

# **APLICACIÓN DEL MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA MODFLOW AL ACUÍFERO DE LA SUBCUENCA EL CARRIZAL**

**Jorge Hernández, Luis Fornero, Nicolás Martinis**

Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino  
Belgrano 210 Oeste. Teléfono: 4318616 Fax: 4288251 E-mail: cra@ina.gov.ar

## **RESUMEN**

El trabajo de aplicación del modelo de simulación del flujo del agua subterránea (MODFLOW) a la subcuenca El Carrizal (600 km<sup>2</sup> de superficie y 10.466 has cultivadas) sobre la margen derecha del río Mendoza tuvo por objetivo incorporar una herramienta que permitiese ampliar el conocimiento de la dinámica del agua subterránea en la cuenca, para realizar balances hidrológicos y para predecir el comportamiento de aquella ante diferentes acciones externas, propias de la naturaleza (variación de la recarga en los ríos o por lluvias, sequías, etc) o del quehacer humano (variaciones en el bombeo, disminución de la recarga por impermeabilización de cauces, recarga artificial, etc) contribuyendo con ello a la gestión del recurso hídrico.

Para la implementación del modelo fue necesario relevar, recopilar, analizar y procesar toda la información hidrogeológica e hidrológica que permitiese una vez incorporada al modelo su calibración y validación.

Para el período de calibración, se tomaron 15 años y para su validación 5. Esos períodos anuales comienzan en el mes de setiembre de 1979 y terminan en agosto de 1999.

El área definida fue discretizada en polígonos o celdas cuadrangulares de 1000 metros por lado. Esto dio origen a una grilla de 35 km de oeste a este y de 52 km de norte a sur, con 1820 celdas de 100 has cada una. Desde los puntos de vista hidrogeológico e hidrológico sólo 785 celdas se consideraron activas.

Luego de los procesos de calibración y de validación del MODFLOW, se ejecutó en estado transitorio, para los 20 períodos ya mencionados (1979/99), resultando de ello: las variaciones del almacenamiento del acuífero, curvas equipotenciales, velocidades de flujo, balance hídrico y además se usó la herramienta para analizar uno de los escenarios que considera a toda la subcuenca sin cultivar. Es decir, se ejecutó el programa MODFLOW bajo un régimen de secano como si sólo el río y las lluvias recargasen el acuífero y no existieran las alteraciones producidas por la percolación desde canales y el retorno en parcelas regadas y por el bombeo.

**Palabras clave:** Hidrogeología. Modelos. Mendoza. Subcuenca Carrizal

## **INTRODUCCIÓN**

El trabajo de modelación del acuífero que se desarrolla sobre de la margen derecha del río Mendoza se ha realizado en el marco del proyecto: “Avance en el conocimiento de la dinámica hídrica de la subcuenca El Carrizal – Área de restricción margen derecha del río Mendoza” (Informes técnicos: IT N° 42 y 55 - CRA), como resultado del convenio realizado entre el Departamento General de Irrigación y el Instituto Nacional del Agua.

En esa área se desarrolla una importante actividad agrícola–industrial que se sustenta por el uso de las aguas superficiales y subterráneas provenientes principalmente del río Mendoza.

El uso del agua subterránea para la agricultura e industria, y la decreciente tendencia del derrame medio del río Mendoza en las últimas décadas, ha ocasionado un déficit hídrico que se ha manifestado en los cálculos de los balances hidrológicos, y se refleja en el descenso de los niveles piezométricos del acuífero. Ello indujo al Departamento General de Irrigación a tomar medidas de restricción preventivas respecto de la explotación del agua subterránea y a requerir estudios más precisos sobre el comportamiento y capacidad del acuífero allí existente.

La incorporación del modelo de flujo (MODFLOW), está orientado a la ampliación del conocimiento hidrogeológico de la cuenca de agua subterránea, y con la intención de que éste sea en una herramienta que contribuya a la gestión del recurso hídrico.

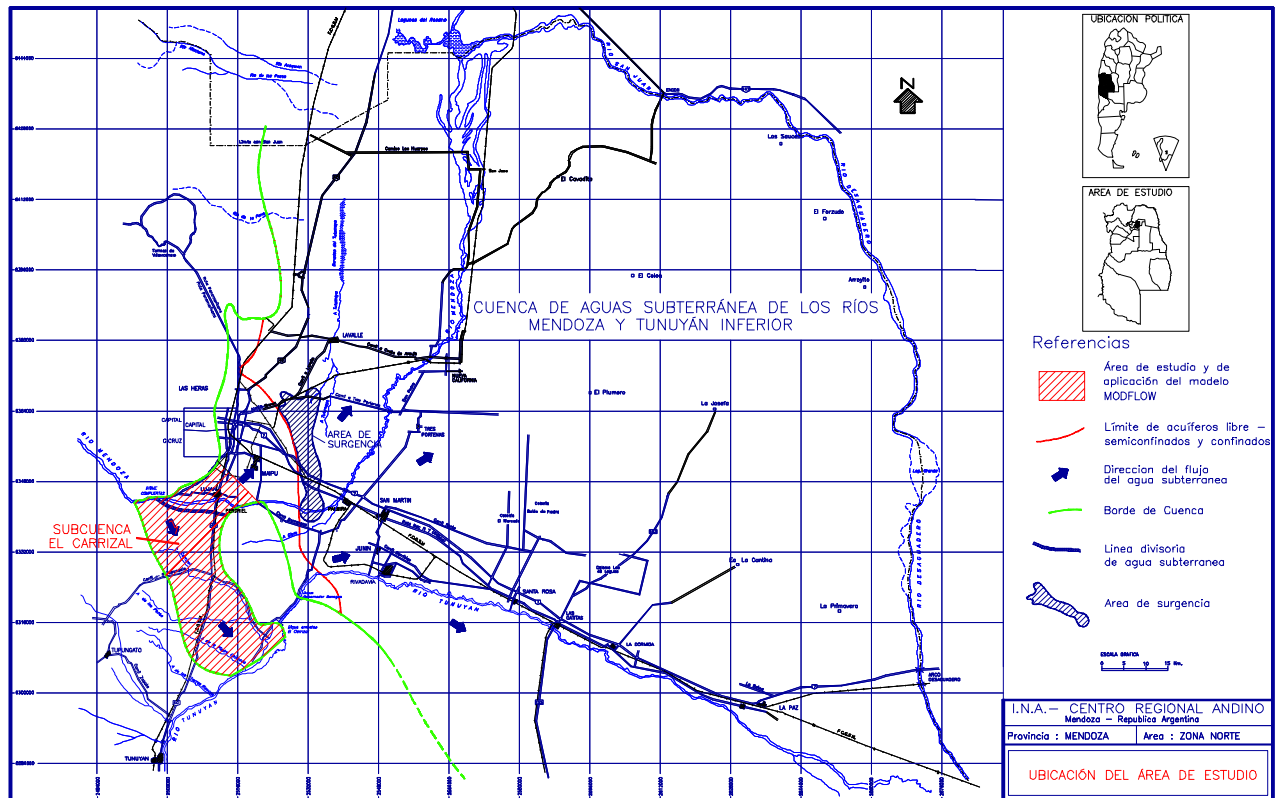
Principalmente se analizaron los aspectos hidrológicos del cuerpo acuífero que se encuentra bajo el área, que se extiende al sur del río Mendoza y alcanza al río Tunuyán y al Dique Embalse El Carrizal, conocida como Subcuenca El Carrizal.

## **OBJETIVOS**

Aplicar modelos de simulación como elementos instrumentales para ampliar el conocimiento de la dinámica del agua subterránea en la cuenca, para realizar balances hidrológicos y para predecir el comportamiento de aquella ante diferentes acciones externas, propias de la naturaleza (variación de la recarga en los ríos o por lluvias, sequías, etc.) o del quehacer humano (variaciones en el bombeo, disminución de la recarga por impermeabilización de cauces, recarga artificial, etc.)

## **UBICACIÓN, EXTENSIÓN Y LÍMITES DE LA SUBCUENCA EL CARRIZAL**

Estrictamente, la subcuenca El Carrizal tiene como límite norte al tramo del cauce del río Mendoza comprendido entre su desembocadura y un punto ubicado 1000 metros aguas abajo del dique Las Compuertas; luego continúa por la línea divisoria de agua subterránea hasta el cruce de las rutas nacionales n° 7 y n° 40 aproximadamente, al sur de la localidad de Perdriel (Figura 1). Se extiende hacia el sur hasta el río Tunuyán y el dique El Carrizal. Tiene una superficie aproximada de 600 km<sup>2</sup>. Abarca parte de los departamentos de Luján de Cuyo y Tupungato.



**Figura 1. Ubicación del área de aplicación del modelo de flujo Modflow**

Cabe en este punto aclarar que dadas las exigencias del modelo de flujo de agua subterránea fue necesario extender el área (760 km<sup>2</sup>) hacia el norte, hasta una línea arbitraria que une la localidad de Chacras de Coria al puente Barrancas, y que está asociada a un sector de menor variación de los niveles estáticos.

Los accesos más importantes son las rutas nacionales n° 7 y n° 40.

## INFORMACIÓN

Para la implementación del modelo fue necesario recopilar información en las distintas dependencias del Estado Nacional y Provincial y obtenerla además en forma directa en el lugar de estudio mediante tarea censal.

### **Información recopilada**

- Informes finales de todas las perforaciones realizadas en la Subcuenca.
- Base de datos de perforaciones.
- Base de datos de suministros eléctricos para bombeo agrícola.
- Hojas catastrales de los departamentos de Luján de Cuyo, Tupungato y Maipú contenidas en el área de estudio, digitalizadas por la Dirección Provincial de Catastro (DPC), con el catastro rural.
- Planos y hojas catastrales.
- Registros de caudales del río Mendoza en la estación de aforos.
- Registro de concesiones de riego.

- Registro de caudales distribuidos a los canales de riego.
- Registros meteorológicos.
- Estudio de suelos.
- Cartas del Instituto Geográfico Militar Argentino.(IGM).
- Planos de la cuenca con el trazado de accidentes geográficos, ríos, arroyos, canales, caminos, etc.
- Imagen satelital LANDSAT 1997.
- Informes publicados sobre la hidrogeología, hidrología e hidroquímica.
- Aforos de caudales derivados en las tomas del arroyo El Carrizal y su vuelco al dique embalse homónimo.
- Información topográfica
- Información gráfica y bases de datos provistos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Asociación de Inspecciones de Cauces de la Primera Zona y la Inspección del Arroyo El Carrizal.

### **Información obtenida por tarea censal**

La obtención de información se concretó mediante la realización de dos campañas: una de carácter censal y otra de ensayos de bombeo. Fue planificada desde el curso del río Mendoza al sur. El sector que se encuentra al norte del río Mendoza no se censó y se trabajó con los antecedentes disponibles.

El censo tenía como fundamento recabar información hidrológica, agronómica, hidroquímica y de tipo registral de todas aquellas explotaciones agrícolas que tuvieran una superficie mayor de 0,5 ha, utilizando para el relevamiento las hojas catastrales digitalizadas por la Dirección Provincial de Catastro.

Las visitas a las explotaciones se llevaron a cabo por el sistema de barrido. Las entrevistas, generalmente a propietarios o encargados de las explotaciones, se concretaron mediante el llenado de dos tipos de formularios de encuestas: uno orientado a caracterizar la explotación y otro a establecer la presencia y algunas características de las perforaciones que extraen o extrajeron agua subterránea.

Una síntesis extraída de los datos censales depurados, es la que se detalla a continuación:

Por ciento explotaciones regadas con agua subterránea exclusiva	38,92
Por ciento de explotaciones que realizan uso conjunto	11,02
Por ciento de explotaciones en secano	0,35
Por ciento superficie regada con agua superficial exclusiva	14,58
Por ciento superficie regada con agua subterránea exclusiva	58,70
Por ciento de superficie que realizan uso conjunto	26,63
Por ciento de superficie secano	0,09

En relación con las especies cultivadas, los resultados generales obtenidos expresados en hectáreas son los siguientes:

*Superficie total con frutales:*

Vid parral	2.816
Viña baja	4.743

Frutales de carozo	687
Frutales de pepita	190
Olivo	35
<i>Superficie total con forestales:</i>	
Forestales hoja caduca	177
Forestales hoja caduca en hileras	103
Forestales hoja perenne	17
Forestales hoja perenne en hileras	4
Parque	5
<i>Superficie total con hortalizas:</i>	
Hortalizas de verano	1.693
Hortalizas de invierno	1.594
<i>Superficie total con pasturas:</i>	
Alfalfa	88
Forrajes de verano	41
Forrajes de invierno	31

La campaña de ensayos de bombeo se realizó para definir parámetros hidráulicos (conductividades hidráulicas, coeficientes de almacenamiento, caudales específicos, coeficientes de goteo, y percolancia) de los acuíferos que se explotan, con la finalidad de utilizar sus valores en el ajuste del modelo de flujo de agua subterránea. Los métodos de análisis fueron los desarrollados para el estudio de la hidráulica de pozos.

### **DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SUPERFICIE UTILIZADO PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA - DESCARGA VERTICAL NETA DEL ACUÍFERO**

El modelo de superficie JUANCRAAS se utiliza como complemento del programa MODFLOW. Con él se realizan balances hidrológicos mensuales, para cada celda de la grilla, que vinculan el agua, el suelo y la vegetación con la finalidad de establecer la incidencia de algunos de los diversos factores que han gobernado el comportamiento hidrológico general del área de estudio entre setiembre de 1979 y agosto de 1999. Sus salidas también proveen información de recarga y descarga vertical a ser utilizada por el programa MODFLOW.

Se trata de la aplicación de la ecuación general del balance hídrico a dos sistemas diferentes.

$$\dot{I} \text{ Ingresos} - \dot{E} \text{ Egresos} = \dot{D} \text{ Almacenamiento}$$

Uno de ellos es el sistema agua - suelo - vegetación, en el cual el cuerpo físico al que ingresan y del que egresan los componentes del flujo es el suelo explorado por las raíces de las plantas. Esa aplicación, a través del tiempo, permite conocer el estado hidrológico de ese cuerpo en un momento dado, así como la incidencia de cada uno de los componentes.

En ese sistema, restringido a la consideración de flujos verticales ascendentes y descendentes, la aplicación de agua en cantidad suficiente sobre la superficie del suelo da lugar a la ocurrencia de los tres fenómenos naturales siguientes:

- La infiltración, por la cual el agua pasa a través de la superficie del terreno ingresándola al suelo y haciendo posible su almacenamiento en el mismo.
- La percolación, según la cual el agua se mueve hacia abajo por entre los poros del subsuelo; cuando en ese movimiento el agua supera la profundidad que exploran las raíces y se pone fuera de su alcance, se dice que egresa del suelo para percolar a través del subsuelo.
- La evapotranspiración por la que el agua, ingresada y almacenada entre los poros del suelo, es evaporada a través de la superficie de este y transpirada por las plantas, egresando del mismo y regresando a la atmósfera.

De allí surgen los tres componentes básicos de flujo para el balance hídrico que se está describiendo y cuya incorporación a la ecuación vista, para un período de tiempo determinado, se presentan de la siguiente forma:

$$\text{Almacenamiento suelo} = \text{agua infiltrada} - (\text{agua percolada} + \text{agua evapotranspirada})$$

De esos tres componentes, sólo lo infiltrado constituye un flujo de ingreso, para lo cual es necesario la previa depositación de agua sobre la superficie del terreno. Esto ocurre cuando llueve, cuando se riega y cuando discurre agua por los cauces naturales y artificiales.

El agua evapotranspirada origina un flujo de egreso hacia la atmósfera, se evapora desde los primeros decímetros de suelo y se transpira, a través de las hojas de los vegetales, la que previamente es absorbida por las raíces. Este egreso está condicionado por las características de los suelos, el tipo de vegetación y las condiciones meteorológicas que imperan en el período que se considere.

El agua que percola, es otro flujo direccionado hacia la profundidad del terreno, es un egreso del suelo que también ha sido condicionado previamente por la capacidad de almacenamiento de éste.

El segundo de los sistemas considerados tiene como cuerpo físico, al que ingresan y del que egresan los componentes de flujo, a la formación acuífera. Lo percolado del suelo, considerado como egreso del mismo en el balance anterior, sigue su movimiento vertical descendente a través del subsuelo hasta alcanzar el nivel saturado e incorporarse al volumen almacenado en el acuífero y se transforma, para este otro sistema, en un flujo de ingreso.

El otro componente de flujo para este sistema no es originado por un fenómeno natural, como lo han sido todos los considerados hasta ahora, sino que es el resultado de la acción directa del hombre: el bombeo del agua almacenada en el acuífero. Este bombeo provoca el egreso de agua del acuífero.

Puede deducirse, aquí también se trata con flujos verticales ascendentes y descendentes, y la utilización de la ecuación del balance hídrico sólo resuelve lo que se conoce como recarga/descarga vertical neta del acuífero. Es decir, no contempla los flujos horizontales que, cuando se trata de cuerpos porosos saturados con alta conductividad hidráulica horizontal suelen tener mucha importancia.

Dadas así las cosas, el reemplazo en la ecuación del balance hídrico para un período determinado, se presenta así:

$$\text{Recarga/descarga VN} = \text{agua percolada} - \text{agua bombeada},$$

donde el agua percolada es el resultado de la infiltración y luego percolación en los lechos de cauces conductores de agua y de la percolación en las áreas regadas. Y el agua bombeada, la extraída de los acuíferos para satisfacer las necesidades de riego de los cultivos.

### **Datos de entrada**

Para su montaje, el programa JUANCRAS requiere de información que caracterice a las celdas, que suelen ser constantes durante el período de ejecución, y la provisión de datos mensualmente variables para las mismas. Para el caso se trabajó con 20 períodos anuales (setiembre 1979/agosto 1999).

En virtud de que el área de la cuenca fue discretizada en 785 celdas activas, los datos para cada una de ellas se ordenan en tres archivos. En el primero se ingresan los datos que son establecidos como constantes para cada celda a lo largo del período de ejecución y que caracterizan a las celdas (superficie cultivada por especie y por fuente del agua que recibe, tipo de acuífero sobre la que se encuentra la celda, número de curva para la aplicación del método del CN, superficie que riega cada canal en la celda, coeficiente de pérdida en canales y de eficiencia de riego, estación meteorológica en cuya área de influencia se encuentra la celda, agua disponible total en el perfil del suelo según textura para cada especie en cada celda); en el segundo se incluyen los datos hidrológicos que son variables a través del período, es decir, mes a mes, como las dotaciones de canal por canal y las lluvias por estación meteorológica; en el tercero se incorporan los datos meteorológicos vinculados al cálculo de evapotranspiración de los cultivos y de las áreas incultas, también mes a mes. (Método de Penman-Monteith modificado por FAO).

La ejecución del programa MODFLOW requiere de información mensual de bombeo y recarga para cada una de las celdas en que se encuentra discretizada el área. Parte de esa información es producto de la ejecución del modelo de superficie (JUANCRAS), ya que sus salidas proveen los datos mencionados vinculados a la actividad agrícola del área.

Toda la información variable utilizada es de carácter mensual y corresponde al período de tiempo que va desde setiembre de 1979 a agosto de 1999. Aquellas series que tuvieron vacíos de información fueron adecuadas por interpolación y extrapolación utilizando ecuaciones de regresión.

### **- Datos meteorológicos**

Los datos meteorológicos corresponden a tres estaciones: Chacras de Coria (Facultad de Ciencias Agrarias - UNC) y fincas de la firma Norton S.A en Agrelo y Perdriel. Cada una de ellas tiene un área de influencia dentro de la cuenca que involucra varias celdas. Esa área de influencia fue determinada por el método de los polígonos de Thiessen . La ubicación física de las mismas es la siguiente:

Chacras de Coria:

X: 2.511.897

Y: 6.349.210

Altitud: 920 m.s.n.m.

Perdriel:

X: 2.510.493

Y: 6.338.845

Altitud: 960 m.s.n.m.

Agrelo:

X: 2.505.641

Y: 6.330.869

Altitud: 975 m.s.n.m.

Todos los datos meteorológicos, excepto la lluvia, se utilizaron para el cálculo de la evapotranspiración a través del método de Penman-Monteith modificado por FAO.

Los datos meteorológicos mensuales requeridos para aplicar ese método son:

- Temperatura media (°C)
- Temperatura máxima media (°C)
- Temperatura mínima media (°C)
- Humedad relativa máxima media (%)
- Velocidad media del viento (m/s a 2 m.altura)
- Fracción de insolación

Las lluvias mensuales, además de ser utilizadas para los balances, se utilizan para calcular escorrentía por el método del CN.

La cantidad de lluvias por mes es utilizada en el cálculo del coeficiente de cultivo Kc para terrenos incultos.

La estación con mayor información para el período setiembre de 1979 a agosto de 1999 es Chacras de Coria. Tiene un faltante de información sobre velocidad del viento desde setiembre de 1988 a marzo de 1991. También, se encuentra extraviada la publicación del mes de mayo de 1998 con toda su información.

De las estaciones de Agrelo (31/1/99 al 27/5/02) y de Perdriel (5/10/98 al 27/8/02) se obtuvo información de temperaturas, velocidades del viento, humedades relativas y lluvias cada 12 minutos. De su procesamiento se obtuvieron valores medios mensuales que fueron utilizados para establecer ecuaciones de regresión al correlacionarlos con valores de la estación de Chacras de Coria.

En relación con los valores de fracción de insolación, se tomaron para las tres estaciones las registradas en Chacras de Coria. De igual forma se procedió con las velocidades del viento, ya que no parecía existir correlación entre los datos de chacras de Coria y los de las otras dos estaciones. Para completar la serie de Chacras de Coria respecto de las velocidades del viento, en los meses que no hubo registros, se utilizaron los valores promedio de la serie histórica 1979/99.

## - Datos agronómicos

En virtud de que en el área activa de modelado el consumidor de agua por excelencia es la vegetación, especialmente la cultivada, debieron definirse algunas características del suelo y de la misma vegetación vinculadas a ese consumo.

Los estudios de suelos consultados indican una cierta variabilidad textural en materia de suelos agrícolas, que van desde francos a franco-arenosos para el área regada con aguas que provienen directamente del río Mendoza (desde el río Mendoza hasta la picada a Tupungato). El resto del área hacia el sur carece de un estudio sistemático, por lo que se decidió extenderle las características texturales mencionadas. Esas texturas de suelo se volcaron sobre la grilla definiendo el tipo de suelo en las celdas. Del “Cuadro representativo de las propiedades físicas del suelo” del libro “Principios y aplicaciones del riego” de Israelsen y Hansen, se extrajo la humedad disponible por cada 1m de profundidad de suelo para cada de esas texturas, según lo siguiente:

Franco-arenoso (FA)	80 mm
Franco-areno-limoso (FAL)	100 mm
Franco (F)	130 mm
Franco-limo-arenoso (FLA)	130 mm

A la vez, los cultivos relevados a campo se agruparon según requerimientos hídricos parecidos. Si se tienen en cuenta las profundidades exploradas por las raíces de cada cultivo y la cantidad de agua que contiene el suelo en capacidad de campo a esas profundidades, se obtiene la tabla siguiente en la cual la última columna contiene, expresado en milímetros de altura, la cantidad de agua disponible.

Cultivo 1:	Vid (parral)	90 mm
Cultivo 2:	Vid (espaldero)	72 mm
Cultivo 3:	Frutales de carozo	135 mm
Cultivo 4:	Frutales de pepita	135 mm
Cultivo 5:	Olivo	180 mm
Cultivo 6:	Forestales de hoja caduca	180 mm
Cultivo 7:	Forestales de hoja perenne	180 mm
Cultivo 8:	Hortalizas de verano	50 mm
Cultivo 9:	Hortalizas de invierno	50 mm
Cultivo 10:	Alfalfa	90 mm
Cultivo 11:	Pasturas de verano	63 mm
Cultivo 12:	Pasturas de invierno	63 mm
Cultivo 13:	Parques	63 mm
Cultivo 14:	Inculto.	45 mm

Los Kc mensuales de cultivo utilizados para el cálculo en la evapotranspiración, son los que se detallan a continuación:



En la siguiente tabla se detallan los tipos de vegetación considerados para toda el área de modelado y para la subcuenca El Carrizal y las superficies que abarcan expresada en hectáreas:

<b>Tipos de vegetación</b>	<b>Zona completa</b>	<b>Subcuenca El Carrizal</b>
Vid parral	3.628,4731	2.606,1418
Vid espaldero	6.069,4629	3.844,7034
Frutales de carozo	1.126,1866	619,9785
Frutales de pepita	390,2355	174,6330
Olivos	823,9951	0,0000
Forestales de hoja caduca	309,0435	219,7634
Forestales de hoja perenne	21,5333	17,7213
Hortalizas de verano	1.872,4437	1.499,2486
Hortalizas de invierno	1.913,8887	1335,6903
Alfalfa	137,1754	78,4752
Pasturas de verano	66,3007	39,8001
Pasturas de invierno	54,7003	30,4999
Parques	753,5434	0,0000
Total cultivado	17.166,982	10.466,655
Total inculto	61.296,850	51.766,644
Área total	78.463,832	62.233,299

#### **- Parámetros vinculados a las lluvias**

Relacionados con el agua de lluvia que llega al suelo y permanece sobre él para ser infiltrado, se consideró lo siguiente:

- En el presente trabajo se optó, para calcular la escorrentía superficial de una lluvia, por el método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los EE.UU. En este caso los CN no son aplicados a las celdas, sino a los grupos de cultivo y mes a mes. Los valores de CN fueron extraídos de las tablas que se presentan en Soil Conservation Service, 1972.
- La diferencia entre la lluvia total y la escorrentía superficial da origen el agua retenida; para estimar qué cantidad del agua retenida llega al suelo para ser infiltrada se adoptaron coeficientes de lluvia efectiva. Cada cultivo a lo largo de su período vegetativo varía las dimensiones de su masa foliar; por ello, mes a mes varía también su coeficiente de lluvia efectiva.

#### **- Datos de agua distribuida para riego**

Muchas de las celdas de la cuenca tienen derechos de riego. Usan para regar todos o parte de sus cultivos con agua superficial exclusivamente o en conjunto con agua subterránea.

Un canal puede regar más de una celda y una celda puede ser regada por más de un canal. Consecuencia de ello, cada celda con derechos de riego debe vincularse a el/los canales y determinarse las superficies que cada canal tiene empadronadas en ella.

El mismo programa, ya mencionado antes, que vincula la base de datos con la cartografía, permitió extraer las superficies que riega cada canal en cada celda.

La información registrada por el DGI acerca del agua distribuida para riego se circunscribe a las dotaciones de los canales principales. Consecuencia de ello, fue necesario agrupar a los canales de la red secundaria según el canal principal que la provee de agua.

### **- Coeficientes de pérdidas en canales**

Todas las celdas que tienen cultivos regados con agua superficial exclusiva o se realiza uso conjunto, tienen aporte de agua a través de canales que en muchos casos no están impermeabilizados e infiltran parte de las aguas que conducen. La cantidad de agua que se infiltra, desde el punto de vista exclusivamente superficial, se pierde. De allí el nombre del coeficiente.

Sin embargo, el modelo no aplica el coeficiente de pérdidas a los canales sino a las celdas. Todos los canales que riegan una celda infiltran en proporción a lo que establece el coeficiente aplicado a ella. Es decir, que a cada celda debe aplicarse un coeficiente de pérdidas en canales.

Para ello se tomaron como base estudios sobre pérdidas realizados en el área. (Chambouleyron, J. y otros, 1982; Hernández, J. 1982; Hernández, J. 2003).

### **Resultados y discusión**

Como ya se mencionó antes, tanto el programa MODFLOW como el JUANCRA se ejecutaron sobre un área mayor de la que es estrictamente la subcuenca El Carrizal. Ello se debió a razones hidrogeológicas que tendían a posibilitar la calibración del primer modelo mencionado. Sin embargo, el análisis a llevarse a cabo en el presente estudio estaba orientado a la subcuenca. La misma, discretizada, contiene 621 celdas de 100 ha cada una. Del total, 391 celdas contienen cultivos en una proporción que es del 29 %; el espacio restante, 69 %, está inculto, al igual que las 230 celdas restantes.

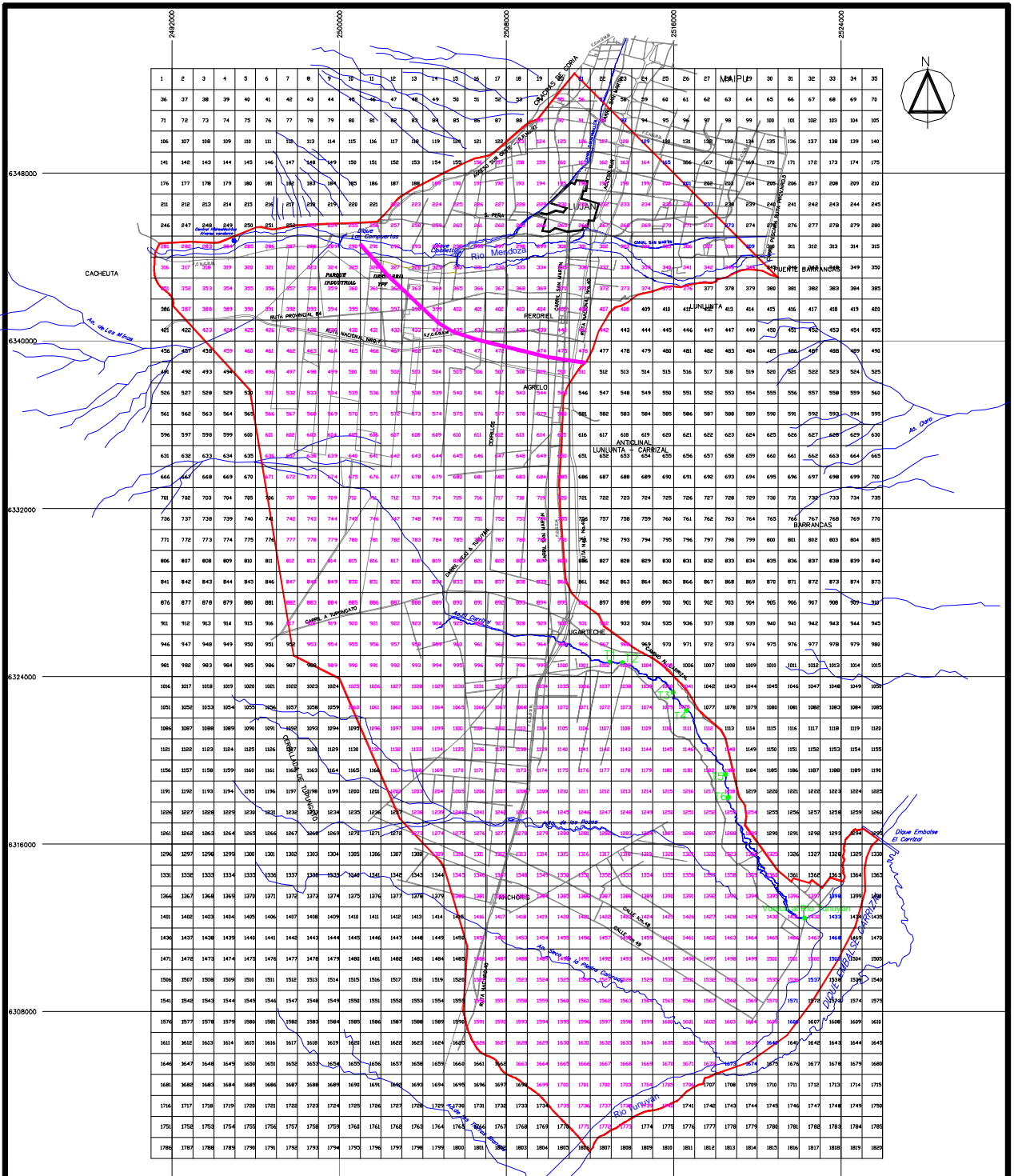
Las áreas afectadas a las diferentes fuentes de agua se discriminan así:

Riego con agua de superficie exclusiva:	719 ha	( 1,1 %)
Riego con agua subterránea exclusiva:	7.191 ha	(11,6 %)
Uso conjunto:	2.546 ha.	( 4,1 %)
Secano:	51.778 ha	(83,2 %)

De lo anterior surge que sólo el 16,8 % del área se encuentra bajo riego.

Cuando las relaciones se establecen en el área bajo riego, las proporciones son:

Riego con agua de superficie:	6,9 %
Riego con agua subterránea:	68,8 %
Uso conjunto:	24,3 %



REFERENCIAS

- Curso de agua
- Calles y rutas
- Límite y borde de cuenca de agua subterránea
- Línea divisoria de aguas subterráneas
- T1 Toma A Carrizal
- 1786 Celda inactiva
- 381 Celda activa
- 340 Celda de cota constante

ESCALA GRAFICA  
 0 5 10 KM

	<b>Instituto Nacional del Agua</b> Centro Regional Andino	
	PROVINCIA : Mendoza	DEPTO : Luján de Cuyo
<b>GRILLA</b> CELDAS ACTIVAS E INACTIVAS		
ELABORO : Ing. Nicolás Martínis	FECHA : 2003	<b>2</b>
DIBUJO : Gustavo Bozzo	ESCALA : ---	

Figura 2. Grilla. Celdas activas e inactivas

El modelo de superficie JUANCRAS cuando totaliza lo calculado para el área de balance, lo hace período por período desde 1979/80 a 1998/99. Estos resultados sirvieron de base para los comentarios de los párrafos que siguen.

Los vaivenes de la precipitación sobre el área oscilan entre los 695 mm (1983/84, un período excepcionalmente rico) y 170 mm anuales (1994/95). De esas lluvias anuales entre el 57% y 94% (76% promedio) de lo precipitado alcanza el suelo y participa de los balances hídricos, contribuyendo al proceso evapotranspiratorio y al de recarga de acuíferos. Entre el 1 % y el 39%, aunque la media es el 19%, escurre fuera de la subcuenca. El resto (5 % del promedio) es devuelto a la atmósfera por evaporación desde las superficies de intercepción como el follaje, ramificaciones aéreas de los vegetales y la hojarasca.

Entre suelo cultivado y suelo inculto, del total de la lluvia que cae sobre área cultivada sólo aproximadamente el 68 % alcanza el suelo; en cambio, cuando el área está inculta o de vegetación natural, lo hace aproximadamente el 78 %.

Las pérdidas ocurridas durante la conducción hasta las bocatomas de las parcelas o propiedades son del orden del 14 %.

En los períodos considerados, la cantidad de agua subterránea osciló entre los 64 hm<sup>3</sup>/año y 93 hm<sup>3</sup>/año. El agua que se deriva del arroyo El Carrizal, producto del drenaje desde el acuífero somero, es utilizada para riego y representa entre el 13 y el 36 % del total de agua subterránea utilizada. El bombeo varió entre los 45 y 77 hm<sup>3</sup>/año, siendo el promedio de 61,2 hm<sup>3</sup>/año.

La información que proveen los resultados permiten comparar los usos del agua subterránea y de la de superficie para riego a nivel de disponibilidad en la toma de los canales derivados del río Mendoza y del arroyo El Carrizal. De ello, como promedio, se obtiene lo siguiente:

Agua de superficie: 34 %  
Agua subterránea: 66 % (50 % bombeo y 16 % dren El Carrizal)

en ninguno de los períodos considerados la cantidad de agua de superficie es mayor que la subterránea. Si esa misma proporción se establece cuando el agua está a nivel de parcela, la diferencia se agranda, dado que no toda el agua de superficie que ingresa a la subcuenca alcanza el nivel de parcela:

Agua de superficie 29 %  
Agua la subterránea 71 % (53 % bombeo y 17 % dren El Carrizal).

Todo lo anterior está vinculado al uso agrícola; si se tiene en cuenta el bombeo industrial que es del orden de los 5,5 hm<sup>3</sup>/año, se puede decir que en la subcuenca el uso en general del agua depende mayormente del agua subterránea.

De los balances a nivel del suelo surge que, el aporte de cada componente al suelo de la subcuenca es, porcentualmente y en promedio, el siguiente:

Lluvia: 59 %  
Agua superficial: 12 %  
Agua subterránea: 29 % (22 % bombeo y 7% dren El Carrizal)

*Nota:* al agua de superficie le fue sustraída la del arroyo El Carrizal y sumada al bombeo.

La lluvia es el componente más importante del agua aportada al suelo de la subcuenca. El bombeo se presenta como componente compensador, aunque a nivel de toda la subcuenca es menos perceptible que cuando lo hace a nivel de parcelas cultivadas, como se verá más adelante.

En el suelo cultivado las proporciones entre los promedios cambian:

Lluvia:	17 %
Agua superficial:	24 %
Agua subterránea:	58 % (44 % bombeo y 14 % dren El Carrizal)

Esos porcentajes complementarios varían en forma importante a lo largo de la serie periódica; existen algunos períodos (1994/95, 1996/97 y 1998/99) en los que los bombeos calculados superan por sí solos el 50 % del total y otros en que los mismos representan menos del 35 % (1983/84, 1984/85 y 1992/93). El bombeo del agua subterránea está condicionado principalmente por la presencia del agua de lluvia; su explotación aumenta cuando descienden las cantidades llovidas, lo que se debe a que la mayor parte del bombeo se efectúa en superficies cultivadas que no reciben agua de superficie. Es decir, que el bombeo compensa el déficit pluvial. También se puede observar que la percolación por debajo del suelo oscila en sintonía con las dotaciones superficiales, lo que podría indicar que la ineficiencia de manejo a nivel parcelario se manifiesta más claramente en parcelas regadas con agua superficial (y agua subterránea provista por el arroyo El carrizal) que con agua subterránea bombeada.

En el área inculca y con vegetación natural, se ve claramente la respuesta de la evapotranspiración a la cantidad de agua precipitada. También puede observarse que, salvo algún año rico en lluvias, la recarga que produce el agua de lluvia es poca; en relación con la percolación total en la parcela representa el 3,5% y, el resto, 96,5%, corresponde al retorno de riego.

El bombeo presenta sus valores más altos desde mediados de la primavera a la mitad del verano.

Si se consideran las acciones vinculadas exclusivamente al movimiento vertical del agua y a la vegetación (cultivada y natural) provocan una ganancia neta de los acuíferos del orden de los 11 hm<sup>3</sup>/año. Esto es atribuible, principalmente, al uso del agua superficial donde la infiltración en los canales tiene una incidencia importante, ya que los dos componentes del balance que se presentan a nivel de parcela parecen compensarse a lo largo de la serie.

De los balances realizados (R/Dvn) surge que en la mayoría de los períodos los acuíferos ganan agua y que el bombeo del agua subterránea sólo representa, en promedio, aproximadamente el 86% del total recargado por canales y áreas cultivadas. De esto último, se puede inferir que existe una mejoría de la eficiencia del sistema complejo superficial- subterráneo cuando se explota agua subterránea que es producto de la ineficiencia del manejo de la de superficie.

## **MONTAJE Y APLICACIÓN DEL MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA**

El área definida para el montaje del modelo MODFLOW, y en consecuencia para el modelo de superficie que proveerá parte de la información de entrada a aquel, abarca el sur del río Mendoza y un sector al norte del mismo (760 km<sup>2</sup>). Esa área fue discretizada en polígonos o celdas cuadrangulares de 1000 metros por lado. Esto dio origen a una grilla de 35 km. de oeste a este y de

52 km. de norte a sur, con 1820 celdas de 100 has cada una (Figura 2). Desde los puntos de vista hidrogeológico e hidrológico sólo 785 celdas se consideraron activas, por lo que la ejecución de los modelos se realizó sobre 78.500 has. Cada una de estas celdas posee características que le son propias y constantes durante la ejecución del modelo; además, a lo largo de ese período de ejecución, cada celda recibe información de carácter mensual.

De lo anterior surge que el procesamiento de la información debe tener en cuenta la caracterización de las celdas con datos constantes y la mensualización de las series de datos variables.

### **Descripción del modelo**

El MODFLOW es un modelo que simula el flujo de agua subterránea en las tres dimensiones de una cuenca sedimentaria, desarrollado por el Servicio Geológico de los EE.UU a mediados de la década del 70. Desde aquella década hasta hoy ha sufrido varias actualizaciones. Utiliza el método de diferencias finitas para resolver un sistema de ecuaciones basadas en fórmula de Darcy-Weisback, que explica el movimiento de un fluido en un medio poroso saturado (Mc Donald M. y Harbaugh W., 1988).

Para el presente trabajo se utilizó este modelo (en su versión 2000) con una interfase gráfica, Visual MODFLOW Pro V. 3.0 desarrollados por Waterloo Hydrogeologic Inc., que facilita y permite visualizar el ingreso de datos y los resultados del procesamiento de los mismos.

El Visual Modflow soporta a Modflow como pre y post procesador. La entrada de datos al Modflow es generada por Visual Modflow y salvada en un juego de archivos que son leídos por el Modflow cuando se ejecuta. La salida con los resultados es importada al Visual Modflow para su posterior visualización.

Entre los resultados que entrega en sus salidas se encuentra un balance hídrico, cotas, velocidades y direcciones de flujo.

El primer paso en el montaje fue definir el modelo conceptual de la cuenca, que es una descripción de alto nivel de la misma. Para ello se importó el plano base de la figura 2 en el cual se encontraban definidos los límites de la cuenca y se creó una grilla de tres dimensiones (3D) cuyas magnitudes en profundidad coincidente con el relleno sedimentario y en superficie se corresponden con lo descrito a continuación.

El borde de cuenca se estableció trazándolo a través de los puntos de contacto geológico entre la formación sedimentaria del cuaternario y otras más antiguas. En profundidad, se asumió, para el área de modelado, que el acuífero es libre en toda su extensión, por lo que se definió solo un cuerpo acuífero.

Se definieron como celdas activas a todas las que se encuentran dentro de los límites de la cuenca, entendiéndose como activas a aquellas que son susceptibles de ser afectadas por acciones externas de recarga y descarga y los niveles de agua subterránea varían en el tiempo. Todas ellas fueron afectadas de pozos para aplicar la recarga y el bombeo.

Para su funcionamiento, el modelo MODFLOW posibilita la habilitación de diferentes módulos. Para este caso se habilitaron los módulos de drenaje, de bombeo y de evapotranspiración.

El módulo de drenaje, considera el drenaje de la cuenca desde el acuífero libre a través del arroyo El Carrizal

En el módulo de bombeo se especifica, además de la extracción de agua por bombeo en cada celda activa, la recarga como agua que se incorpora al acuífero implementada mediante pozos inyectores.

Finalmente, el módulo de evapotranspiración se habilitó para toda la cuenca, estableciéndose que el proceso evapotranspiratorio desde el acuífero comience a producirse cuando el nivel estático del mismo se encuentre a menos de 1 metro de profundidad respecto de la superficie del terreno.

Además, se decidió que la aplicación del modelo con la finalidad de conocer la respuesta de la cuenca de agua subterránea se realizara en estado transitorio, tomando 15 años para el ajuste y 5 para su validación. Esos períodos anuales comienzan en el mes de setiembre de 1979 y terminan en agosto de 1999.

### **Información**

Para cada celda activa de la grilla se especifican los siguientes datos:

- Cota de techo (m).
- Cota de base (m).
- Conductividad hidráulica horizontal (m/día).
- Conductividad hidráulica vertical (m/día).
- Coeficiente de almacenamiento específico (1/m).
- Coeficiente de rendimiento específico (adimensional).
- Cota de los drenes en las celdas correspondientes (m).
- Conductancia de los drenes en las celdas correspondientes (m<sup>2</sup>/día).
- Cota de agua al inicio de la simulación (m).
- Recarga en celdas especificadas a nivel de promedios mensuales (m/día).
- Bombeo en aquellas celdas que contienen pozos activos (m<sup>3</sup>/día).

A los efectos de la modelación se dividió la cuenca en 4 zonas en las cuales las celdas contenidas tienen en todos sus puntos las mismas propiedades hidráulicas. Así, para el caso de conductividad hidráulica horizontal, vertical y coeficientes de almacenamiento se definieron 16 parámetros.

Para especificar las condiciones de borde del modelo se definieron:

- Nueve celdas de cota constante en el extremo norte de la cuenca. Dado que la densidad tanto espacial como temporal de las observaciones de nivel de agua no permitía una parametrización más detallada, se eligió establecer un parámetro de cota constante (CHD) para cada uno de los 15 ciclos hidrológicos (setiembre-agosto) utilizados en la calibración, vinculándolo al derrame del río Mendoza en Cacheuta en cada período, mediante la ecuación calibrada:

$$CHD_t = 776.85 + 11.602 \ln(Derr_t)$$

- Diez celdas de cota constante (770.80 m) en la frontera sur de la subcuenca Carrizal, para reflejar el flujo subterráneo hacia el Dique Carrizal. No se poseen observaciones que permitan calibrar la magnitud de este flujo. Se ha calibrado de manera de reflejar de la mejor forma posible las cotas observadas para los pozos

Los parámetros del modelo, como las conductividades hidráulicas horizontal y vertical, y las conductancias de los drenes, surgieron del proceso de calibración. Las conductividades hidráulicas horizontales utilizadas como partida para ser ajustadas durante el proceso de calibración, fueron resultado de los ensayos de bombeo realizados en pozos particulares.

Para cada una de las celdas fue necesario establecer sus cotas de techo y base. Como punto de partida se utilizó la topografía realizada por el Departamento General de Irrigación (DGI) al norte de la ruta provincial n° 86, conocida también como Carril a Tupungato. Hacia el sur del Carril a Tupungato, se tomaron puntos acotados de la Red Altimétrica Rural de Spartan Air Service (que se apoyó en puntos del IGM) y pozos acotados a partir de ella. Las cotas topográficas de superficie en el centro de cada celda de la grilla fueron obtenidas mediante interpolación. Las cotas de las celdas de la base resultan de las profundidades obtenidas a través de los métodos geofísicos aplicados a la cuenca y de la interpretación hidrogeológica que dio origen al mapa estructural. La obtención de la cota del basamento para cada celda requirió del mismo procedimiento descrito para la superficie del terreno, el cual también se utilizó para definir los niveles del agua subterránea. La información fuera del área de modelado es imprecisa y no se tomó en cuenta debido a que es una extensión de datos resultante del método de grillado utilizado.

Para determinar las cotas de las celdas de drenaje del arroyo El Carrizal, se efectuó una nivelación partiendo de puntos de la Red Altimétrica Rural; simultáneamente, se tomaron las coordenadas Gauss Krüger con un navegador satelital (GPS).

A partir de estas determinaciones y de las curvas topográficas se calcularon las cotas en el centro de cada celda recorrida por el arroyo, cuya longitud extraída del plano base es de aproximadamente 21 km.

Una vez incorporados los parámetros iniciales del subsuelo y los datos que caracterizan físicamente a la cuenca, se agregó la información hidrológica apropiada para comenzar con el proceso de calibración. Dado que la misma se realizó en estado de flujo transitorio, fue necesario preparar información de aquellos componentes que varían a través de los períodos de simulación: días, meses y años. Esto es así porque la simulación en estado transitorio implica que partiendo de una situación de inicio dada se alcanza otra situación final, teniendo en cuenta la variable tiempo.

Como ya se mencionó, el modelo se corrió para 20 períodos anuales: 15 años para el ajuste y 5 para su validación (setiembre de 1979 y terminan en agosto de 1999). Se tomaron como cotas de agua de partida las medidas a campo durante el período de máxima quietud del acuífero, correspondientes al invierno del año 1979.

Las recargas en las celdas fueron el resultado de sumar las infiltraciones del río Mendoza, del canal Cacique Guaymallén y de las zonas urbanas a los retornos de riego e infiltración en los canales calculados a través del modelo JUANCRAS utilizando información meteorológica y dotación de canales a nivel de promedio mensual, desde setiembre de 1979 a agosto de 1999.

La recarga del río Mendoza en el tramo Cacheuta – Cipolletti se calculó con la ecuación desarrollada por el INA (Hernández, J., 1984),  $I = 1,086 * D^{0,58}$ , donde I es el volumen de agua

infiltrado durante un mes como consecuencia del derrame D ocurrido durante ese mismo período de tiempo.

Entre Cipolletti y puente Barrancas se aplicó la misma ecuación anterior pero afectándola por un coeficiente de 0.666 que tiene en cuenta la proporción entre áreas mojadas aguas arriba y aguas abajo del dique Cipolletti. En este caso, D representa el volumen mensual de agua que como sobrante o desareno escurre aguas abajo del dique Cipolletti por el curso del río.

Para estimar la infiltración ocurrida a través del lecho del canal Cacique Guaymallén se utilizó un relevamiento del mismo realizado por la Universidad Tecnológica Nacional para el Departamento General de Irrigación. A base del mismo se determinaron las áreas no impermeabilizadas de los tramos del cauce que se encuentran dentro del área del modelo (aproximadamente 10 ha en total). De las planillas de distribución de caudales de la Subdelegación de Aguas de Río Mendoza se extrajeron los días que estuvo dotado el canal durante los 20 años, discriminándolos según la dotación fuera para riego o uso público. A partir de allí se asumió que, cuando la dotación estaba destinada al riego, la superficie del cauce no impermeabilizada se encontraba mojada en su totalidad y a través de ella se producía la infiltración; cuando se trataba de uso público, la infiltración sólo se producía a través del 20% de ella. Finalmente, el caudal de infiltración adoptado fue de 60 l/s.ha, valor que surge de experiencias realizadas por el ex CRAS en terrenos de características similares. Con esos elementos como base se calcularon las infiltraciones mes a mes para cada una de las celdas recorridas por el canal

Los criterios y cálculos de la infiltración del agua potable en zonas urbanas, al no contarse con registros históricos, se aplicaron por igual a todos los años considerados en el estudio. Los datos que sirvieron de base para los cálculos fueron obtenidos de una entrevista que se tuvo con el Director de Química y Saneamiento de la Municipalidad de Luján de Cuyo.

Los bombeos en las celdas fueron el resultado de sumar los considerados como con fines industriales a los calculados para la zona de riego a través del modelo JUANCRA.

Los bombeos industriales considerados corresponden a los pozos de Repsol-YPF de Agrelo y Ugarteche y del Parque Industrial de Luján de Cuyo.

### **Calibración del modelo**

En el proceso de calibración se utilizaron 1295 observaciones de nivel de agua disponibles para 70 perforaciones distribuidas en el área, que pertenecen a la red de medición de niveles estáticos del INA – CRA, en el intervalo comprendido entre setiembre de 1979 y agosto de 1994.

En este caso se ha utilizado como criterio para evaluar la calibración el error cuadrático medio de los desvíos de lo simulado respecto de lo observado.

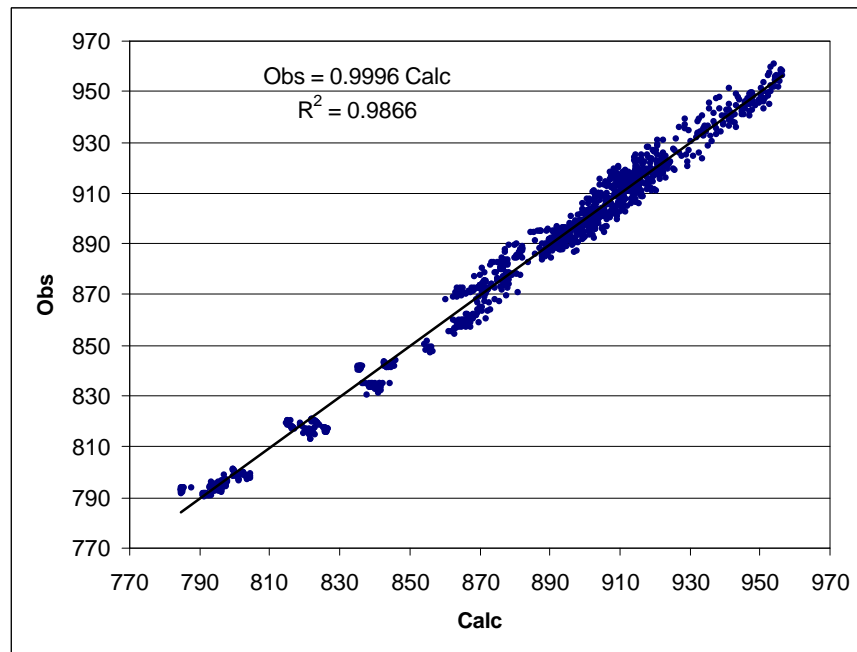
Para la calibración del drenaje por el arroyo El Carrizal se dispone de aforos instantáneos de las derivaciones para riego en las cinco tomas existentes y del vuelco del arroyo al dique. Se trata de aforos realizados cada dos meses, a veces cada tres; para el resto de los meses se ha considerado valores interpolados.

Para la calibración ha sido necesario suponer que:

- los valores instantáneos observados o interpolados son representativos de la derivación media de cada mes.
- la suma de dichos valores es equivalente al drenaje total del arroyo.

El criterio de calibración utilizado ha sido minimizar el error cuadrático medio del drenaje total, con la restricción de que el caudal de drenaje disponible para cada toma no sea inferior a la observación de derivación, siendo el caudal pasante el resultante de restar al drenaje simulado la derivación observada. No existen mediciones de caudal pasante que permitan calibrar este aspecto.

Para analizar la calidad de la calibración realizada se han considerado los desvíos entre los valores observados de nivel de agua y los calculados por el modelo. Del análisis de los desvíos se obtiene un desvío medio de  $-0.39$  m con una desviación estándar de  $4.63$  m. En la figura 3 se pueden observar los pares de valores de cota en metros (calculado, observado), así como la recta resultado de ajustar esos valores por una recta forzada a pasar por el origen.



**Figura 3. Comparación de cotas (m) observadas y calculadas (calibración)**

De estos resultados se puede concluir que el modelo calibrado reproduce aceptablemente la variabilidad de las observaciones ( $R^2 = 98.66\%$ ), aunque en promedio tiene un ligero sesgo hacia arriba, reflejado en el  $-0.39$  m del desvío medio y el  $0.9996$  de la pendiente de la recta (comparado con el 1 correspondiente a la inexistencia total de sesgo).

En lo que respecta al tamaño de los desvíos se presenta la distribución de frecuencias de los desvíos según la magnitud del desvío y el gráfico correspondiente (figura 4).

Desvíos	Frecuencia
	0
-16 a -14	0
-14 a -12	0
-12 a -10	12
-10 a -8	46
- 8 a -6	98
- 6 a -4	123
- 4 a -2	187
- 2 a 0	277
0 a 2	192
2 a 4	109
4 a 6	113
6 a 8	72
9 a 10	49
10 a 12	17
12 a 14	0
14 a 16	0
<b>Total</b>	<b>1295</b>

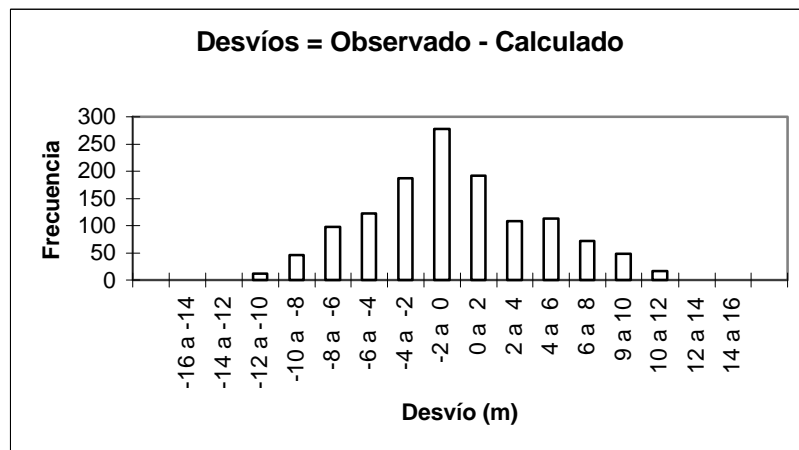


Figura 4. Distribución de frecuencias de los desvíos (calibración)

La tabla siguiente consigna los valores de desvío inferior y superior que incluyen un porcentaje determinado de las observaciones. Por ejemplo, el 50% central de las observaciones presentan desvíos en el intervalo  $-3.61; 2.77$ , calculado mediante los percentiles 25 y 75, respectivamente.

	Porcentaje central de las observaciones						
	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%
Percentil inferior	-3,50	-4,20	-5,32	-6,42	-7,69	-9,31	-10,90
Percentil superior	2,57	3,78	4,91	6,18	8,07	8,87	11,24

Se observa que un porcentaje importante de las observaciones se ubica entre desvíos que, aunque un poco altos, son explicables por la imprecisión de la topografía y la discretización utilizada para el modelo.

En la figura 5 se presentan los caudales medios mensuales simulados para el drenaje total por el arroyo Carrizal y la suma de caudales instantáneos observados o interpolados para la observación del mes.

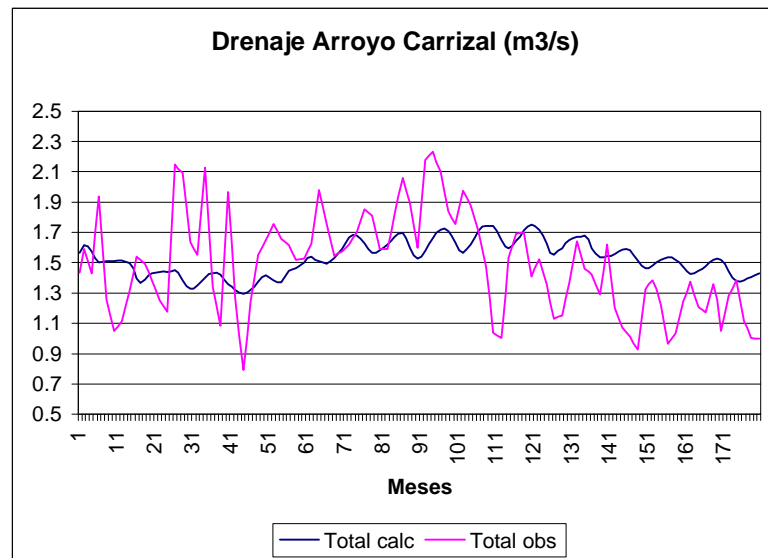


Figura 5. Comparación de caudales de drenaje

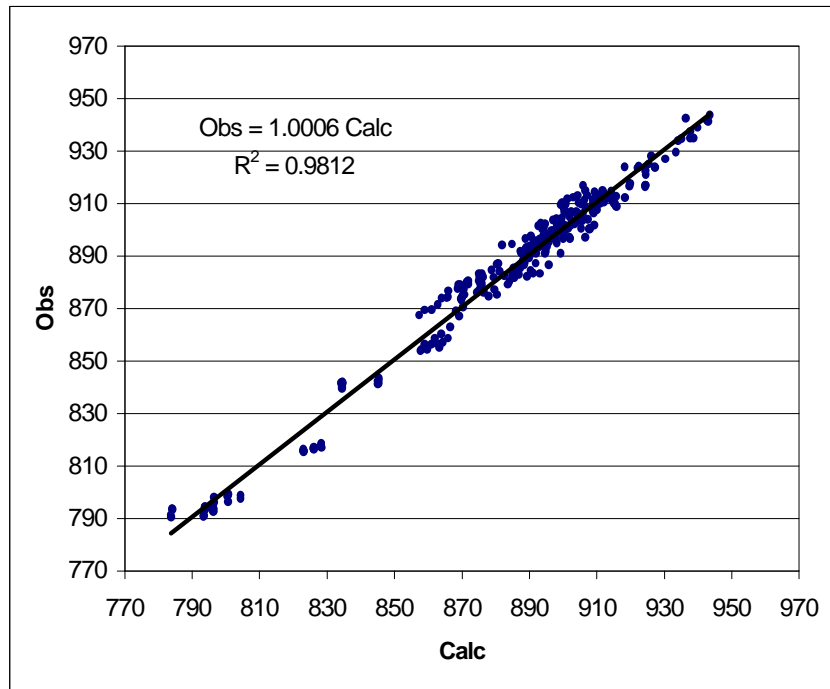
De la comparación de estos resultados surgen dudas sobre la precisión y representatividad de los caudales instantáneos medidos, aunque es de destacar que son las únicas observaciones disponibles. No ha sido posible reproducir la gran variabilidad existente en los caudales medidos.

Los caudales medios calculados, con un mínimo de 1.30 m<sup>3</sup>/s y un máximo de 1.75 m<sup>3</sup>/s, se consideran razonables para el drenaje natural del arroyo, resultando en un promedio anual de 18.3 hm<sup>3</sup> de drenaje para el período 1979-94.

### **Validación del modelo de agua subterránea calibrado**

En el proceso de validación se utilizaron las observaciones de nivel de agua disponibles para 66 perforaciones en el área, en el intervalo comprendido entre setiembre de 1994 y agosto de 1999. Se trabajó con un total de 339 observaciones.

Para analizar la calidad de la calibración realizada se han considerado los desvíos entre los valores observados y los calculados por el modelo. Del análisis de los desvíos se obtiene un desvío medio de -0,01 m con una desviación estándar de 5.07 m. En la figura 6 se muestran los pares de valores de cota en metros (calculado, observado), así como la recta resultado de ajustar esos valores por una recta forzada a pasar por el origen.

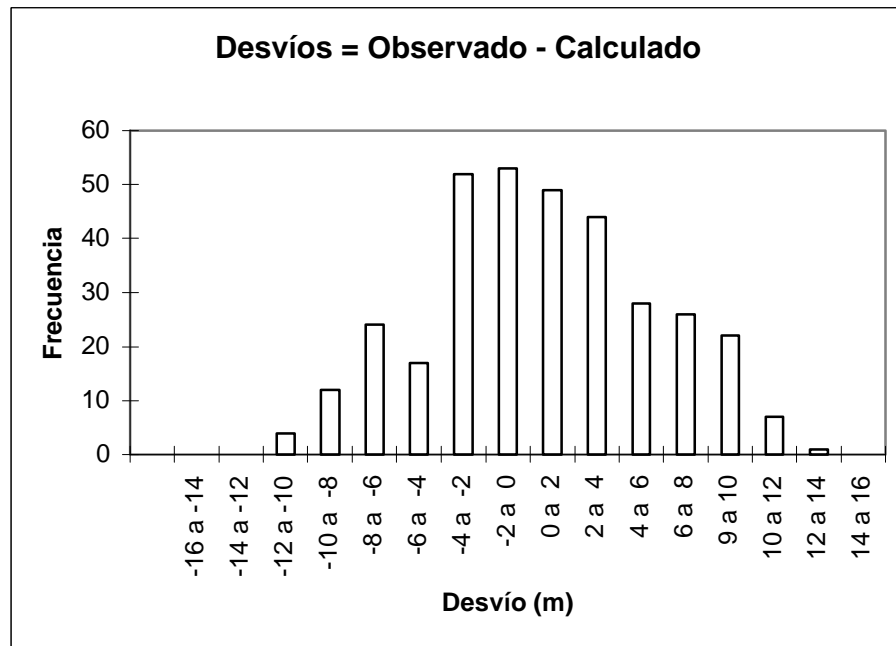


**Figura 6. Comparación de cotas (m) observadas y calculadas (validación)**

De estos resultados se puede concluir que el modelo calibrado reproduce aceptablemente la variabilidad de las observaciones de validación ( $R^2 = 98.12\%$ ), aunque en promedio muestra un ligero sesgo hacia abajo, reflejado en el 1.0006 de la pendiente de la recta (comparado con el 1 correspondiente a la inexistencia total de sesgo).

En lo que respecta al tamaño de los desvíos se presenta la distribución de frecuencias de los desvíos según la magnitud del desvío y el gráfico correspondiente (Figura 7).

Desvío	Frecuencia
-12 a -10	0
-10 a -8	4
-8 a -6	12
-6 a -4	24
-4 a -2	17
-2 a 0	52
0 a 2	53
2 a 4	49
4 a 6	44
6 a 8	28
9 a 10	26
10 a 12	22
12 a 14	7
14 a 16	1
-16 a -14	0
	0
<b>Total</b>	<b>339</b>



**Figura 7. Distribución de frecuencias de los desvíos (validación)**

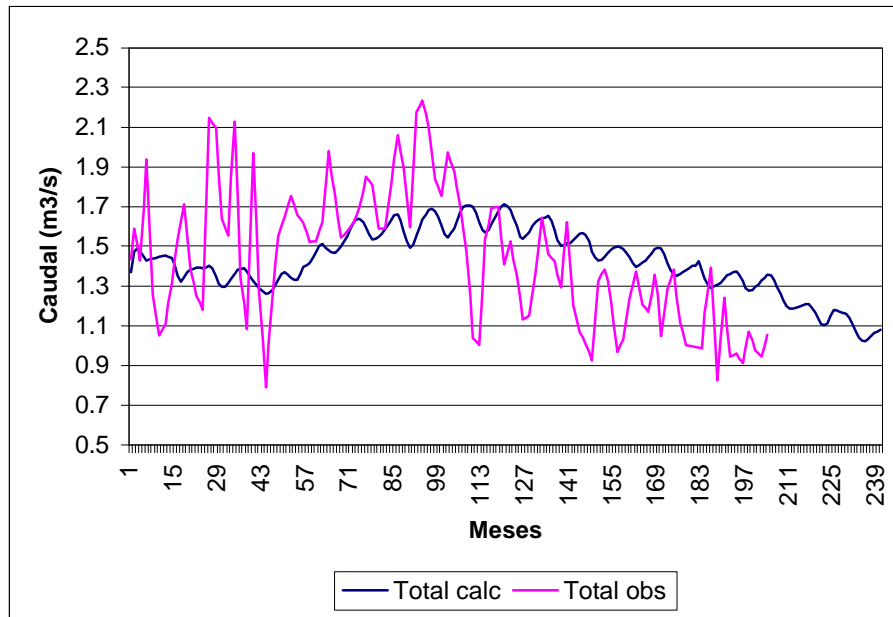
La siguiente tabla consigna los valores de desvío inferior y superior que incluyen un porcentaje determinado de las observaciones. Por ejemplo, el 50% central de las observaciones presentan desvíos en el intervalo  $-3.36, 3.21$ , calculado mediante los percentiles 25 y 75, respectivamente.

	Porcentaje central de las observaciones					
	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Percentil inferior	-3.36	-3.92	-4.81	-7.20	-8.27	-10,02
Percentil superior	3.21	4.28	5.85	6.91	8.93	9.81

Se observa que un porcentaje importante de las observaciones se ubica entre desvíos de tamaño similar a los encontrados en la calibración.

En lo que respecta a la validación de caudales de drenaje del arroyo Carrizal sólo se dispuso de observaciones para el período setiembre 1994 – agosto 1996. Se pueden formular consideraciones similares a las realizadas para la calibración.

En la figura 8 se presentan los caudales medios mensuales simulados para el drenaje por el Arroyo Carrizal y la suma caudales instantáneos observados o interpolados para la observación del mes. Se incluye el período total 1979-1999, correspondiendo los meses 181 (setiembre de 1994) a 204 a las observaciones disponibles en el período de validación.



**Figura 8. Comparación de caudales de drenaje (m<sup>3</sup>/s)**

### **Resultados y discusión**

Luego de los procesos de calibración y de validación, se ejecutó el programa MODFLOW, siempre en estado transitorio, para los 20 períodos ya mencionados (1979/99). En la tabla 1 se observa una síntesis de los resultados que arrojaron esas pasadas. En las columnas se encuentran los valores obtenidos para cada uno de los componentes del balance del acuífero en cada período y, en la parte inferior de cada una de ellas, sus valores promedio, máximo y mínimo.

**Tabla 1. Balance del acuífero para la subcuenca El Carrizal**

Período	Derrame Río Mendoza	Flujo horizontal ingreso (norte)	Recarga vertical	Ingreso total	Bombeo total (agríc + ind)	Flujo horizontal egreso (sur)	Drenaje del A° El carrizal	Evapotranspiración acuífero freático	Egreso tota	Variación de almacenamiento
79-80	1550,2	86,1	72,7	158,8	73,3	48,3	45,7	2,1	169,3	-10,6
80-81	1853,6	107,0	80,0	187,0	67,7	40,8	43,8	3,7	156,0	31,0
81-82	1279,8	83,4	69,5	152,9	73,0	39,8	42,8	3,9	159,3	-6,6
82-83	2813,8	136,2	81,0	217,2	6,9	39,7	41,9	3,9	154,3	62,9
83-84	1968,9	122,6	91,6	214,2	53,4	39,7	44,7	4,0	141,8	72,3
84-85	1823,7	108,8	86,5	195,3	55,6	40,0	49,5	4,4	149,5	45,8
85-86	1342,5	81,9	72,7	154,7	66,7	40,7	52,2	5,5	165,1	-10,5
86-87	2123,2	108,3	92,5	200,9	65,5	41,5	52,7	6,3	166,0	34,9
87-88	2157,8	121,7	93,1	214,8	71,1	42,0	54,2	6,3	173,6	41,2
88-89	1383,0	89,3	74,5	163,8	67,5	41,8	54,8	6,0	170,1	-6,3
89-90	1233,5	74,1	67,3	141,4	67,3	41,6	53,8	5,8	168,6	-27,1
90-91	1067,1	62,3	67,6	129,9	63,0	41,7	52,3	6,3	163,3	-33,4
91-92	1735,9	91,2	65,0	156,2	59,7	41,7	49,9	6,0	157,3	-1,1
92-93	1672,7	97,0	67,5	164,6	50,6	41,5	48,4	5,8	146,4	18,2
93-94	1422,6	87,4	62,2	149,6	71,6	41,3	46,9	5,8	165,6	-16,0
94-95	1448,1	84,2	65,3	149,5	82,3	40,9	44,8	5,7	173,7	-24,2
95-96	1165,7	72,4	64,8	137,2	66,1	41,3	44,5	6,0	157,9	-20,7
96-97	838,1	49,9	47,8	97,7	76,2	40,9	41,6	5,6	164,5	-66,8
97-98	1328,0	69,4	69,4	138,7	64,4	40,5	39,2	5,4	149,6	-10,8
98-99	989,1	62,4	51,8	114,2	70,3	40,4	36,5	5,5	152,8	-38,6
<b>Prom</b>	<b>1559,9</b>	<b>89,9</b>	<b>72,1</b>	<b>161,9</b>	<b>66,7</b>	<b>41,3</b>	<b>47,0</b>	<b>5,2</b>	<b>160,2</b>	<b>1,7</b>
<b>Min</b>	<b>838,.</b>	<b>49,9</b>	<b>47,8</b>	<b>97,9</b>	<b>82,3</b>	<b>48,3</b>	<b>36,5</b>	<b>6,3</b>	<b>141,8</b>	<b>-66,8</b>
<b>Max</b>	<b>2813,8</b>	<b>136,2</b>	<b>93,1</b>	<b>217,2</b>	<b>50,6</b>	<b>39,7</b>	<b>54,8</b>	<b>2,1</b>	<b>173,7</b>	<b>72,3</b>

La segunda columna presenta los derrames anuales del río Mendoza como elemento de referencia. Las tres columnas que le siguen hacia la derecha contienen los ingresos, parciales y total, al acuífero. El flujo subterráneo desde el norte, salvo pequeñísima recarga vertical de celdas próximas al río Mendoza, puede asumirse en su totalidad como aporte del río a la subcuenca; se trata del 5,8 % del derrame del río en promedio. La recarga vertical es la suma de lo infiltrado en los lechos de los canales, la percolación en las áreas regadas y en las áreas de secano no cultivadas. La contribución del río Mendoza es casi siempre superior a lo largo de la serie, especialmente en años ricos desde el punto de vista hídrico. Las proporciones en que ambos participan como promedio y a lo largo de la serie son:

	Promedio (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)
- Ingresos al acuífero			
- Flujo subterráneo desde el norte	55	62	47
- Recarga vertical	45	53	38

Las cinco columnas que siguen a las descritas en el párrafo anterior contienen los valores periódicos calculados para los componentes efluentes del acuífero y la efluencia total. La primera de ellas, es decir la sexta columna de la tabla 1, contiene el bombeo total de agua subterránea, tanto con destino agrícola como industrial. Ese bombeo total representa en promedio el 41 % del egreso total del acuífero y es siempre el mayor de los componentes de salida. El bombeo industrial constituye una estimación que se estableció fija a lo largo de los 20 períodos de análisis: 5,5 hm<sup>3</sup>/año. El bombeo agrícola estimado ha oscilado entre los 45 y 77 hm<sup>3</sup>/año, con un promedio de 61,2. De ello, surge que el bombeo industrial representa entre 7 y 12 % del total bombeado (9 % promedio).

La séptima columna constituye el flujo subterráneo de salida del acuífero hacia el dique El Carrizal; es la que presenta menor variación.

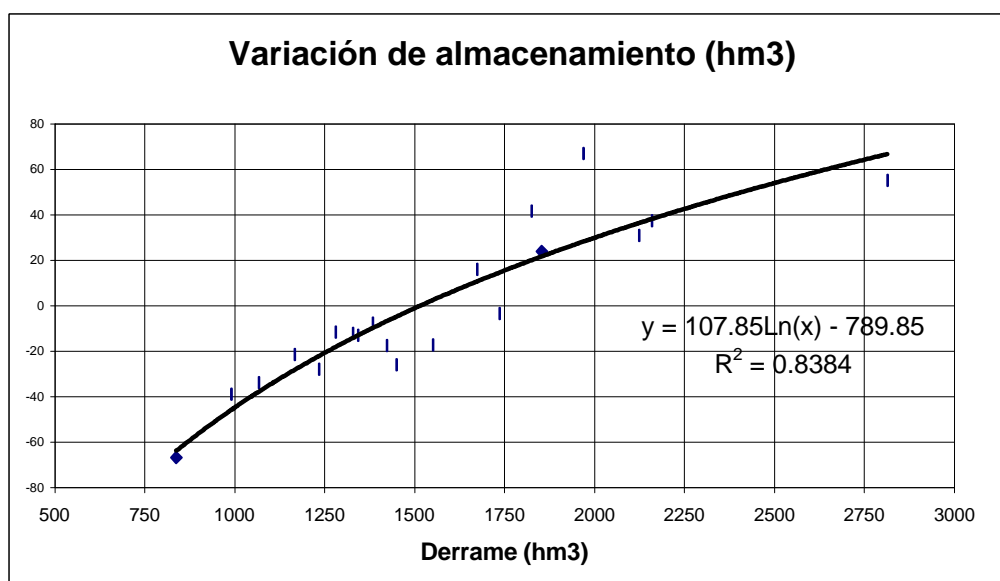
En la octava columna se observa el drenaje total a lo largo del lecho del arroyo El Carrizal. Parte de él es utilizado para riego y el resto vuelca superficialmente al embalse; después del bombeo, constituye el egreso más importante. Varía suavemente a través de los períodos, aunque no se pudo establecer algún paralelismo con ninguno de los componentes del ingreso de agua al acuífero ni con la recarga neta (total ingreso menos bombeo).

La penúltima columna presenta la suma de los componentes egresantes del acuífero. Esos componentes se encuentran en las siguientes proporciones en el promedio:

- Bombeo (agrícola 44%, industrial 11 %)	41 %
- Flujo horizontal de salida (sur)	26 %
- Drenaje del arroyo El Carrizal	29 %
- Evapotranspiración desde el acuífero	4 %

La tabla presenta en su última columna las variaciones del almacenamiento del acuífero que se calcularon para cada período. Puede observarse que los primeros 9 años el acuífero aumenta su almacenamiento, salvo excepciones, y que en los siguientes 11 años tiende a disminuirlo. El promedio de los 20 años daría un saldo de aproximadamente 1.7 hm<sup>3</sup>/anuales, valor que pondría de manifiesto una situación de equilibrio en ese período.

La figura 9 muestra que la variación de almacenamiento se anularía con un derrame en el río Mendoza constante de 1515 hm<sup>3</sup>, cercano al módulo del río (1570 hm<sup>3</sup>).

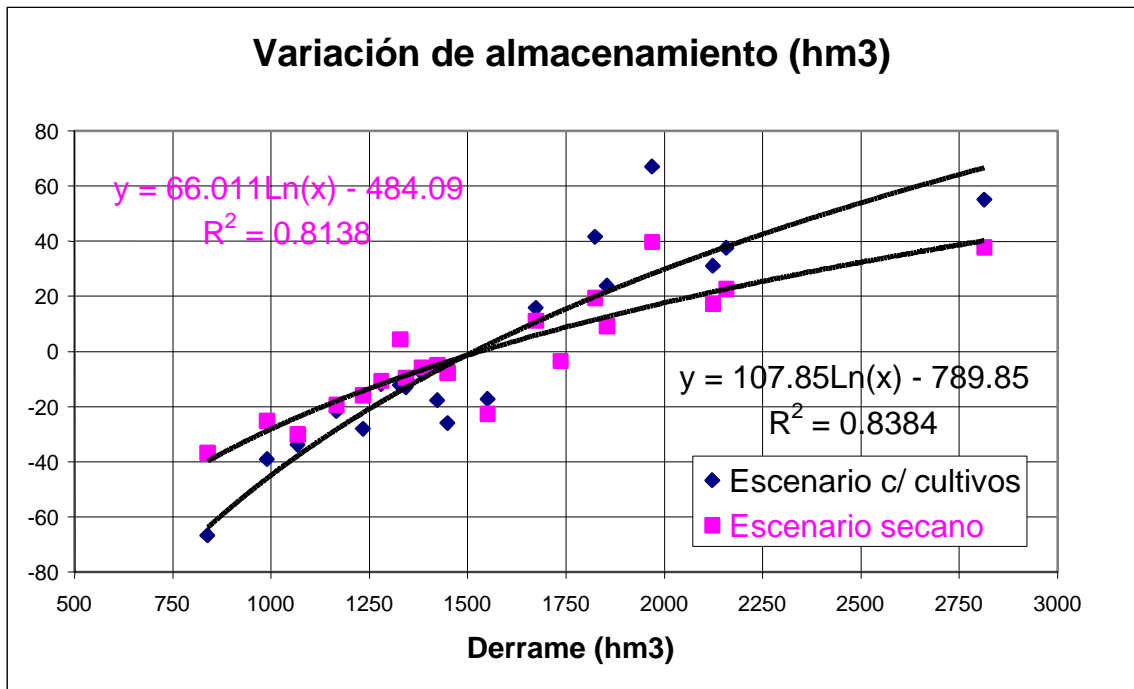


**Figura 9. Variación de almacenamiento del acuífero vs Derrame río Mendoza**

Uno de los escenarios que se analizó es el que considera a toda la subcuenca sin cultivar. Es decir, se ejecutó el programa MODFLOW bajo un régimen de secano como si sólo el río y las lluvias recargasen el acuífero y se eliminasen las alteraciones producidas por la percolación desde canales y el retorno en parcelas regadas y por el bombeo. Los resultados son los siguientes:

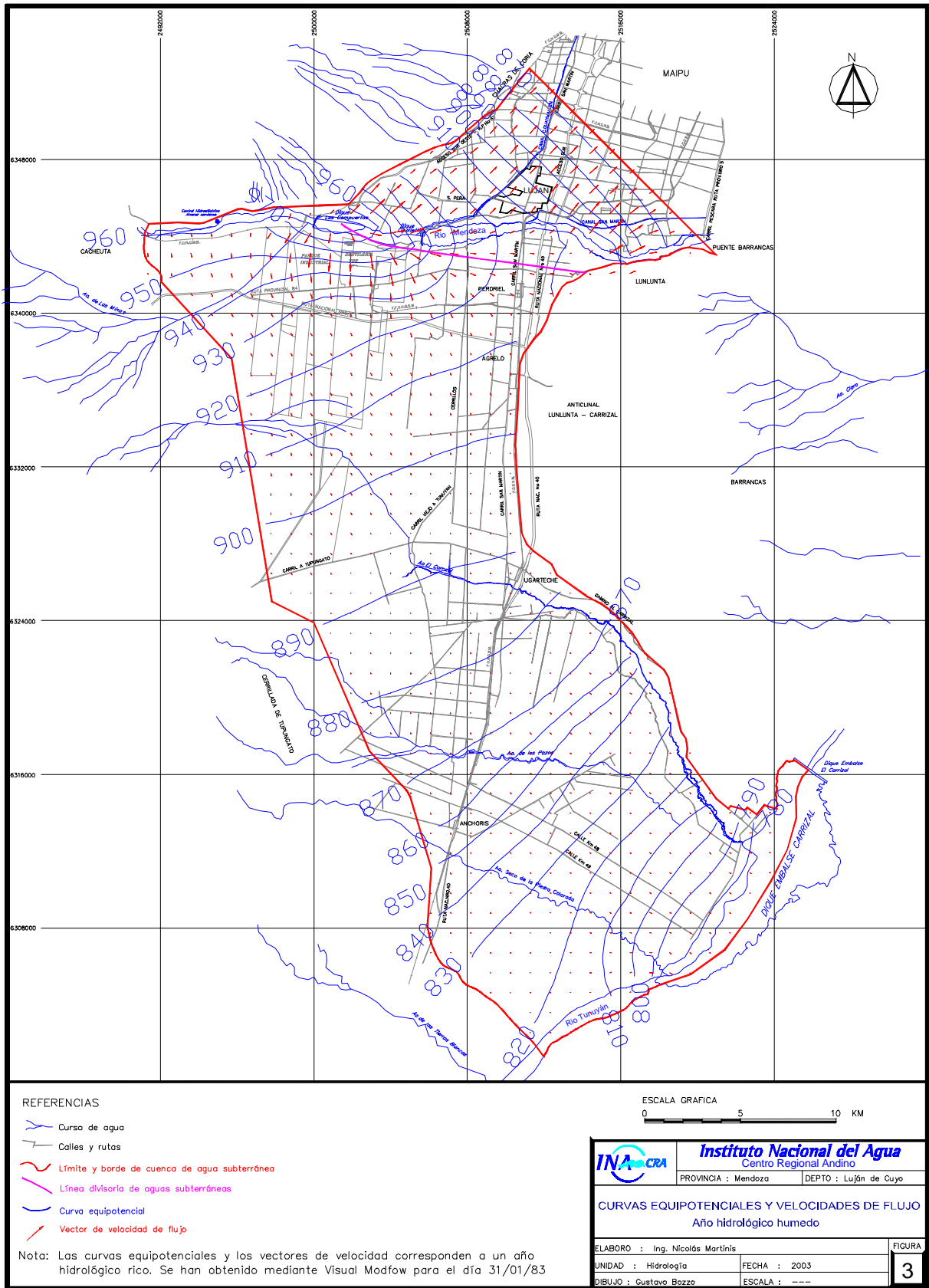
- Existiría una reducción sustancial de la evapotranspiración desde el suelo, de aproximadamente 54 hm<sup>3</sup>/año en promedio (de aprox. 212,5 hm<sup>3</sup>/año a 158,4 hm<sup>3</sup>/año).
- El flujo subterráneo de ingreso desde el norte se reduciría en casi 13 hm<sup>3</sup>/año (de 89,9 hm<sup>3</sup>/año a 77 hm<sup>3</sup>/año).
- Al eliminar el riego, la recarga vertical se reduciría de 72,1 hm<sup>3</sup>/año a 3,1 hm<sup>3</sup>/año.
- En consecuencia, el ingreso total al acuífero se reduciría de 162 hm<sup>3</sup>/año a 80,1 hm<sup>3</sup>/año.
- Las salidas del acuífero también se reducirían:
  - El flujo subterráneo por el sur de 41,3 hm<sup>3</sup>/año a 36,2 hm<sup>3</sup>/año
  - El drenaje de arroyo El Carrizal de 47 hm<sup>3</sup>/año a 40,3 hm<sup>3</sup>/año.
  - La evapotranspiración desde el acuífero de 5,2 hm<sup>3</sup>/año a 2,7 hm<sup>3</sup>/año.
- Por lo que el egreso total de acuífero también se reduciría de 160,2 hm<sup>3</sup>/año a 79,2 hm<sup>3</sup>/año.
- En consecuencia, la variación de almacenamiento promedio para los 20 años es negativa en algo menos de 1 hm<sup>3</sup>/año.

La figura 10 muestra las variaciones de almacenamiento para los escenarios con cultivos y sin cultivos para los años incluidos en el período 1979/99. En ambos casos esas variaciones de almacenamiento se anularían con un derrame en el río Mendoza cercanos a su módulo, lo que puede interpretarse como que las acciones humanas no han cambiado la situación de equilibrio. Puede observarse que, dada la ausencia de recarga vertical inducida y el bombeo, en el caso de secano las variaciones de almacenamiento son de menor magnitud. La situación opuesta produce mayores fluctuaciones en los niveles del acuífero, pero sin alterar sustancialmente el derrame que produce el equilibrio del acuífero.

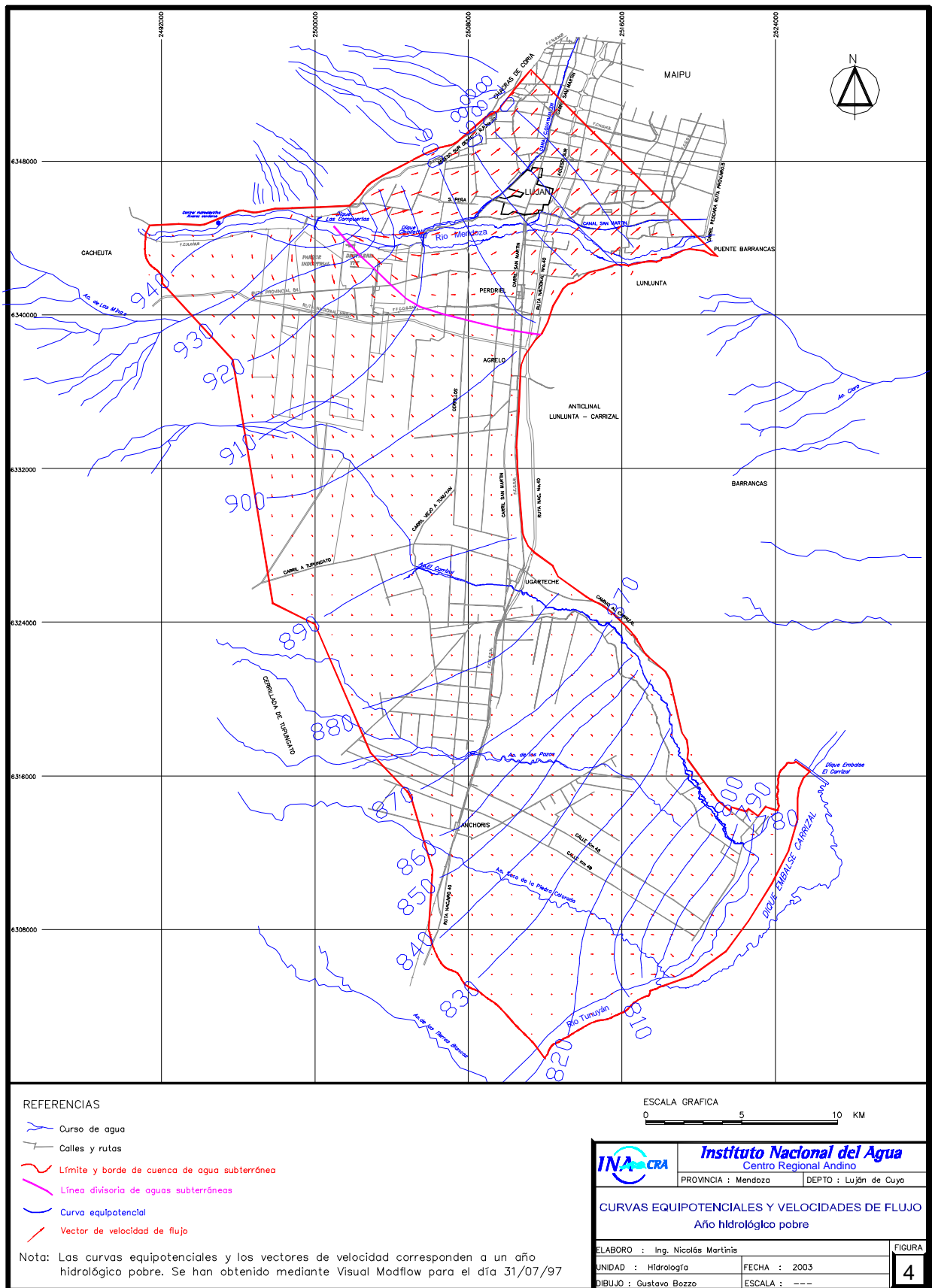


**Figura 10. Variaciones de almacenamiento para los escenarios con cultivos y sin cultivos**

Las salidas gráficas del modelo permitieron definir con mejor precisión las direcciones de flujo del agua subterránea y velocidades. En las figuras 11 y 12, elaboradas para un año húmedo y uno seco, respectivamente, donde se observan sus piezometrías y vectores que indican direcciones y magnitudes relativas de velocidades de flujo.



**Figura 11. Curvas equipotenciales y vectores de velocidades de flujo para un año hidrológico húmedo (1983)**



**Figura 12. Curvas equipotenciales y vectores de velocidades de flujo para un año hidrológico seco (1997)**

### Análisis de sensibilidad a aumentos en la extracción

Con el objeto de mostrar la sensibilidad de los distintos componentes del balance al aumento de la extracción de agua subterránea, se ha analizado aumentos de 10 y 20 por ciento en la extracción neta (a través de un aumento del bombeo, manteniendo constantes todas las otras condiciones de borde del modelo) y tomando como base la situación correspondiente al período 1979-99 modelado.

A continuación se muestra los efectos sobre los promedios anuales de los distintos componentes del balance (los valores entre paréntesis corresponden a los porcentajes de cambio respecto de la situación base):

	Base	+10%		+20%	
Derrame	1559.9	1559.9		1559.9	
Flujo entrante	84.7	85.8	(1.3%)	86.9	(2.7%)
Recarga	72.1	72.1	(0.0%)	72.1	(0.0%)
Bombeo	66.7	73.4	(10.0%)	80.0	(20.0%)
Flujo sur	41.3	41.1	(-0.4%)	41.0	(-0.8%)
Drenaje	45.0	42.5	(-5.4%)	40.2	(-10.6%)
ET	5.1	4.9	(-3.7%)	4.7	(-7.5%)
Delta Almac	-1.3	-4.1		-6.9	

Como era de esperar el efecto más pronunciado se manifiesta en el drenaje del arroyo El Carrizal y en la variación del almacenamiento, estrechamente ligados a las variaciones en los niveles estáticos del acuífero.

El efecto sobre el drenaje no es homogéneo a lo largo del recorrido del arroyo, con efectos más pronunciados en las primeras tomas. Esta situación puede observarse a continuación donde se muestran los promedios anuales de los drenajes naturales en los distintos tramos.

	Base	+10%		+20%	
Bombeo	66.706	73.4	(10.0%)	80.047	(20.0%)
Hasta toma 1	5.823	4.571	(-21.5%)	3.501	(-39.9%)
De toma 1 a toma 2	2.928	2.510	(-14.3%)	2.082	(-28.9%)
De toma 2 a toma 3	10.071	9.575	(-4.9%)	9.052	(-10.1%)
De toma 3 a toma 5	12.487	12.288	(-1.6%)	12.080	(-3.3%)
De toma 5 a toma 6	4.242	4.212	(-0.7%)	4.179	(-1.5%)
De toma 6 a vuelco al río	9.423	9.378	(-0.5%)	9.329	(-1.0%)
Total	44.973	42.534	(-5.4%)	40.222	(-10.6%)

### CONCLUSIONES

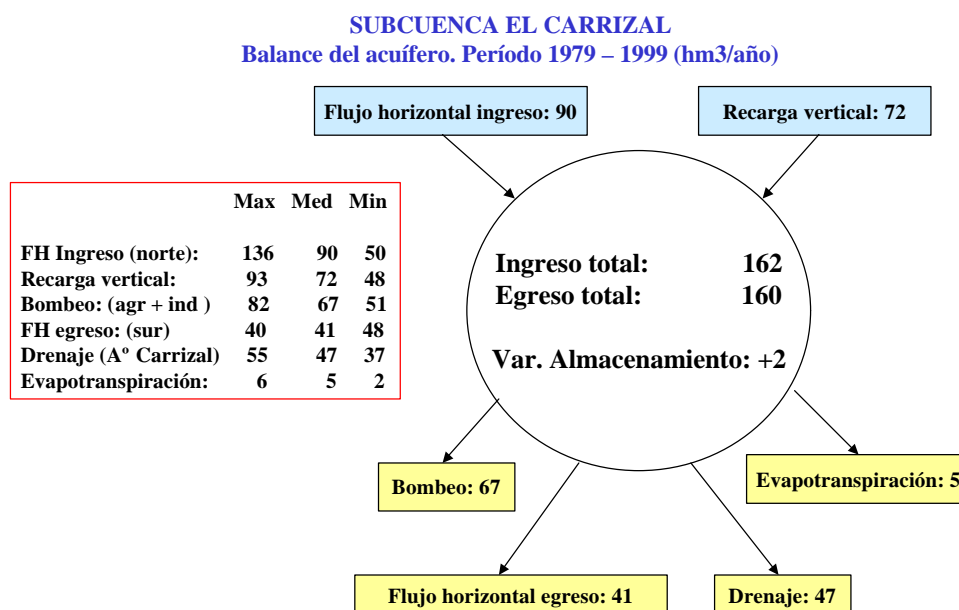
Excepto la conclusión que hace referencia a la calibración del modelo, en todos los párrafos que siguen se concluye respecto de la subcuenca El Carrizal.

- Desde el punto de vista del agua que se incorpora al suelo de toda la cuenca, la lluvia constituye el mayor aporte. Sin embargo, dada la gran extensión sobre la que se produce, se

presenta como deficitaria respecto de la potencialidad evapotranspiratoria existente. Cuando se trata de suelo cultivado su participación no es despreciable, aunque la aleatoriedad de su presencia hace que el agricultor local, en general, no la tenga en cuenta cuando planifica sus riegos.

- La participación de las lluvias en la recarga de acuíferos es pequeña en relación con la que es consecuencia del riego, es decir, las infiltraciones en canales más los retornos de riego.
- El segundo contribuyente al suelo de la subcuenca es el agua subterránea, aunque, como es lógico suponer, sus efectos se manifiestan sólo sobre el área cultivada, al igual que el agua superficial que es el tercer componente. En el área cultivada el proceso evapotranspiratorio es intenso (78 hm<sup>3</sup>/año en 10.467 ha; 745 mm/año) en relación con el área inculca (134 hm<sup>3</sup>/año en 51.767 ha; 259 mm/año).
- El aprovechamiento, considerado como evapotranspiración del agua disponible a nivel de parcela (agua superficial + agua subterránea + lluvia suelo) es relativamente bajo (56 %). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en esta consideración participa la lluvia, la cual, como se dijo antes, suele no ser objeto de planificación.
- El uso del agua subterránea involucra una mayor superficie regada que la que se riega con agua de superficie y también es mayor la cantidad utilizada, especialmente si se contabiliza el agua del arroyo como subterránea.
- A nivel de parcela, en promedio para los 20 años, el agua de bombeo representa más del 50% de la utilizada.
- El grado de calibración del modelo se considera que es bueno y que reproduce aceptablemente la variabilidad de las observaciones. Se considera que puede ser utilizado para simular el comportamiento del acuífero en escenarios que se encuentren en el entorno del escenario de la calibración y validación. Se observan resultados razonables aún para un escenario extremo en ausencia de acciones de carácter antrópico (cultivos y riego).
- Del análisis de las variaciones de almacenamiento del agua subterránea de la subcuenca El Carrizal surge que con un derrame del río Mendoza semejante al módulo del período analizado la subcuenca se encontraría en una situación cercana al equilibrio, con resultados semejantes en el escenario de ausencia de cultivos y riego.
- La morfología de las superficies isopiezométricas (curvas equipotenciales figuras 11 y 12) definidas por el modelo responden a la piezometría observada en general, aunque existen algunas diferencias, entre las cotas de agua subterránea observadas y las calculadas. En esa piezometría se encuentra definida también la divisoria de agua subterránea, la que suele desplazarse hacia el norte en años abundantes de agua y hacia el sur cuando se trata de años pobres.
- El balance hídrico que se incorpora a estas conclusiones permite visualizar los órdenes de magnitud medios y extremos de los componentes del mismo (figura 13).
- La infiltración en el lecho del río Mendoza, cuya manifestación es el flujo horizontal desde el norte, constituye siempre, tanto en años ricos como en años pobres, la mayor parte de la recarga al acuífero.

- El bombeo de agua subterránea constituye siempre la mayor de las salidas del acuífero.



**Figura 13. Balance hídrico**

## BIBLIOGRAFÍA

- Agie, J., V. Berra y O. Demartini** (1969). *Descripción de perfiles en la zona comprendida entre los ríos Mendoza y Tunuyán*. Provincia de Mendoza. CRAS – P 19, San Juan.
- Ambiental S.A.** (1998). *Manifestación General de Impacto Ambiental Emprendimiento Potrerillos*. Volumen 3 - Sección 1. Capítulo 6. Hidrogeología. Provincia de Mendoza.
- Berra, V.** (1972). *Informe con relación a los perfiles litológico generales y radiales del área norte de Mendoza*. CRAS – P 49 San Juan.
- Chambouleyron, J. y F. Olmos** (1969). *Los suelos del área regada por el río Mendoza* (Capítulo 1 de la obra: “Estudio de la prefactibilidad técnica-económica para la construcción del dique embalse Potrerillos”). Gobierno de Mendoza. IATASA-Latino Consultores.
- Coria, E., J. Hernández y M. Poblete** (1984 a). *Consumos especiales riego por bombeo. Zona Norte. Provincia Mendoza*. CRAS – D 84. San Juan.
- Hernández, J.** (1984). *Río Mendoza - Infiltración en el tramo Cacheuta - Cipolletti*. Provincia de Mendoza. CRAS – D 87. San Juan.
- Hernández, J.** (1985). *Balance agrícola de la zona norte de la Provincia de Mendoza. Períodos 1967 a 1983*. CRAS – IT 56, San Juan.
- Hernández, J., N. Mercado, J. Rodríguez, J. Robles y N. Martinis** (1983). *Estudio de la recarga artificial en el río Mendoza. con énfasis en la cuenca Carrizal*. Provincia Mendoza. CRAS – P 265, San Juan.
- Hernández, J.; J. Pazos y N. Martinis** (1996). *Análisis del comportamiento del acuífero subterráneo de la subcuenca El Carrizal ante una hipótesis de incremento del bombeo agrícola*. CRAS - RR-M-025. Mendoza.
- Hernández, Jorge, E. Comellas, R. Barone, G. Bozzo y M. Nuñez** (2002). *Estimación de la infiltración en canales derivados del río Mendoza*. Informe Final. IT-N° 22-CRA. Mendoza
- Hernández, J.** (1982). *Infiltración en la red secundaria del río Mendoza*. CRAS D 39. San Juan

- Martinis, N y H. Herrada** (1997). *Parámetros hidráulicos de la Cuenca Mendoza Norte; Permeabilidad - Almacenamiento – Percolancia. Provincia de Mendoza.* INAS , DI 286, San Juan.
- Martinis, N, A. Alvarez y J. Robles** (1997). *Análisis de las variaciones de nivel del agua subterránea en el valle de Carrizal. Período 1967/1997. Provincia de Mendoza.* INAS , DI 287, San Juan.
- Martinis, N y J. Robles** (2000). *Cuenca hidrogeológica del Oasis Norte de Mendoza. Variación del almacenamiento en el acuífero libre. Período 1969/99. Provincia de Mendoza.* INA - CRA, IT 4, Mendoza.
- Martinis, N. y O. Ortíz** (1985). *Evaluación del estado hidrológico de las cuencas norte y centro, año 1985. Provincia de Mendoza.* CRAS – IT 57, San Juan.
- Martinis, N., E. Coria, J. Bartolomeo y H. Herrada** (1994). *Evaluación del estado hidrológico la cuenca norte de la Provincia de Mendoza.* CRAS – D 132, San Juan.
- Martinis, N., E. Ortíz y J. Bartolomeo** (1983). *Evaluación del estado hidrológico de las cuencas norte y centro. Provincia de Mendoza.* CRAS – D 77, San Juan
- Ortíz, A. y J. Zambrano** (1975). *Investigación geológica del área Mendoza Norte.* CRAS – P 94, San Juan.
- Ortíz, A., J. Zambrano, R. Alvarez, G. Ortíz Maldonado y B. Ortíz** (1975). *Investigación del agua subterránea en el área Mendoza - zona Norte. Provincia de Mendoza.* CRAS – P 89, San Juan.
- PASNOA** (1972). *Investigación de las aguas subterráneas en el noroeste. Argentina. Estudio de las aguas subterráneas en el valle de Carrizal. Informe técnico n° 5.* Nueva York
- Pazos, J, Herrada, H y O. Ortíz** (1993). *Análisis de las mediciones hidrológicas en la Cuenca Norte. Años 1991-1992. Provincia de Mendoza.* CRAS - DI 193, San Juan.
- Pazos, J.** (1972). *Aplicación de modelos digitales en la zona norte de Mendoza.* CRAS – P 48, San Juan.
- Pazos, J.** (1978). *Balance hidrológico subterráneo zona norte. Provincia de Mendoza.* CRAS – P 210, San Juan.
- Pazos, J.** (1988). *Ajuste de los parámetros hídricos JAIM 4 y evolución futura de los niveles de agua subterránea - Modelo ELIS - en la cuenca norte. Provincia de Mendoza.* CRAS – IT 102, San Juan.
- Pazos, J., J. Bartolomeo, O. Ortíz y H. Herrada** (1988). *Evaluación del estado hidrológico de la cuenca norte de Mendoza - Año 1987. Provincia de Mendoza.* CRAS - DI 116, San Juan.
- Pazos, J., J. Bartolomeo, O. Ortíz, R. Nieto y J. Becerra** (1986). *Aplicación del modelo digital JAIM4 en la cuenca de Mendoza Norte.* CRAS – IT 91, San Juan.
- Pazos, J., O. Ortíz y H. Herrada** (1988). *Evaluación del estado hidrológico de la cuenca Mendoza Norte - 1988.* CRAS – IT 111, San Juan.
- Pereyra, M.** (1984). *Avance en el conocimiento hidrogeológico de la zona norte de la Provincia de Mendoza.* CRAS - D 104, San Juan.
- Robles, J.** (1997). *Espesor del relleno aluvial moderno. Interpretación geoeléctrica. Cuenca Norte, Provincia de Mendoza.* INAS , DI 288, San Juan, 1997
- Robles, J. y J. Pazos** (1986). *Evaluación del estado hidrológico de las cuencas de agua subterránea norte y centro para el período de verano año 1986. Provincia Mendoza.* CRAS – DI 48, San Juan.
- Robles, J..** (1983). *Prospección geoeléctrica en la subcuenca Carrizal. Zona Norte - Provincia de Mendoza.* CRAS – D 69, San Juan.
- Robles, J., J. Hernández, N. Mercado, J. Rodríguez y N. Martinis** (1985). *Estudio de la recarga artificial en el río Mendoza, con énfasis en la subcuenca Carrizal.* CRAS – D 158, San Juan.
- Romanella, C..** (1957) *Los suelos de la región del río Mendoza.* Ensayo de Establecimiento de series (Apartado del “Boletín de Estudios Geográficos” N° 14. U.N.C). Mendoza
- Waterloo Hydrogeologic** (2002). *Visual Modflow V. 3.0. User’s Manual.*
- Zambrano, J.** (1985). *Regionalización hidrogeológica preliminar de la Provincia de Mendoza.* CRAS – D 155, San Juan.