

ECONOMÍA DEL MANEJO DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ESTE MENDOCINO

Ing. Armando Llop

Director del Centro de Economía, Legislación y Administración del Agua y el Ambiente (CELAA)
del Instituto Nacional del Agua (INA)*

y Profesor Titular de Economía de los Recursos Naturales y Medio Ambiente – FCE-UNCuyo

*Belgrano 210-Oeste- Mendoza (5500) Teléfono: 0261-4285284 Fax: 0261-4285416

E-mail celaa@piemza.edu.ar

Resumen

La salinización del agua subterránea es un proceso que amenaza la sustentabilidad de una vasta región de la Cuenca Norte de Mendoza. En este trabajo se desarrolla un modelo de decisión que, incorporando las dimensiones hidrogeológica, agronómica y económica, permite evaluar distintas acciones de política aplicables para controlar el fenómeno. Dentro de las acciones posibles, se pueden considerar aquellas como restricciones o cuotas en el volumen de agua a extraer por usuario, importación o transferencia de agua de otras fuentes de origen superficial o subterráneo, mejoras en el sistema de drenaje, adopción de tecnologías ahorradoras de agua, etc. Cada una tiene una incidencia específica a través de las distintas variables del modelo.

Dentro de todas las políticas de factible aplicación, se evalúa con particular atención una alternativa técnicamente factible y socialmente deseable. Se trata de la posibilidad de conducir los excedentes de agua superficial que ocurren durante los meses de verano (diciembre a marzo) hacia la zona donde el acuífero presenta su mayor vulnerabilidad (zona crítica), de manera tal de reducir el grado de sobreexplotación del mismo y consecuentemente mitigar la magnitud del fenómeno. Esta acción, de naturaleza esencialmente organizativa y por ende de bajo costo, muestra ser altamente rentable.

Introducción

La segunda mitad del siglo pasado ha sido el escenario de la aparición de una multitud de problemas de deterioro de los recursos naturales y de la toma de conciencia de la problemática ambiental, particularmente la contaminación del agua. En nuestro país son notorios los casos de degradación de los recursos naturales en varios ámbitos, tales como la degradación del suelo por erosión hídrica debido a prácticas de cultivos intensivos en el NOA argentino, la acelerada contaminación de cuantiosos cursos superficiales, donde casos como el Riachuelo-Matanza han demandado ingentes erogaciones destinadas a la remediación sin resultados visibles, etc. Recientemente ha centrado la atención el problema del agua subterránea en la pampa húmeda, donde el auge del riego complementario utilizando esta fuente ha acelerado el proceso de degradación ya observado. En Mendoza se destaca como prioritaria la problemática de la contaminación del agua en el Este de la cuenca Norte.

El problema del agua subterránea en la zona Norte de Mendoza

La salinización del agua subterránea es un proceso que se ha desarrollado totalmente en la segunda mitad del siglo pasado. En la década del '50 comienza en la provincia de Mendoza a difundirse el uso del agua subterránea, orientado básicamente a satisfacer las necesidades de poblaciones alejadas de los cursos de agua superficial, y como complemento para cubrir los déficits estacionales de agua superficial con fines de riego, que ocurren normalmente en setiembre y octubre. En ese momento la calidad del agua subterránea era en general muy buena y en el Este se hacía uso intenso del agua del nivel freático, que no presentaba problemas de salinidad.

A fines de la década del '60 y comienzos de la del '70, se dio la confluencia de tres importantes determinantes del crecimiento del sector agrícola provincial, que fueron: a) la permanencia de elevados precios para los productos regionales, particularmente la uva, que generó condiciones de ingresos apropiadas para realizar inversiones; b) la aparición de importantes devaluaciones impositivas para todo lo que fuese inversiones en zonas áridas, tales como nuevos viñedos y perforaciones para la obtención de agua subterránea; y c) la secuencia de cinco años hidrológicamente pobres, que presentaron derrames muy por debajo de la media, y que colaboraron en el tremendo auge en la explotación del agua subterránea. En este período se establecieron en la zona Norte de Mendoza aproximadamente la mitad de las perforaciones actualmente existentes. El rol de los determinantes de las inversiones arriba mencionados, está estadísticamente probado en Llop (1976), trabajo que muestra cómo las inversiones en viñedo y en agua subterránea se explican de manera simultánea, y donde ambas son dependientes de la expectativa de precios en el sector vitícola, y de las expectativas relativas a la disponibilidad de agua superficial.

El continuo desarrollo posterior de la actividad agrícola en zona a la larga desencadenó un proceso de degradación en la calidad del agua subterránea, que recién lo advirtió el ex Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS) hacia principios de los 80'. Desde entonces, este organismo desarrolla periódicamente mapas de isoconductividad eléctrica para cada una de las tres capas que componen el acuífero.

Actualmente este problema alcanza a un 80% del área cultivada de los departamentos de San Martín, Rivadavia y Junín, donde el segundo nivel del acuífero se encuentra con tenores de salinidad no aptos para el riego por su elevada magnitud. Para el área crítica estudiada, (Llop y Fasciolo, 1998) la conductividad eléctrica media en el segundo nivel, que en 1981 era de 1670 micromhos, superaba los 3000 micromhos hacia 1991. Por su parte, en este último período la salinidad media del nivel freático se situaba por encima de los 4500 micromhos. Finalmente, el tercer y último nivel explotable, de excelente calidad hasta el presente, ha comenzado a salinizarse. La información más reciente, si bien no se encuentra traducida en mapas de isosalinidad, contiene claras indicaciones de que este fenómeno sigue una trayectoria creciente a una tasa creciente.

Como respuesta a este proceso, la gran mayoría de las empresas agrícolas y operadoras de agua potable han reprofundizado sus pozos, o han construido otros nuevos, para extraer agua del tercer nivel. Con alta probabilidad, esto ha determinado el inicio de su deterioro de manera similar al lo ocurrido en el segundo nivel. Esto quiere decir que, si bien los operadores del recurso subterráneo han logrado acceder a una fuente de mejor calidad a través de un costoso proceso de inversión (cada reprofundización está en el orden de los \$35.000 a \$50.000.-), la

solución es solo temporaria, ya que la región ha iniciado la sobreexplotación de su última fuente de agua útil, y se encuentra ante un inexorable avance hacia la desertificación.

Al presente, el Departamento General de Irrigación, que ostenta el Poder de Policía en el manejo del agua subterránea, ha tomado dos medidas: a) prohibición del desarrollo de nuevos pozos, permitiendo la sustitución de pozos viejos por nuevos, y b) cegado de pozos en desuso, en mal estado o abandonados. Si bien falta información como para conocer el impacto relativo de estas medidas aplicadas en el reciente pasado, se sabe que no son suficientes para revertir el fenómeno de salinización.

Los determinantes de la salinización

Se sabe que los principales determinantes de la salinización del acuífero medio –y ahora del tercer nivel- son: a) la existencia de pozos rotos o en mal estado, que permiten el pasaje del agua del nivel freático hacia los más profundos, b) la intrusión salina que ocurre a través del semiconfinamiento que separa al segundo nivel del freático cuando se da la sobreexplotación del acuífero. Este genera una reducción de la presión en los niveles profundos de bombeo, y un aumento en la presión del freático causada por el drenaje que ocurre durante el riego, situación agravada por la presencia de suelos arenosos asociados a sistemas tradicionales de riego. De los dos determinantes físicos de salinización del acuífero arriba mencionado, se sabe que el principal responsable es la sobreexplotación (b), que colabora cuantitativamente en más del 80% del aumento en la salinidad (Llop y Fasciolo, 1998).

Aparte de los determinantes físicos, debe considerarse que el proceso de salinización no tendrían lugar si no fuese por: a) la rigidez impuesta por la ley de aguas de la Provincia a través del principio de la inherencia, que indica que el agua es inherente al suelo, y que no puede ser de él separada bajo ningún concepto. Esta situación determinó la ocupación de vastas áreas sin derecho de agua superficial, que se nutrieron exclusivamente de agua subterránea, y b) el subsidio que se da al riego con agua subterránea a través de la tarifa eléctrica, principal elemento económico que incentiva la sobreexplotación.

Objetivo

El objetivo del trabajo consiste en desarrollar un modelo que permita evaluar alternativas económicamente eficientes y socialmente factibles para controlar la salinización de los niveles de explotación del acuífero. Aquel conjunto de medidas que logre mantener la calidad del tercer nivel de explotación, y recuperar en el largo plazo una calidad apropiada en el segundo nivel al mínimo costo social, será lo recomendable para lograr un desarrollo sustentable del Este mendocino.

Específicamente, se desarrolla un modelo de simulación tomando el caso del área de influencia del canal Galigniana Segura, que resulta ser uno de los más significativos del total del área crítica. El modelo que se desarrolla permite probar y comparar varias alternativas de mitigación del fenómeno, estableciendo para cada una los beneficios económicos asociados, medidos en términos de costos evitados.

Elementos para la Formulación del Modelo

Son múltiples las variables que se deben tener en cuenta para formular un modelo de naturaleza hidrológica, hidrogeológica y económica. El primer problema que aquí se aborda es la estimación de los volúmenes de agua involucradas en el caso del Canal Galigniana Segura, tanto superficial como subterránea.

Agua Superficial asignable al canal Galigniana Segura.

Es conocido que el caudal del Río Mendoza resulta deficitario con fines de riego para los meses de octubre y noviembre. Esto se debe a que el proceso de derretimiento de las nieves en la alta montaña se encuentra rezagado en relación con las necesidades de agua de los cultivos. Esto es, la trayectoria ascendente de los requerimientos se encuentra anticipada a la disponibilidad hídrica del agua superficial. Por esta razón, prácticamente las tres cuartas partes del área cultivada en el área de influencia del río Mendoza se encuentra complementada con agua subterránea. Históricamente, los déficits temporarios de primavera son satisfechos con agua subterránea. Ignorar este hecho es uno de los principales determinantes de la actual construcción del Dique Potrerillos.

Se observa que la contaminación salina del agua subterránea se encuentra asociada a una reducida asignación del agua superficial, particularmente por la existencia de importantes áreas cultivadas con agua subterránea exclusivamente, sin acceso a agua superficial. Las áreas más importantes bajo estas condiciones de la Provincia están localizadas en los departamentos del Este de la cuenca Norte de Mendoza.

La principal hipótesis que se maneja en este trabajo, es que, bajo las actuales condiciones de funcionamiento del río Mendoza, existen excedentes de agua en los meses de verano, particularmente diciembre, enero y febrero, que podrían ser asignados al área deficitaria. Esto colaboraría en reducir el efecto de intrusión salina por sobreexplotación. Debe recordarse que los meses de diciembre y enero son precisamente los que presentan la máxima evapotranspiración, y para la cual en las zonas de agua subterránea en exclusiva es en los que se produce el máximo bombeo.

Con el fin de cuantificar, sobre la base de la información existente, las posibilidades de reasignación del agua de verano hacia el Canal Galigniana Segura, es necesario conocer cuáles son los balances hídricos en ambas zonas, a saber, el área servida por el Galigniana Segura (GS), y el resto del área servida por el Río Mendoza (M).

Para establecer este doble balance hídrico, que permita identificar por un lado el excedente de agua en el conjunto del Río Mendoza y por el otro los déficits en el área del Canal Galigniana Segura se realizó el siguiente análisis. En primer lugar, se estimó la cantidad de agua del Río Mendoza efectivamente asignada para riego a nivel de propiedad en toda el área del Río Mendoza (ignorando la existencia de riego complementario; se estimó la evapotranspiración mensual de los cultivos, y mediante la diferencia mensual entre disponibilidad y evapotranspiración, se obtuvo una estimación del excedente (o déficit) que ocurre en esta cuenca superficial. Segundo, se estableció la disponibilidad del agua superficial que se entrega por el Canal Galigniana Segura, dato al que se le sumó una estimación del agua bombeada en esta área. A este

valor se le dedujo la evapotranspiración del área de influencia del Galigniana Segura. Con tal información, se pudo determinar mes a mes la situación para una secuencia de 41 años. Sobre esta base, se estimó la cantidad de agua que es técnicamente transferible del conjunto de los canales del Río Mendoza al Galigniana Segura.

Formalmente se puede presentar esto de la siguiente manera. Sea:

M_t el caudal del Río Mendoza observado en Cacheuta, en donde t representa el mes.

R_{it} los hm3 del Río Mendoza asignados a riego, donde i es Galigniana Segura (GS) o el resto del área servida por el Río Mendoza (M), y t representa el tiempo medido en meses.

A_{ir} el agua efectivamente asignada a nivel de la propiedad, para el área i en el tiempo t .

B_t el agua bombeada en el Canal Galigniana Segura durante el mes t .

Para proceder a la estimación de los balances mensuales para GS y M, fue necesario desarrollar las estimaciones pertinentes.

En primer lugar, se contó con valores de agua superficial del Río Mendoza efectivamente asignada con fines de riego para M y para GS, información del DGI para una serie de datos mensuales de setiembre del '86 a junio del '92. Se procedió a estimar la función

$A_{it} = f(M_t)$, donde $i = M, GS$.

El mejor ajuste en ambos casos se logró con una función de tipo cuadrática, cuyos coeficientes y tests de significación se muestran en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1. Estimadores de las funciones de agua derivada para riego

	Canales Río Mendoza		Canal Galigniana Segura	
	Estimador	Estadístico t	Estimador	Estadístico t
Constante	-4.5249	-0.6160	-1.1152	-1.2524
Coef. Lineal	0.8366	9.5599	0.0753	7.2466
Coef. Cuadrático	-0.001098	-5.5322	-0.000091	-4.0500
R^2 ajustado	0.8304		0.7457	
Estadístico F	148		95	
Observaciones	65		65	

Con estas estimaciones se construyeron las series temporales de agua asignada para el Río Mendoza y el Canal Galigniana Segura para el período de caudales mensuales observados en Cacheuta de julio de 1956 a mayo de 1997, esto es, 41 años de observación.

Para construir las series de evapotranspiración para las áreas bajo análisis, no existieron mayores problemas, ya que se cuenta con la composición de cultivos en cada una, como así también las has. cultivadas.

Estimación del agua bombeada en el área de influencia del Canal Galigniana Segura

Una de las tareas más dificultosas en cuanto a la información del sistema hídrico mendocino, es contar con información relativa al uso del agua subterránea. La mayoría de los balances desarrollados calculan el bombeo del agua subterránea como un ajuste al resto de las variables, pero no existen estimaciones directas del agua bombeada.

Para la realización de este trabajo, se contó por fortuna con una serie de datos mensuales de consumo de energía eléctrica utilizada en todos los pozos servidos por la Cooperativa de Electrificación Rural Alto Verde y Algarrobo Grande. Se contó así con un listado de todas las perforaciones existentes, la capacidad instalada en cada una, y el consumo de energía por bomba. Conociendo cuál es la altura de bombeo media para la zona, y mediante una estimación de la eficiencia media del stock de bombas instalado en el lugar, pudo lograrse una estimación de la cantidad media de agua bombeada. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$B_t = (3,8/2,8) \cdot 273 \cdot Kwh \cdot \eta/h$$

Donde:

- B_t es el volumen de agua extraída en metros cúbicos para el mes t,
- Kwh es el consumo de energía,
- η es la eficiencia del equipo de bombeo
- h es la altura de bombeo.

Conociendo esta información para el período 91 y 92, pudo establecerse una estimación entre el volumen de agua bombeada, y el déficit hídrico del área (Galigniana Segura) Este último, calculado mediante la diferencia entre la disponibilidad de agua superficial y la evapotranspiración. La estimación estadística se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Estimadores de las funciones de bombeo de agua subterránea Galigniana Segura

	Estimador	Estadístico t
Constante	1.8314	7.3398
Coef. Lineal	-0.4461	-4.0149
R ² ajustado	0.5789	
Estadístico F	16	
Observaciones	12	

Estos coeficientes fueron utilizados para estimar el agua bombeada en la serie de 41 años arriba mencionados. Debe reconocerse que para la estimación del volumen bombeado se han considerado solamente las 135 perforaciones activas para riego de la Cooperativa Eléctrica. Con alta probabilidad este valor es una subestimación de la cantidad de pozos realmente existentes.

Estimación de los valores medios de agua potencialmente transferibles al área de influencia del Canal Galigniana Segura

Sobre las series de agua asignada, evapotranspiración y bombeo de agua subterránea, se construyó la Tabla 3, la que expone mes a mes los excedentes medios del Río Mendoza, los déficits medios del mismo río, los déficits del área de influencia del Canal Galigniana Segura, y los montos de agua que pudieran transferirse a este último canal en valor medio.

Tabla 3. Volúmenes de agua transferibles al canal Galigniana Segura (Hm3)

	Area Río Mendoza			Galigniana Segura	
	Promedio de Excedentes	Promedio de Déficits	Promedio Neto	Promedio de Déficits	Promedio Transferible
Ago	6.16	-0.26	6.42	-1.52	1.52
set	4.28	-1.12	3.16	-1.72	1.72
oct	2.19	-8.15	-5.96	-2.69	0
nov	4.32	-11.24	-6.92	-3.54	0
dic	12.10	-8.03	4.07	-3.18	3.18
ene	15.75	-4.62	11.14	-2.56	2.56
feb	21.34	-1.08	20.26	-1.51	1.51
mar	13.64	-0.74	12.90	-2.47	2.47
abr	16.69	-0.08	16.61	-0.77	0.77
Suma	96.47	-35.31	61.68	-19.96	13.73

Modelo de calidad de agua

El modelo de calidad de agua que se utiliza para determinar las posibles trayectorias futuras de la salinidad del agua subterránea en el Este mendocino, es una versión del presentado en Llop, A y G. Fasciolo, (1998). El modelo que aquí se utiliza es esencialmente el mismo pero se le incorporados dos aspectos nuevos, que son: a) la incorporación de una trayectoria exógenamente determinada de la salinidad en el nivel freático o primer nivel del sistema subterráneo, y b) la salinización del tercer nivel del acuífero, proceso cuya iniciación ya se ha identificado.

Para la incorporación del último componente arriba mencionado, se requiere establecer hipótesis acerca del comportamiento en el tiempo de los usuarios del agua relativo a la profundización o reinstalación de pozos del segundo al tercer nivel.

Criterios y variables económicas utilizados en el modelo

La evaluación económica del modelo se basa simplemente en la estimación del valor actual de las ganancias perdidas por una determinada tasa de salinización del agua subterránea. Cualquier acción orientada a modificar esta trayectoria, en el sentido de una reducción de la salinización en el tiempo, importará la obtención de futuros mayores rendimientos. La diferencia entre ambas trayectorias dan, en términos de cambio en la productividad, una estimación de los beneficios asociados a la acción bajo análisis. Esto puede observarse en la figura N° 1. En ella la productividad se mide en el eje de las ordenadas y el tiempo en el eje de las abcisas. En el momento 0 se supone que los rendimientos (producción por ha.) se encuentran en el punto R. Si no se hace nada (sin proyecto) los rendimientos seguirán una trayectoria temporal como la indicada. Si se realiza una acción determinada, los rendimientos caerán más lentamente en el tiempo, como indica la línea denominada “con acción”. Las distancias entre ambas líneas indican los rendimientos que se dejan de perder (se gana) al establecer la acción. Este es el criterio básico que se utilizara para estimar los beneficios asociados a acciones alternativas.

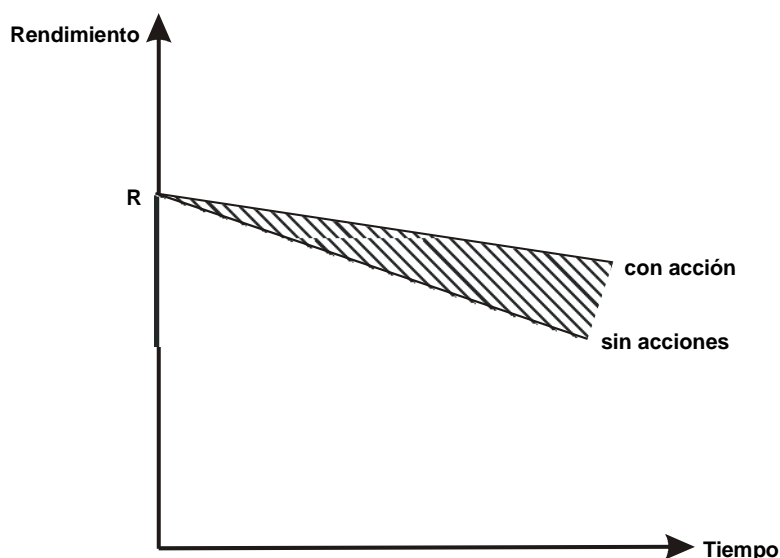


Figura 1

Para realizar la evaluación económica de las acciones alternativas es imprescindible contar con la composición de cultivos del área bajo estudio, los rendimientos existentes en el presente y el precio de los productos en cuestión.

La composición de cultivos se establece según la encuesta realizada en el área en el año 1997, que arroja un 87,3% de producción de uva. El resto está compuesto en un 7,6% de frutales y un 5,1% de hortalizas. El cultivo dominante dentro del rubro frutales resulta ser el olivo y el dominante entre las hortalizas es el ajo. En la Tabla IV se establece la composición de cultivos, rendimientos y precios vigentes en el año 1999.

**Tabla 4. Principales cultivos del área bajo estudio:
composición, rendimientos y precios**

Cultivo	Composición (%)	Rendimiento en kgs.	Precio por kg.
Ajo	5,1	13.500	0,265
Olivo	7,6	9.500	0,535
Uva	87,3	10.400	0,354

El precio correspondiente a la uva es una ponderación de los distintos tipos producidos al presente. Esta es una ponderación considerando un precio de 15,89 centavos por kg. de uvas comunes, 59,72 centavos por kg. para uvas finas y 25,33 centavos por kg. para uvas especiales. La proporción de estas variedades es aproximadamente un 40% para las mezclas, 40% para las finas y 20% para las especiales. Un supuesto plausible es anticipar el crecimiento de las has. de uvas finas en detrimento de las comunes y algunas especiales. Las principales variedades finas son Malbeck, Cabernet Sauvignon, Syrah, Chenin y San Geovesse. Las principales variedades especiales son Bonarda, Moscatel Rosado y Pedro Ximénez. (Bolsa de Comercio, julio de 1999).

Relaciones productividad – salinidad

Con el fin de establecer la trayectoria de los rendimientos en el tiempo, se debe contar con las apropiadas funciones de pérdida de rendimiento asociadas con el aumento de la salinidad del suelo. En la Tabla 5 se consigna el nivel crítico de la salinidad del suelo por sobre el cual comienza la reducción de rendimientos para cultivo, y la caída de rendimientos ocasionada por cada mmho adicional de salinidad del suelo.

Tabla 5. Parámetros de las funciones rendimiento – salinidad del suelo

Cultivo	Nivel crítico (mmhos)	δ de rendimiento/ δ sal.	Abcisa al origen
Ajo	1,2	0,163	7,35
Olivo	2,5	0,100	12,5
Uva	1,5	0,095	12

El Modelo Económico

En esta sección se presenta la estructura y una idea del funcionamiento del modelo de simulación especificado para evaluar en términos físicos y económicos las distintas acciones que pueden encararse para controlar el fenómeno de la salinización del agua subterránea. En su esencia, todo apunta a determinar la trayectoria temporal de la salinidad de los suelos cultivados bajo distintos escenarios.

En primer lugar, se define un escenario base, que es el que ocurriría si no se hace nada. Bajo este escenario se observa una determinada declinación temporal de los rendimientos. Ante una acción determinada, tal como reasignación de aguas excedentes del resto de la cuenca hacia la zona afectada por este fenómeno, se establecerá una trayectoria distinta de los rendimientos en el tiempo. Esta trayectoria implicará, con seguridad, una caída más moderada de los rendimientos a lo largo del tiempo. La diferencia entre lo que se perdería de no hacer nada y lo que se pierde al establecer la acción determinada, es un beneficio (pérdida evitada) que se asigna a esta acción. De esta manera, este modelo permite establecer el impacto relativo de acciones alternativas, y priorizarlas de acuerdo a los beneficios (costos evitados) que produce.

Para lograr, el modelo se define sobre la base de una cantidad de variables, coeficientes, condiciones especiales, etc. A pesar de ser tedioso, a continuación se mencionan coeficientes, variables y demás elementos utilizados.

- ✓ Hectáreas totales del área crítica involucrada,
- ✓ Área cultivada por cultivo, para los principales cultivos arriba mencionados,
- ✓ Funciones de pérdida de rendimiento de cada cultivo por salinidad del suelo,
- ✓ Precio de los productos de cada cultivo,
- ✓ Rendimientos iniciales observados en los cultivos bajo análisis,
- ✓ Coeficiente salinidad del suelo – salinidad del agua de riego. Este coeficiente es extremadamente bajo dada la predominancia de suelos de tipo arenoso,

- ✓ Proporción de agua freática que se intruye en el nivel medio. Este es un valor determinado por el modelo presentado en Llop y Fasciolo (1998),
- ✓ Conductividad eléctrica inicial en el nivel freático,
- ✓ Conductividad eléctrica inicial en el segundo nivel,
- ✓ Conductividad eléctrica inicial en el tercer nivel,
- ✓ Conductividad eléctrica del aporte horizontal a los niveles segundo y tercero del acuífero,
- ✓ Tasa de aumento de la conductividad eléctrica en el agua freática,
- ✓ Superficie del área crítica estudiada,
- ✓ Espesor del acuífero medio,
- ✓ Espesor del acuífero profundo,
- ✓ Coeficiente de almacenamiento en ambos niveles,
- ✓ Volumen de agua involucrado en el acuífero medio,
- ✓ Volumen de agua en el acuífero profundo,
- ✓ Extracciones de agua subterránea por bombeo,
- ✓ Cantidad de agua subterránea transferible al área crítica transferibles en meses de exceso de agua,
- ✓ Cantidad total transferible al área crítica,
- ✓ Proporción de pozos que bombean del tercer nivel,
- ✓ Tasa de aumento de los pozos que bombean desde el tercer nivel.

Sobre la base de todas estas variables y coeficientes, se establece una serie de relaciones funcionales para determinar la trayectoria temporal de las principales variables. De esta manera se determinan las siguientes trayectorias:

- a) Salinidad en el nivel freático: esta variable se considera exógenamente terminada y se plantean escenarios alternativos del incremento de la salinidad en la misma.
- b) Trayectoria temporal de la proporción del agua bombeada del tercer nivel: esto es una variable que se utiliza para establecer escenarios alternativos de reprofundización de pozos. Se sabe que al presente la mayoría de las grandes firmas del área crítica, ya ha profundizado al tercer nivel.
- c) Trayectoria de la salinidad del nivel medio: esta se calcula a través de una regla de mezcla simple, suponiendo una homogeneización instantánea de aguas de distinta salinidad

mezcladas. Se procedió de la siguiente manera: al stock de sales en un momento determinado (volumen multiplicado por la por concentración), se le extraen las sales que emigran por bombeo hacia arriba, (volumen por concentración). Se le agregan las sales incorporadas desde el nivel freático -de acuerdo a un coeficiente predeterminado- y la que se incorpora horizontalmente a través del mismo acuífero. Con esto se establece un nuevo nivel de salinidad vigente durante un período determinado. Año tras año, se repita esta regla de mezcla.

- d) Trayectoria de la salinidad del tercer nivel: esta se calcula de forma análoga a la anterior. Se supone que la proporción de agua que ingresa sustituyendo a la bombeada desde el nivel superior y horizontalmente, mantiene la misma proporción que para el nivel medio.
- e) Trayectoria de la salinidad de suelos regada por el nivel medio y por el tercer nivel. Estas se estiman de acuerdo al coeficiente que asocia la salinidad de agua de riego a la salinidad del suelo mensurada en la región.
- f) Trayectorias de ingresos por ha. Regadas por el nivel medio y trayectoria del ingreso de suelos regados desde el tercer nivel. Estos valores se determinan multiplicando directamente el precio del producto por los rendimientos por hectárea calculados según la salinidad del suelo en un momento determinado, y las has. involucradas. La modelación de estas trayectorias requiere la aplicación de funciones lógicas, en el sentido de no admitir negatividad en las variables.

En la Figura 2 se presenta un esquema de funcionamiento del componente físico del modelo. Esta Figura supone un nodo presentado tridimensionalmente, en el cual se observan los tres niveles del acuífero profundo. En él se observa el bombeo desde los distintos niveles, donde ocurre el aporte horizontal del mismo acuífero, y se describe el proceso de intrusión salina desde el freático al segundo nivel, y desde el segundo nivel al tercero. El modelo supone que el agua extraída de un nivel determinado por bombeo, es reemplazada por agua proveniente por aporte horizontal más la intrusión del nivel superior, en una proporción determinada. Esto permite calcular fácilmente la regla de mezclas.

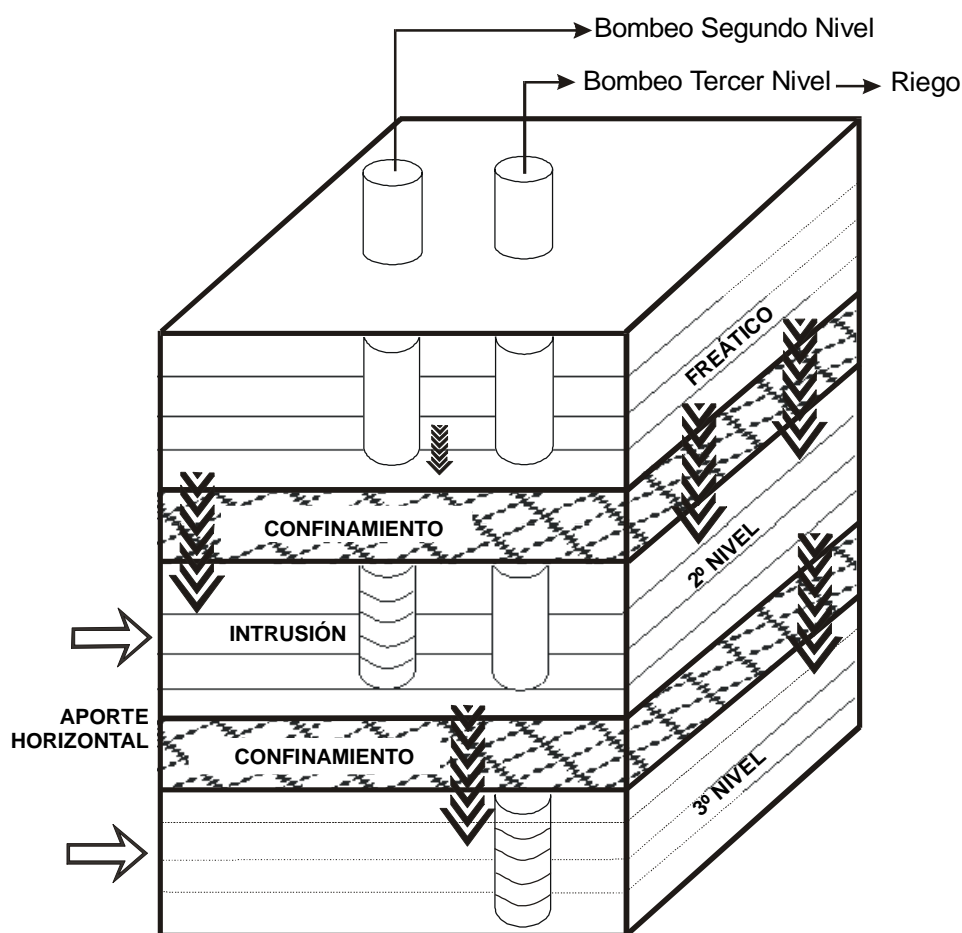


Figura 2. Esquema de la estructura física del modelo

Resultados Obtenidos

El modelo ha sido desarrollado en Excel, que permite el desarrollo de todos los cálculos y la determinación de las trayectorias temporales de las principales variables. Asimismo, en distintas hojas de un libro de cálculo, se pueden plantear los escenarios alternativos, variando algún coeficiente o alguna variable determinada. La diferencia en la trayectoria de los ingresos totales de una hoja determinada en la cual existe un cambio dado en el escenario, y el escenario base, permite cuantificar el impacto relativo de la acción involucrada.

La comparación de los distintos escenarios se realiza mediante el valor actual neto. Esto no es más que la actualización de un flujo temporal de ingresos (beneficios o costos evitados) a una tasa de descuento determinada. Se utilizó la tasa del 12%, por ser este valor comúnmente utilizado por los organismos de financiamiento.

El escenario base utilizado, sobre el cual se contrastan las distintas acciones alternativas, contiene los siguientes supuestos:

Tabla 6

Escenario de Referencia	
Variables y Coeficientes	Valor
Coeficiente Sal. suelo-Sal. Agua	1,2
Proporción de intrusión freática	0,705
C. E. Inicial en el nivel medio	1672,5
C. E. Inicial del tercer nivel	980
C. E. del aporte horizontal	1300
C. E. inicial del nivel freático	4500
Tasa aumento C.E. freático mmho/año	150
Superficie del área estudiada (hm ²)	14000
Espesor del acuífero medio (hm)	0,8
Espesor del acuífero profundo (hm)	1
Coeficiente de almacenamiento	0,05
Volúmen de agua en el acuífero medio	560
Volúmen de agua en el acuífero profundo	700
Extracciones por año (hm ³)	52,84
Proporción inicial bombeo 3er nivel	0,45
Tasa aumento bombeo en el tercer nivel	0
Total Transferible del Mendoza al Galigniana Segura	74,56
Deficit de Verano Transferible del Mendoza al G. S.	13,73

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos.

1. Si se transfiere al área de influencia del canal Galigniana Segura el agua bombeada durante los meses en donde existen excedentes en la cuenca del Río Mendoza, que son todos menos octubre y noviembre, se logra un VAN de 11,74 millones de pesos. Esto quiere decir que, cualquier acción que cueste hasta 11.74 millones de dólares y que permita la transferencia de agua superficial involucrada (13.73 hm. anuales, en promedio, y solamente cuando hay excedentes), es una inversión que da una rentabilidad del 12%.
2. Si no se hace nada, pero se supone que la reprofundización o la sustitución de pozos que bombean del segundo nivel pasen al tercero, siguiendo una sustitución del orden del 2% por año, implica una pérdida de 2,09 millones de pesos. Esto es, un VAN negativo. Esto se explica por que al aumentar el bombeo del tercer nivel aumenta la tasa de salinización del mismo, reduciendo rendimientos en el futuro de manera más acelerada que el caso del escenario base.
3. Si se supone que la tasa con que se reprofundizan los pozos ,es del 10%, las pérdidas (VAN negativo) suben a 10.27 millones de dólares.
4. Si se transfiere al área crítica 52.84 hm³, la totalidad del volumen medio bombeado, los beneficios de esta acción ascienden a 46.99 millones de pesos. Bajo este escenario, se mantiene un estado estable (constante) en el valor de la salinidad del agua subterránea y del suelo a lo largo del tiempo.

5. Si se supone de que no hay un aumento en la salinidad del nivel freático, lo que se lograría con un eficiente sistema de drenaje, los beneficios asociados ascienden a 9.78 millones de pesos.
6. Si conjuntamente con un estado estable en la salinidad del nivel freático se transfieren 13.73 hm³ al área (el volumen transferible sin conflictos físicos con otros usuarios) los beneficios aumentan a 19.47 millones de dólares.
7. A fin de determinar la sensibilidad temporal en el modelo relativo a las trayectorias de salinización del segundo y tercer nivel, se realizó la prueba de rezagar diez años el proceso de salinización del tercer nivel, lo que implica un proceso más que optimista. Los beneficios en términos económicos de este rezago ascienden a 9.44 millones de dólares.

Como en todos los casos en que se trabaja con este tipo de modelos, debe tenerse presente las reflexiones del Premio Nobel Jan Tinbergen, quien dijo “los modelos son para usarlos, y no para creer en ellos”. En este sentido, debe tenerse en cuenta que para la elaboración del presente modelo se trató de coleccionar la mejor información disponible. No obstante, el autor debe reconocer que existen todavía muchas contradicciones entre fuentes de información de distinta naturaleza, existe incertidumbre sobre un gran número de parámetros, etc., lo que debe conducir a tomar con mucha precaución los resultados obtenidos.

Igualmente, es altamente recomendable tratar este tipo de modelos en el seno de grupos interdisciplinarios, con técnicos relacionados a la problemática, de manera tal de realizar un verdadero análisis crítico sobre cada una de las postulaciones que se realizan o sobre cada uno de los supuestos que se adoptan en la realización del modelo, con el fin de relativizar los resultados que se van obteniendo. Esto es importante básicamente en la especificación de las relaciones funcionales y las trayectorias, que deben contrastarse a la luz de las experiencias observadas. Este paso todavía no ha sido dado.

En honor a la brevedad, no se presentan más alternativas que son manejables mediante este modelo, tales como el impacto de un aumento en el precio del agua subterránea (reducción en el bombeo), el establecimiento de cuotas de extracción (el mismo aumento que un aumento de precios), cambio en la composición de cultivos, etc. Lo importante es que, en base a datos hidrogeológicos, agronómicos y económicos, se pueden llegar a obtener indicadores claros de la conveniencia relativa de distintas acciones alternativas conducentes al control del grave proceso de contaminación del agua subterránea planteado en la zona Norte de Mendoza.

Referencias

LLOP, Armando. El complejo hidroagrícola. Publicado en Uso conjunto de aguas superficiales y subterránea. CELAA, Tomo II, Mendoza, 1976.

Llop, A. y G. Fasciolo. *Estrategias de control de la contaminación del agua subterránea: el caso del Este mendocino*. Anales del XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Santa Fe, Argentina, páginas 54 a 63, agosto de 1998.

Maas E. V. y G. J. Hoffman. Crop salt tolerance: evaluation of existing data. En Managing Saline Water for Irrigation, Proceedings of the International Salinity Conference. Texas Technical University, Lubbock, Texas, Agosto de 1976.