río y el fenómeno de aguas claras asociado con la construcción y operación de la presa Potrerillos aguas arriba, que deben tomarse en cuenta a partir de 2000 y ser pronosticados hacia el futuro
 - las condiciones de la descarga del acuífero, tanto a través de la frontera sur del acuífero hacia el valle Tunuyán (la descarga promedio actual simulada es de 45 Mm³/a) como el régimen general del drenaje natural hacia el arroyo carrizal (las derivaciones para irrigación dificultan las mediciones en el mismo curso de agua)

Riesgos de Contaminación por Hidrocarburos en la Refinería de Luján de Cuyo

- La refinería Luján de Cuyo está ubicada en la margen sur del río Mendoza en el área de recarga del Acuífero Carrizal (Figura 5). La subyace una zona vadosa espesa (típicamente 100 m o más) pero con amplias fluctuaciones en el manto de agua subterránea durante los años con escurrimiento abundante en el río. Por lo tanto, a pesar de los depósitos aluviales de alta permeabilidad en el piedemonte, la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación es apenas moderada (con una capacidad importante para atenuar los contaminantes mediante acción capilar, sorción, volatilización y biodegradación en la zona vadosa). Sin embargo, si esta capacidad de atenuación fuera excedida por una carga contaminante, podrían desarrollarse extensas plumas de contaminación como resultado de los flujos rápidos de agua subterránea (Figura 4) asociados con una alta permeabilidad del acuífero y un gradiente hidráulico empinado

Figura 5: Croquis de la porción septentrional del valle Carrizal que muestra la refinería Luján de Cuyo



- Históricamente se han registrado evidencias aparentes de contaminación por hidrocarburos en algunos pozos de agua en la vecindad general de la refinería, y el trabajo realizado por el INA-CRAS para YPF sugería que:
 - hasta alrededor de 1995, un afluyente de la refinería de 50 a 75 l/s (con un probable contenido alto de COD (carbono orgánico disuelto), HC (hidrocarburos) y salinidad se infiltró de un terreno de 10 ha en el oriente del sitio de la refinería
 - en 1993 se detectaron en una pluma importante de contaminación del agua subterránea (con probable contenido de hidrocarburos) los siguientes indicadores indirectos: CE, OD (oxígeno disuelto), DQO (demanda química de oxígeno), Eh (potencial redox)
 - indicios de que esta pluma migró por lo menos 3 km al SSE hacia 1996, pero basados en un procedimiento de muestreo y con datos analíticos con numerosas inconsistencias y limitaciones

- la refinería Luján de Cuyo quedó bajo la administración de REPSOL en 1998 (después de la privatización de YPF en 1993) y ambas llegaron a un acuerdo con el DGI en 2002 sobre la instalación de una red de piezómetros para monitorear la calidad del agua subterránea dentro de las instalaciones de la refinería con objeto de investigar e identificar cualesquier problemas potenciales de contaminación del agua subterránea. Durante 2003-04 se completó la instalación de esta red (6 piezómetros, de los cuales 4 cuentan con el diseño más deseable). En noviembre de 2003 el piezómetro No. 1 (Figura 4) reveló una importante contaminación por hidrocarburos en el manto de aguas subterráneas profundo y esto fue confirmado posteriormente por el piezómetro No. 2. Los siguientes valores fueron registrados en abril de 2000: HTP (Hidrocarburos totales del petróleo) menores que C7 = 19 y 97 mg/l, BTEX (benceno, tolueno y xileno) = 9 Y 14 mg/l, MTBE (metil terbutil éter) = 12 y 27 mg/l. La fuente de esta contaminación reciente (posiblemente activa) del 'producto final de la refinería' parece estar ya sea en la zona de carga de los camiones para transportar petróleo o en la estación de bombeo en la cabecera de la tubería externa principal (y hay que considerar que el MTBE es un indicador persistente útil de los combustibles de hidrocarburo procesados después de 1995).
- La inspección de los pozos de agua que, como parte de su función de regulación, el DGI ha emprendido desde 2000 en la vecindad de la refinería Luján de Cuyo, ha mostrado que los pozos (DGI No. 1096 y 1197) están siendo afectados por el mismo conjunto de contaminantes, y otros cuatro (hasta 2 km de la refinería) presentan contaminación incipiente (Figura 4).
- Ante esta situación, se recomendó al MAYOP y al DGI que aceptaran cualquier intervención razonable de corto plazo propuesta por REPSOL-YPF, sin comprometer la estrategia de largo plazo. Dadas las condiciones hidrogeológicas prevalecientes, el plan inicial de acción comprendió:
 - reemplazar los dos pozos seriamente contaminados con pozos mucho más profundos, sellando cuidadosamente los 200 m de estratos superiores
 - evaluar el suelo contaminado y las responsabilidades ambientales del sitio de la refinería (utilizando datos operacionales históricos y el muestreo pasivo suelo-gas de PETREX), y actuar para remediar cualquier fuga del producto especialmente en la vecindad de los piezómetros Nos. 1 y 2
 - seguir un enfoque de 'bombear y tratar' en la vecindad del piezómetro No. 1, que debería tener la ventaja de interceptar la mayor parte de la descarga de los hidrocarburos pero podría tener la desventaja de no removerlos necesariamente de la matriz del acuífero.
- El MAYOP y el DGI han acordado con REPSOL-YPF movilizar una 'consultoría internacional independiente' durante un año (a través de la universidad local—la Universidad Nacional de Cuyo) para desarrollar un plan de acción a largo plazo con énfasis en lo siguiente:
 - revisar con detalle la situación actual de la contaminación del agua subterránea (incluyendo el efecto de variaciones importantes en el nivel del agua subterránea en el sitio) y evaluar si la pluma de contaminación del agua subterránea actual está en crecimiento, estable o en contracción
 - emprender la evaluación del riesgo identificado de contaminación del agua subterránea actual y futura, y preparar un plan de gestión del riesgo para eliminar la contaminación del agua subterránea que está ocurriendo
 - proponer otras prioridades para fortalecer y ampliar la red actual de piezómetros para muestrear el agua subterránea
 - delinear las sub-zonas de control y las acciones correspondientes para mitigar el problema, incluyendo restricciones en el uso del agua subterránea y fuentes de abastecimiento alternas, atenuación natural de la contaminación monitoreada y, si fuera necesario, una remoción de contaminantes más agresiva ('proactive').

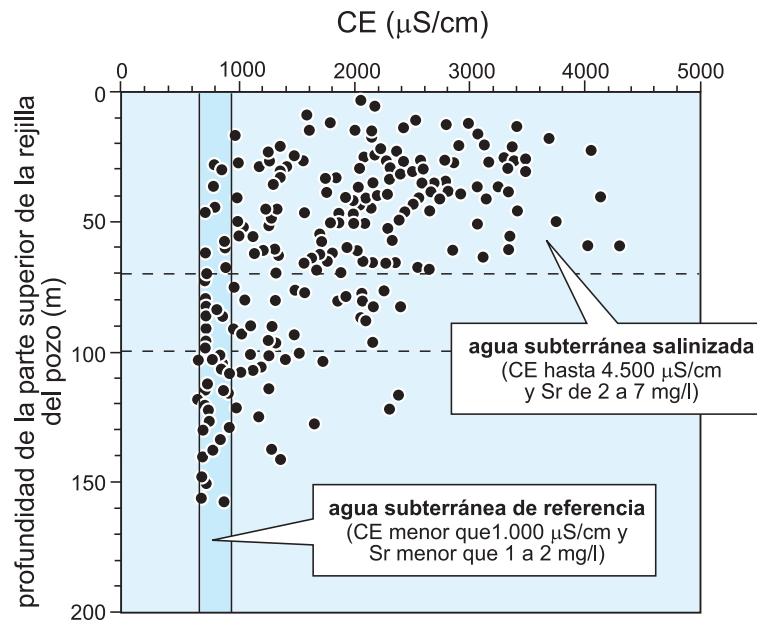
Evaluación de los Problemas de Salinidad del Agua Subterránea

- Este proyecto tiene varios objetivos interrelacionados:
 - levantamiento de campo en tres dimensiones de la distribución de la salinidad del agua subterránea en la parte meridional del Acuífero Carrizal en la zona conocida en ocasiones como Ugarteche-Anchoris
 - evaluación de los probables orígenes de la salinización del agua subterránea (incluyendo el lixiviado de los suelos desérticos durante la habilitación de la agricultura de irrigación, el fraccionamiento de las sales del agua subterránea y los agroquímicos ocasionado por la agricultura de irrigación, la infiltración del agua salina generada a causa de derrames históricos o descarga durante la explotación primaria del reservorio de petróleo y/o en la recuperación secundaria, y el flujo de entrada lateral y la infiltración de cursos de agua superficiales efímeros salinos)
 - identificar posibles trazas de contaminación por hidrocarburos en partes de la zona.

Los resultados de esta primera etapa del programa de investigación indican:

- una clara estratificación general de la salinidad del agua subterránea con valores significativamente altos de CE (2.500 a 4.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) hasta los 70 m por debajo de la superficie del suelo y más profundo en algunos sitios, mientras que los pozos con rejillas de entrada más profundas registran 1.000 a 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 6), comparado con valores implícitos de 1.800 y 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente para agua subterránea más somera y más profunda obtenidos durante un reconocimiento preliminar efectuado por el PNUD a finales de los 60
- otros elementos mayores (tales como Na, Cl, SO_4 y NO_3) y algunos elementos menores (Sr y Li) muestran una distribución semejante
- el cuerpo de agua subterránea con una salinidad hasta cierto punto elevada no mostró trazas de contaminación por hidrocarburos, y las condiciones fuertemente oxidantes del agua subterránea encontradas por todas partes sugieren que una contaminación menor del manto de aguas subterráneas con hidrocarburos podría haberse degradado rápidamente
- el Acuífero Cuaternario es más delgado y su distribución es más discontinua en la parte más meridional de esta zona de lo que originalmente se había anticipado, y la mayor parte de la circulación del agua subterránea ocurre en la Formación Mogotes Terciaria subyacente altamente intemperizada (que tiene una firma hidroquímica distintiva pero no necesariamente más salina).
- La distribución relativamente uniforme del agua subterránea hasta cierto punto salinizada sugiere de alguna manera que el régimen actual del flujo de agua subterránea, el uso en irrigación y el flujo de retorno contribuyen significativamente al problema. Es necesario hacer una evaluación adicional de su importancia y la posible contribución del agua de formación del reservorio de petróleo y/o los flujos de entrada lateral naturalmente salinos, mediante:
 - la extensión del área de levantamiento hidrogeoquímico hacia el norte dentro de la zona irrigada principalmente con agua superficial
 - utilización del modelo numérico existente del acuífero para confirmar el tiempo de residencia del flujo de agua subterránea del cauce del río Mendoza (y la recarga con agua superficial de irrigación) hacia la descarga del acuífero en el Arroyo Carrizal (Figura 4) y el nivel de recirculación implícita del agua subterránea y las sales mediante el uso en irrigación, dado que ésta se restringe principalmente a los meses de octubre a marzo
 - utilización de análisis de isótopos estables (2H y 18O) de muestras de una selección hidroquímicamente representativa de pozos de agua para hacer una investigación adicional sobre el origen de los incrementos observados en la salinidad del agua subterránea.

Figura 6: Correlación de la salinidad del agua subterránea y la profundidad de la rejilla del pozo en la parte meridional del Acuífero Carrizal (datos de 2003)



- También hay algunas indicaciones de la presencia de ciertos elementos traza tóxicos (principalmente Cd y Cr) en algunos pozos más someros de abastecimiento de agua potable superiores a los estándares nacionales, pero los ensayos analíticos comparativos de laboratorio iniciales todavía no se habían confirmado en octubre de 2004. Es necesario emprender trabajo adicional (incluyendo controles de calidad analítica en los laboratorios, evaluación de los orígenes posibles, evaluación del riesgo a la salud, etc.)— y si se verifican los niveles hay que desarrollar un plan de emergencia para el abastecimiento de agua y evaluar el posible impacto en los suelos irrigados y en los cultivos (aún cuando no es probable que esto resulte más importante que el impacto mismo de la salinidad).

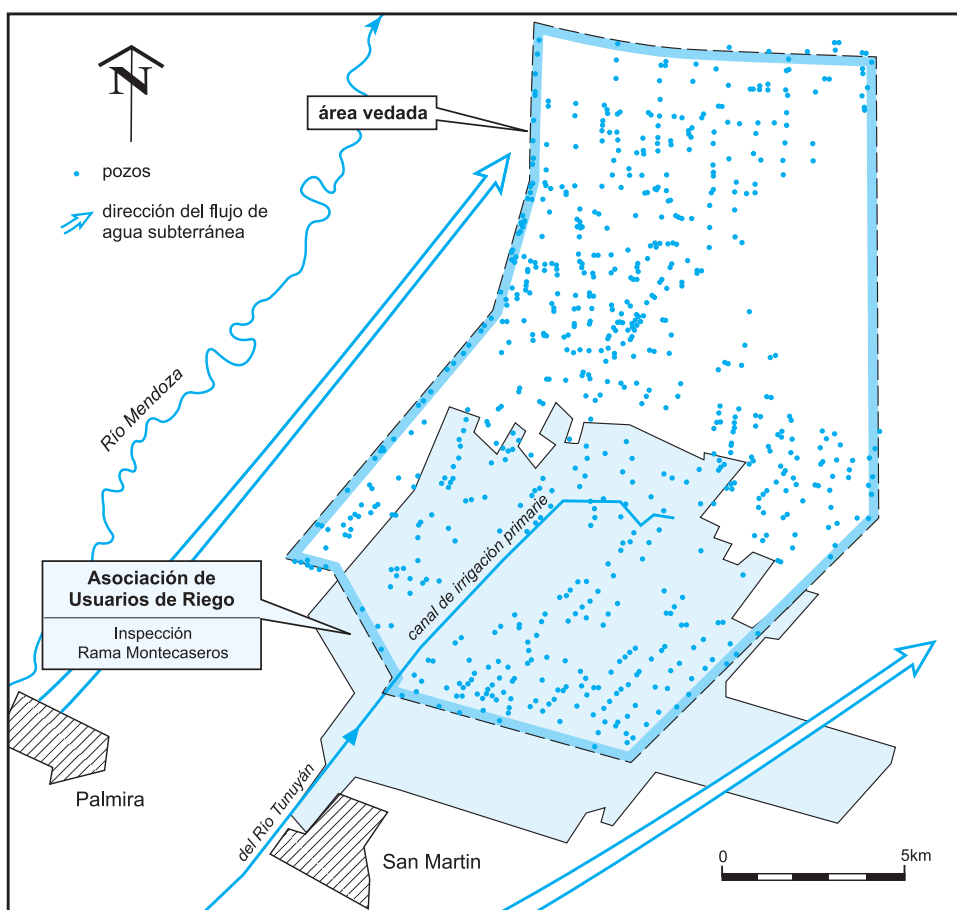
C: CONTROL DE LA SALINIZACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL OASIS NORTE

Marco Hidrogeológico General

- El Oasis Norte en Mendoza es una extensa área de irrigación con precipitación media de sólo 150 a 200 mm/año, y lo subyace un importante sistema acuífero Cuaternario. El acuífero recibe recarga de manera directa principalmente de los ríos Mendoza y Tunuyán, conforme emergen de las colinas adyacentes hacia abanicos aluviales muy permeables y, de manera indirecta, a lo largo de extensas áreas irrigadas con agua superficial como resultado de la infiltración de los canales y de la excesiva irrigación en las parcelas.
- Es ampliamente reconocido el hecho de que a mayor distancia de su frontera aguas arriba, el sistema acuífero presenta una marcada división en capas, con tres unidades acuíferas separadas por acuitardos. Se extrae agua subterránea para irrigar extensas áreas que están fuera del área dominada por los canales principales, y en otras ubicaciones como suplemento del agua superficial en periodos de demanda crítica de las plantas, o en años de caudales bajos en los ríos.

- El trabajo descrito aquí se concentra en la zona de Montecaseros del Departamento San Martín, y está ubicado en la depresión interfluvial entre los cursos actuales de los ríos Mendoza y Tunuyán, a unos 30 km de las áreas de recarga en el abanico aluvial. En 1995, como resultado de un incipiente problema de salinización en los acuíferos, se declaró aquí una ‘zona de agua subterránea vedada’ de 23.180 ha de extensión (Figura 7).
- La salinidad del agua subterránea en el acuífero más somero aumentó de 1.000 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la década de 1970 hasta 4.500 a 5.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hacia 1995, y este aumento de salinidad empezó a penetrar los acuíferos más profundos (Figura 8). La extracción total de agua subterránea en la zona es de entre 60 y 85 $\text{Mm}^3/\text{año}$, y actualmente todo se extrae del segundo y tercer nivel de los acuíferos.

Figura 7: Croquis de la asociación de usuarios de agua de Montecaseros y la zona de agua subterránea vedada

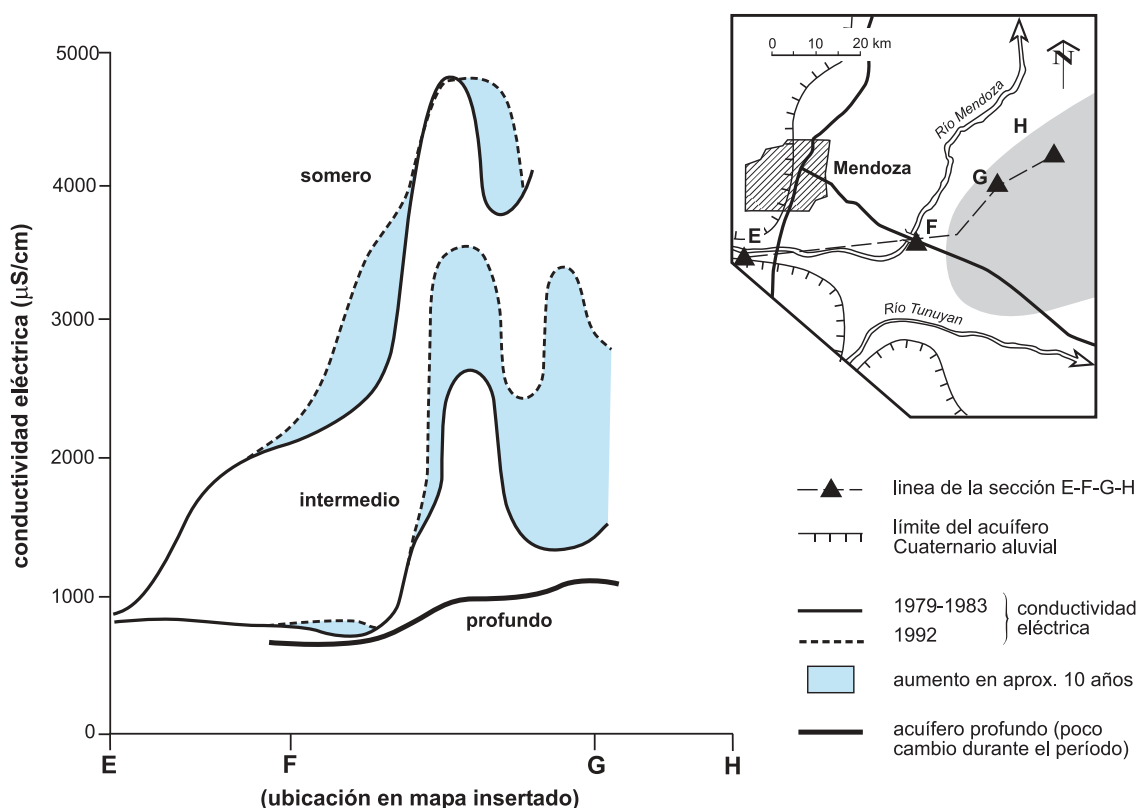


Diagnóstico del Problema de Salinidad del Agua Subterránea

- El aumento en la salinidad del agua subterránea se detectó primero en el acuífero más alto, principalmente debajo de suelos bien drenados donde el manto freático se ubicaba entre 5 y 15 m de profundidad. Parece resultar del fraccionamiento del suelo y su posterior concentración en los retornos de agua de irrigación (más que de la elevación del nivel del manto de agua subterránea y de la evapotranspiración freática), aunque también se pudieron haber movilizadas las sales del suelo y de la zona no saturada cuando los suelos se irrigaron por primera vez.

- Durante las décadas recientes, los agricultores han construido pozos cada vez más profundos para explotar el agua subterránea de los acuíferos semi-confinados que presentaban una excelente calidad. Sin embargo, el intenso bombeo de estos acuíferos más profundos llevó a una inversión generalizada del gradiente hidráulico vertical natural, y a que la salinidad llegara al segundo acuífero (Figura 8), poniendo en riesgo su uso para irrigar cultivos de alto valor sensibles a la sal, lo que provocó serias pérdidas de producción en un área con un excelente microclima para la vinicultura y los árboles frutales con calidad de exportación.

Figura 8: Evolución de la salinidad en el acuífero del Oasis Norte

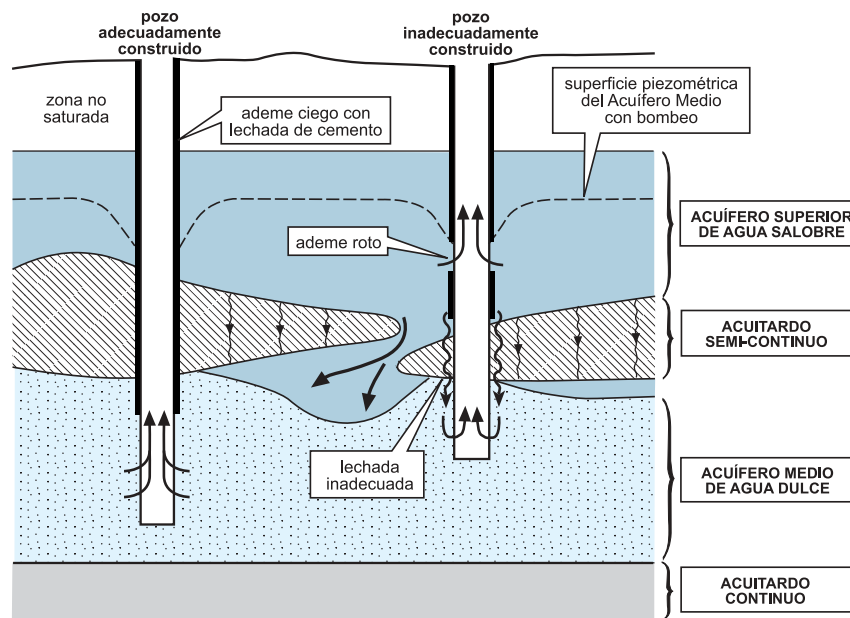


- Se está emprendiendo una evaluación adicional de la causa de la migración descendente inducida del agua subterránea salina, pero parece estar relacionada con:
 - bajos gradientes naturales (menores de 0,005) y, por ende, el flujo de pequeños caudales de agua subterránea a través de los acuíferos semi-confinados
 - el hecho de que las fugas verticales descendentes se inducen más fácilmente por bombeo que por un aumento del flujo horizontal del agua subterránea.

Se ha llegado a la conclusión tentativa de que el 70% o más del abastecimiento que se bombea del segundo nivel del acuífero se deriva de los estratos suprayacentes.

- La existencia de una cantidad sustancial de pozos mal contruidos o muy corroídos, muchos de ellos abandonados, agrava aún más el problema de la salinización del agua, pues proporciona conductos para que el agua salobre emigre hacia abajo desde el acuífero freático (Figura 9). La importancia relativa de este proceso también se está evaluando sistemáticamente por medio de pruebas de bombeo en pozos representativos con un monitoreo continuo de la salinidad. Los resultados iniciales indican que, en general, este proceso es de poca importancia en términos volumétricos, si se compara con las fugas verticales inducidas, y afecta más seriamente al dueño o al usuario del pozo corroído y a los vecinos cercanos.

Figura 9: Mecanismos que contribuyen a la migración descendente de agua subterránea salina en una secuencia de acuíferos múltiples



Estrategia para el Control de la Salinidad en el Agua Subterránea

Estos son los componentes principales de la estrategia para controlar la salinización de los acuíferos:

- reducir de manera sustancial el bombeo de agua subterránea de acuíferos más profundos, con el fin de disminuir el caudal de las fugas descendentes, por medio de la transferencia de 'agua superficial adicional' al área (Figura 7) en donde haya regantes que renuncien a sus derechos o concesiones para extraer agua subterránea
- mejorar la eficiencia de la irrigación con agua superficial y lograr ahorros reales de agua por medio del revestimiento de canales secundarios y terciarios y la introducción de sistemas de irrigación a presión a nivel parcelario, con el fin de que haya agua disponible para ser transferida y de reducir la infiltración al acuífero salado superior, y evitar así la elevación de los mantos freáticos y/o el aumento del gradiente hidráulico descendente
- como acción complementaria, rellenar y sellar los numerosos pozos mal construidos que actúan como 'corto circuito' para la migración descendente del agua subterránea salada somera.

Una combinación de estas acciones puede lograr que se mitigue el problema de la salinidad del agua subterránea en el corto a mediano plazo. Sin embargo, para lograr una solución plenamente sustentable a largo plazo es necesario drenar el agua salada del acuífero freático, si es que resulta económicamente factible.

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.

