

Hidrogeología de la laguna de Gallocanta

Javier San Román Saldaña
Miguel Ángel García Vera*
Óscar Blasco Herguedas**
Pablo Coloma López*

RESUMEN. La laguna de Gallocanta, con una extensión de 14 km², ocupa el fondo de una cuenca endorreica de 536 km² de extensión. Tras permanecer prácticamente sin agua durante siete años consecutivos, la Confederación Hidrográfica del Ebro ha estudiando si su régimen natural se ha visto afectado por los bombeos desde pozos. Desde el año 1998 se han controlando todos los parámetros que influyen en la misma: precipitación, evaporación, evapotranspiración, aportes superficiales, bombeos desde pozos, evolución hidroquímica, y se ha desarrollado un estudio hidrogeológico específico.

Tras la construcción y calibración de un modelo matemático de flujo subterráneo se puede concluir que por lo que respecta a la sucesión de periodos en que la laguna ha presentado agua o ha permanecido seca, la inexistencia de bombeos durante los 34 años simulados no habría provocado que la laguna hubiese mantenido una lámina de agua durante un periodo de tiempo significativamente mayor. Como consecuencia de los bombeos, el volumen de agua almacenado en la laguna se reduce en aquellos periodos de tiempo en los que la laguna presenta agua, aunque esta reducción no es simultánea ni directamente proporcional al volumen de las extracciones.

* Confederación Hidrográfica del Ebro. Pº Sagasta, 24-28. 50071. ZARAGOZA.

** Eptisa. Arapiles 14. 28015. MADRID.

ABSTRACT. Gallocanta Lagoon covers an area of 14 km² at the bottom of an endorreic catchment of 536 km². After a 7-year period of being almost completely dry, the Ebro Hydrographic Confederation (CHE) has been studying whether its natural status has been affected by groundwater abstractions from wells. Since the year 1998 the CHE is monitoring all the parameters that influence in the lagoon: rainfall, evaporation, evapotranspiration, surface run-off, groundwater abstraction, hidrogeochemical data. With all this information a specific hydrogeological study has been carried out.

Once built and calibrated a numerical model for groundwater flow, it can be concluded that, if there had not been groundwater abstractions during the last 34 years the lagoon would not have suffered a significantly shorter dry period. As a result of water pumping, the volume of water stored in the lagoon. After the construction and calibration of a numerical model for groundwater flow, can be concluded that if there had not been groundwater extractions during the last 34 years, the lake would not have been dry a significantly minor period. As a result of the groundwater pumping, the volume of water stored in the lagoon is decreased in those periods of time in which the lagoon has water, but this decrease is neither simultaneous nor directly proportional to the amount of the groundwater abstraction.

Introducción

La laguna de Gallocanta ocupa el fondo de una gran depresión endorreica ubicada en el Sistema Ibérico, entre las provincias de Teruel y Zaragoza, a una cota aproximada de 1.000 m. Su cuenca hidrográfica, a modo de altiplano entre las vecinas cuencas de los ríos Jiloca y Piedra, pertenece a las comunidades autónomas de Aragón (Zaragoza y Teruel) y Castilla-La Mancha (Guadalajara).

La denominada cuenca de Gallocanta, con una superficie de 536 km², es en realidad un conjunto endorreico, donde destacan además las lagunas de La Zaida y Guialguerrero. Presenta una precipitación y temperatura media de 430 mm y 10,7°C.

En años especialmente húmedos (década de los 70) la extensión de la laguna de Gallocanta llegó a ser de 14 km², con una profundidad de 2,45 m, mientras que en épocas de sequía prolongada la laguna queda sin lámina de agua aparente. La salinidad varía notablemente de unos periodos a otros, superando ampliamente a la del mar cuando está próxima a secarse.

La laguna constituye un enclave de extraordinario valor ecológico, siendo el mejor ejemplo de lago salado de Europa occidental. Su singular funcionamiento hídrico permite la existencia de comunidades biológicas adaptadas a estas especiales condiciones. En el año 1994 fue incluida por el Gobierno de España en la lista de zonas húmedas acogidas al convenio de RAMSAR. Recientemente ha sido declarada Reserva Natural Dirigida (Ley 11/2006 de 30 de noviembre; BOE nº 23 de 26 de enero de 2007).

Geología e Hidrogeología

Desde el punto de vista geológico, la cuenca endorreica se sitúa en la zona de enlace de las dos ramas de la Cordillera Ibérica, la aragonesa y la castellana. Al NE afloran los materiales paleozoicos que conforman la sierra de Santa Cruz. Adosados a éstos, y con buzamiento generalizado hacia el SO, se encuentra la serie triásica típica (areniscas rojizas en facies Buntsandstein y dolomías del Muschelkalk) que termina en las facies Keuper, constituidas por arcillas y yesos, sobre las que se asienta la laguna. El resto de la cuenca está formada por materiales principalmente calcáreos, del Jurásico y Cretácico, que se encuentran plegados, dibujando amplios y suaves sinclinales vergentes hacia el NE, separados por anticlinales en los que afloran frecuentemente las facies Keuper. En la zona perilagunar se han desarrollado depósitos de abanicos aluviales cuaternarios que cubren parcialmente los materiales descritos.

El origen del conjunto endorreico es exclusivamente cárstico, constituyendo la laguna lo que se denomina un poljé, o gran sumidero, formado por coalescencia de varias dolinas. En la vecina laguna de La Zaida, se reconoce perfectamente su forma circular típica, al igual que en el denominado “lagunazo” de Gallocanta. La corrosión cárstica sobre las calizas mesozoicas se detiene al alcanzar en la vertical las facies Keuper, momento en el que las dolinas van aumentando en diámetro y uniéndose unas con otras. Posteriormente la captura de diversas cuencas trae consigo gran aporte de agua y sedimentos, que retrabajan el modelado original y lo cubren parcialmente.

Hidrogeológicamente los materiales paleozoicos se comportan como poco permeables, generando gran parte de la escorrentía superficial que llega a la laguna, y que provoca las variaciones bruscas de nivel. Los materiales mesozoicos carbonatados constituyen acuíferos cársticos de flujo difuso, especialmente las calizas del Jurásico inferior (fms. Cortes de Tajuña y Cuevas Labradas). Otras formaciones no tan transmisivas son las calizas del Cretácico superior, y las dolomías en facies Muschelkalk.

El acuífero detrítico perilagunar cuaternario no presenta tan buenas características como cabría esperar, siendo su principal papel el de transmisor del flujo de los acuíferos hacia el humedal. La laguna, tal como ya se ha comentado, se asienta sobre las arcillas y yesos de las facies Keuper, es decir presenta un sustrato claramente impermeable.

La recarga en los acuíferos procede de la infiltración de lluvia y de pérdidas en barrancos, con especial mención a la rambla de los Pozuelos (168 km²) que sólo tras largos periodos húmedos o con ocasión de fuertes crecidas llega a aportar agua a la laguna. Los otros dos barrancos principales que descienden de la sierra paleozoica (Santed y Tornos), también sufren pérdidas de caudal al alcanzar las dolomías del Muschelkalk, sobre todo el primero.

El flujo subterráneo —una vez el agua alcanza la zona saturada—, tiende hacia la laguna. El agua circula muy lentamente a través de los poros y fracturas de las formaciones acuíferas descargándose en ésta a través de los materiales detríticos cuaternarios perilagunares. El agua se evapora en la laguna, hecho que se ve acrecentado por el fuerte viento que frecuentemente barre la zona. También hay que considerar la evaporación por capilaridad desde el nivel freático y la evapotranspiración de plantas freatofitas en las inmediaciones de la laguna.

No todo el conjunto endorreico está relacionado hidrogeológicamente con la laguna; al estar configurado a modo de altiplano, de los 536 km² de extensión sólo 250 dre-

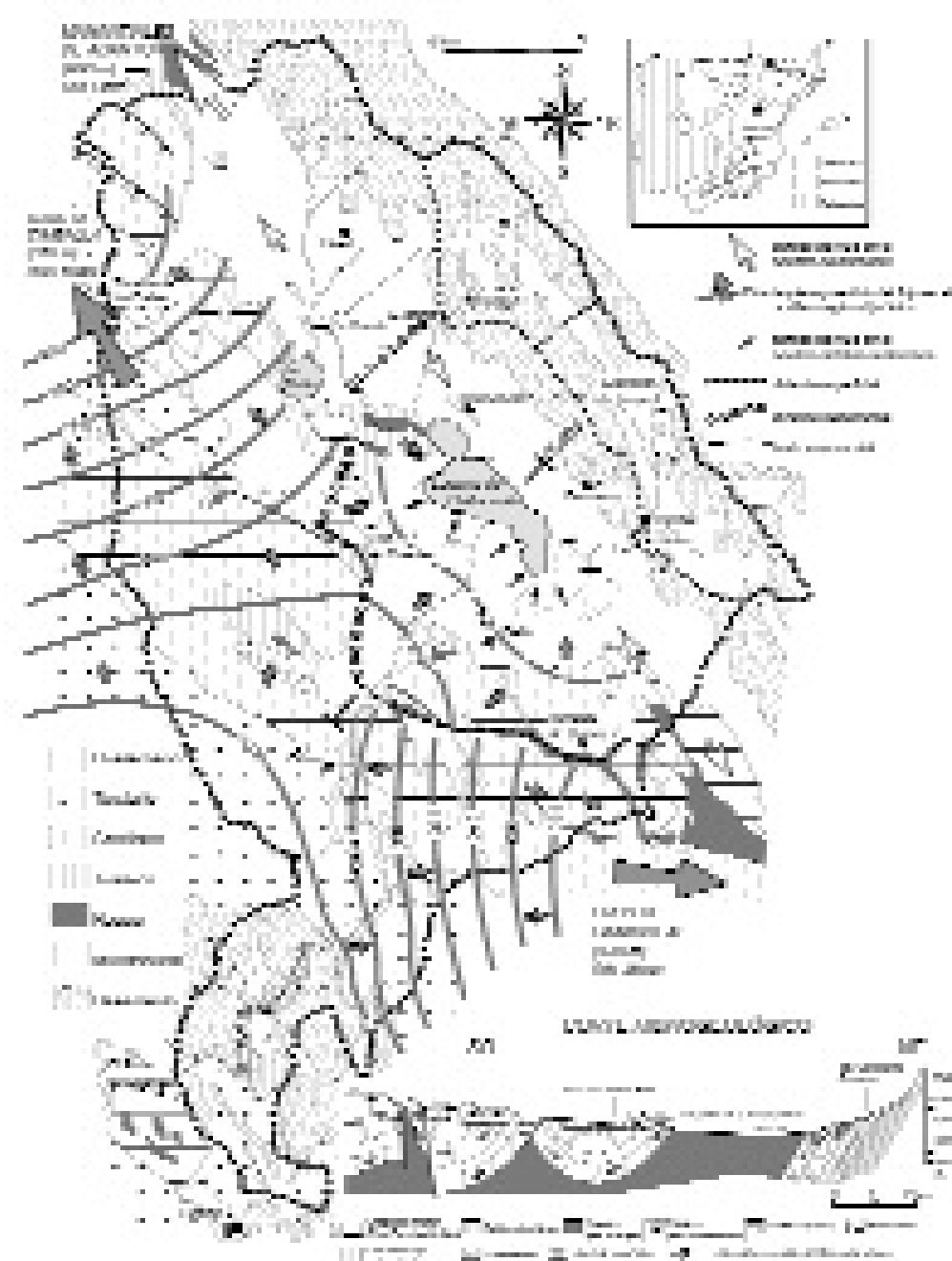


Figura 1. Mapa hidrogeológico de la cuenca endorreica de la laguna de Gallocanta.

nan de forma permanente hacia la laguna. El resto de la cuenca, drena hacia el río Jiloca (Ojos de Caminreal) y el Piedra (manantiales de Cimballa), ambos situados en torno a la cota 900.

Problemática y actuaciones realizadas

En el entorno de la laguna existen diversos aprovechamientos de aguas subterráneas; algunos de ellos son tradicionales y consisten en pozos excavados de gran diámetro que extraen recursos del acuífero detrítico perilagunar. A mediados de los años 80, con ocasión de la sequía proliferaron las captaciones mediante sondeos de mayor profundidad, extrayéndose recursos de los acuíferos carbonatados mesozoicos. El volumen de agua bombeada entonces alcanzó los 2 hm³/año. Sin embargo las mediciones realizadas en los últimos nueve años con los contadores instalados en los 40 pozos que realmente bombean, arrojan una cifra inferior, en torno a 0,7 hm³/año, oscilando entre 0,54 hm³ (2004) y 1 hm³ (2001).

La posible afección de estos bombeos al régimen de la laguna motivó, a mediados de los 90 y con ocasión de otro periodo de sequía, una fuerte controversia entre las organizaciones conservacionistas y los agricultores de regadío de la comarca. La polémica se vio acrecentada por diversas circunstancias, como las propuestas urgentes para dotar de mayor protección a la laguna, la roturación de prados salinos y la consiguiente apertura de un expediente sancionador por parte de la Unión Europea, los intentos de declarar provisionalmente sobreexplotados los acuíferos, los trabajos de deslinde del Dominio Público Hidráulico de la laguna, etc.

Tras un prolongado proceso de dialogo, el Consejo de la laguna de Gallocanta aprobó el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN), y recientemente las Cortes de Aragón la han declarado como Reserva Natural Dirigida (Ley 11/2006, BOE nº 23 del 26 de enero de 2007).

Los estudios hidrogeológicos que a comienzos de los años 90 habían realizado en Gallocanta el ICONA, la Diputación General de Aragón (DGA), la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), no eran totalmente concluyentes. Básicamente fallaba el modelo conceptual: se desconocía la extensión de los acuíferos relacionados con la laguna y se le daba una importancia excesiva al acuífero cuaternario perilagunar.

En 1995 la CHE definió con mayor precisión la unidad hidrogeológica a la que se le asignó una extensión de 300 km², e inició una campaña de construcción de piezómetros. En 1997 se ajustaron los valores del balance de agua en la unidad (CHE, 1997), concluyendo que su extensión debía ser todavía menor. La descarga subterránea a la

laguna se estimó aproximadamente en 1/3 del aporte total, que se evaluaba en torno a 12 hm³/año.

En 1998 se inicia un exhaustivo estudio hidrogeológico cuyo objetivo final era establecer el nivel de afección causado a la laguna hasta entonces, así como las posibilidades de coexistencia entre los pozos para regadío y el mantenimiento de los valores naturales de la laguna.

Dentro de este trabajo (CHE, 2003), cuyas conclusiones se presentan en este artículo, hay que destacar la realización de una cartografía geológica de gran detalle (1:25.000), la instalación y mantenimiento de una estación meteorológica completa, la restitución fotogramétrica del vaso de la laguna a escala 1:2.000, la construcción de dos estaciones de aforo automatizadas en los barrancos de Santed y Tornos, la perforación de 19 piezómetros, y la nivelación de todos los puntos de agua.

Balance de agua en Gallocanta

El conocimiento del funcionamiento hidrológico de la laguna de Gallocanta requiere la cuantificación de las distintas componentes que forman parte del ciclo del agua. Esta cuantificación se realiza mediante balances de agua a partir de los datos hidrológicos disponibles: precipitación, aportación de barrancos, evaporación y evolución del nivel de agua de la laguna.

El balance realizado se basa en la metodología ya aplicada en Gallocanta (CHE, 1997), que utiliza el programa BALAN. Se ha contado con una estación meteorológica completa y con dos estaciones de aforo, en los barrancos de Santed y Tornos.

El balance consta de dos fases:

a) Balance en la laguna

Las variaciones de volumen de agua en la laguna responden a la diferencia entre las entradas y las salidas. Las componentes del balance para el periodo de 30 años comprendido entre mayo de 1974 y septiembre de 2004 son:

Entradas de agua en la laguna (11,73 hm³/año)

- Precipitación directa sobre la laguna, con 5,8 hm³/año. La superficie inundable se ha estimado en 14,5 km² a partir de los datos de la serie histórica de niveles de la laguna y de las 29 imágenes de la laguna tomadas por el satélite LANDSAT.

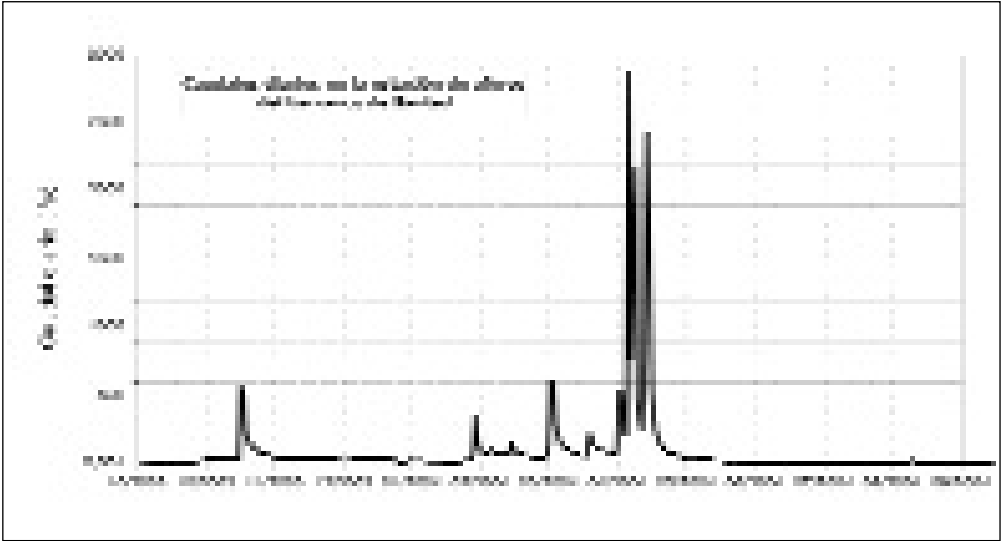


Figura 2. Caudales diarios en la estación de aforos del barranco de Santed.

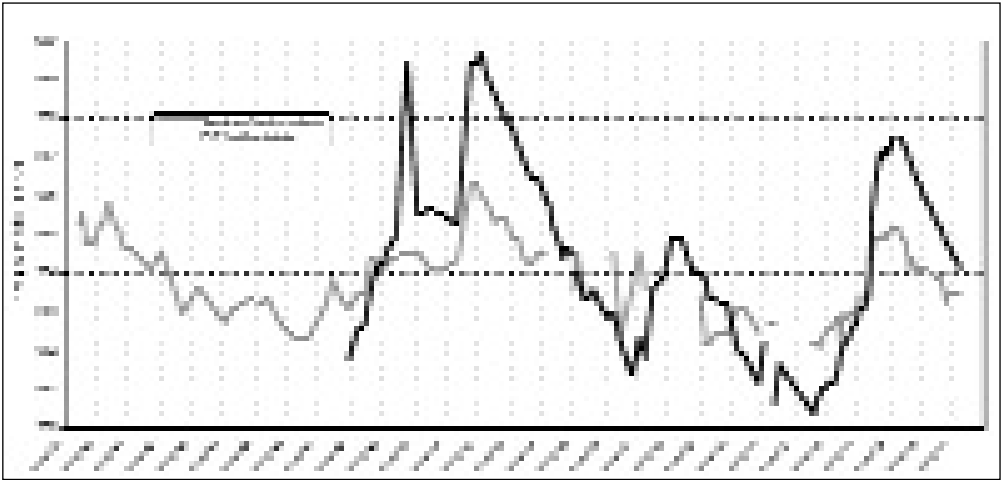


Figura 3. Evolución de los niveles en dos puntos representativos de los acuíferos jurásico y cretácico.

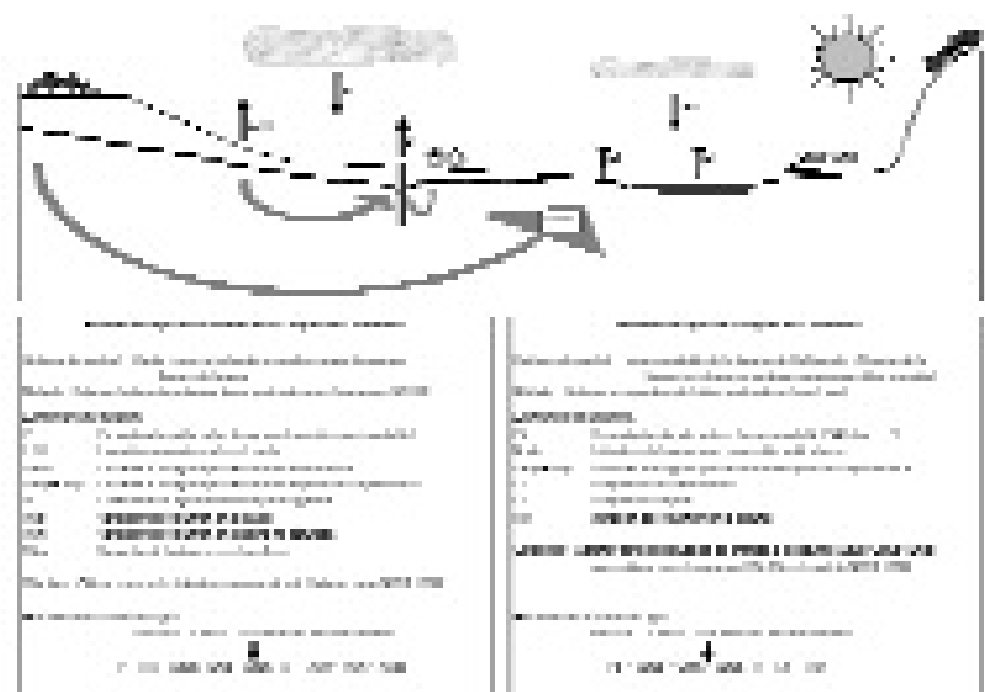


Figura 4. Esquema de las componentes del agua en la laguna de Gallocanta.

- Entradas por escorrentía superficial y subterránea, con $5,93 \text{ hm}^3/\text{año}$. Esta cifra ha sido estimada a partir del balance de agua en la laguna de Gallocanta (diferencia entre entradas y salidas).

Salidas de agua de la laguna ($12,49 \text{ hm}^3/\text{año}$)

- Evaporación de agua en lámina libre, con $7,87 \text{ hm}^3/\text{a}$. Se ha estimado a partir de la tasa de evaporación media y la superficie realmente inundada. Para la estimación de las tasas de evaporación ha sido imprescindible la información aportada por la estación meteorológica automática que funciona de forma continua desde febrero de 2000. En ella hay instalados dos tanques de evaporación, uno con agua dulce y otro con agua salada.
- Evaporación capilar, estimada en $4,62 \text{ hm}^3/\text{año}$ a partir de la tasa de evaporación capilar y la superficie no inundada del vaso de la laguna.

La diferencia entre las entradas y salidas corresponde a la variación del almacenamiento, ya que al comienzo del periodo considerado la laguna contenía 20 hm^3 y al final se encontraba seca.

b) Balance en la cuenca

Las escorrentías que descargan en la laguna de Gallocanta proceden de la cuenca vertiente superficial y subterránea relacionada con ella. Se diferencian seis subcuencas en función de sus características hidrológicas:

- Las subcuencas de Santed y Tornos se extienden sobre el paleozoico, descargando directamente en la laguna.
- La subcuenca de la Rambla de los Pozuelos sólo aporta agua a la laguna con ocasión de fuertes crecidas; normalmente pierde su caudal por infiltración fuera de la masa de agua subterránea.
- La subcuenca de la Zaida descarga en Gallocanta los años en los que se cultiva la laguna de la Zaida y siempre que se sobrepasa un umbral determinado de caudal, ya que de lo contrario se infiltra previamente.
- Las denominadas subcuencas carbonatada y detrítica están delimitadas por la superficie aflorante de las calizas mesozoicas y del detrítico cuaternario perilagunar, dentro de la masa de agua subterránea.

Para cada una de las seis subcuencas se han estimado las componentes del balance de agua mediante un modelo de balances hidrometeorológicos cuyos resultados son coherentes con los datos de caudales circulantes por las estaciones de aforos de Santed y Tornos, y con las entradas de agua por escorrentía superficial y subterránea a la laguna.

Para cada subcuenca se ha calculado la serie de precipitación y temperatura diaria para el periodo 1/1/1925-31/12/2004. Estas series se han obtenido en dos fases. En primer lugar se han estimado los valores mensuales mediante el método de la inversa de la distancia al cuadrado ponderado por la altitud, considerando los datos de 84 estaciones meteorológicas suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología y la estación automática. Una vez obtenida la serie mensual se ha pasado a valores diarios aplicándole para cada mes la modulación registrada a la estación más cercana al centro de gravedad de cada subcuenca.

Se ha ejecutado el programa BALAN para las seis subcuencas diferenciadas (tabla 1). Las subcuencas de Santed y Tornos se han calibrado con datos diarios de las estaciones de aforos situadas a la salida de las cuencas (periodo 11/7/1999-25/10/2003). El resto de subcuencas se han calibrado con los datos de caudales descargados en la laguna de Gallocanta y niveles de piezómetros representativos del comportamiento medio de los acuíferos, manteniendo un reparto entre los volúmenes de agua aportados por cada una de ellas que fuera coherente con el conocimiento de las aportaciones específicas regionales de la zona.

Tabla 1: Resultados medios anuales para el periodo 1/1/1925-1/1/2004 (80 años) del balance en las distintas subcuencas vertientes hacia la laguna de Gallocanta.

Subcuenca	Cvert (km²)	P (mm/a)	T (°C)	ETP (mm/a)	ETR (mm/a)	Recurso total (hm³/a)	Escorr. Subt. (hm³/a)	Q espec l/s/km²
Carbonatada	36	428	11,26	675	397	1,10	0,98	1,0
Detrítica	95	441	11,31	678	427	1,25	1,08	0,4
Santed	25	465	11,60	686	401	1,59	0,93	2,0
Tornos	36	465	11,39	680	442	0,84	0,40	0,7
Pozuelo (1)	138	449	11,17	672	434	1,99	1,71	0,5
Zaida (2)	52	452	11,43	681	435	0,86	0,71	0,5

(1) De los 1,99 hm³/año generados en esta subcuenca descargan hacia la laguna de Gallocanta 0,15 hm³/año.

(2) De los 0,86 hm³/año generados en esta subcuenca descargan hacia la laguna de Gallocanta 0,15 hm³/año.

El modelo matemático de flujo subterráneo

Las relaciones entre los diferentes factores geológicos e hidrológicos que conforman el funcionamiento de la masa de agua subterránea de Gallocanta y la laguna son de tal complejidad que únicamente un modelo matemático de flujo subterráneo es capaz de reproducir y comprobar las diferentes hipótesis establecidas y valorarlas cuantitativamente.

Los modelos matemáticos de flujo subterráneo son herramientas cada vez más utilizadas para entender el funcionamiento de los acuíferos, valorar diferentes hipótesis y ayudar a la toma de decisiones. Básicamente consisten en una discretización tri-dimensional del acuífero en celdas, a las que se les asignan unos parámetros de porosidad y permeabilidad. Al modelo se le proporcionan las entradas de agua y éste calcula el flujo subterráneo de los distintos acuíferos del sistema, en el periodo simulado. Los modelos actualmente en uso permiten simular diferentes situaciones hidrológicas como bombeos desde pozos, recargas desde ríos, evaporación en lámina libre, etc.

Las principales características del modelo realizado en Gallocanta son las siguientes:

- Paquete informático utilizado: Visual MODFLOW.
- Mallado regular ortogonal, con tamaño superficial de celdas de 250 por 250 metros (48 columnas y 72 filas). En la vertical, el ámbito modelado estuvo comprendido entre los 1150 y los 0 m.s.n.m., definiéndose un total de 43 capas de espesor variable.
- El ajuste en régimen transitorio del modelo abarcó desde octubre de 1970 hasta diciembre de 2004. Este periodo de algo más de 34 años fue discretizado en 411 periodos de tiempo equivalentes a meses reales.

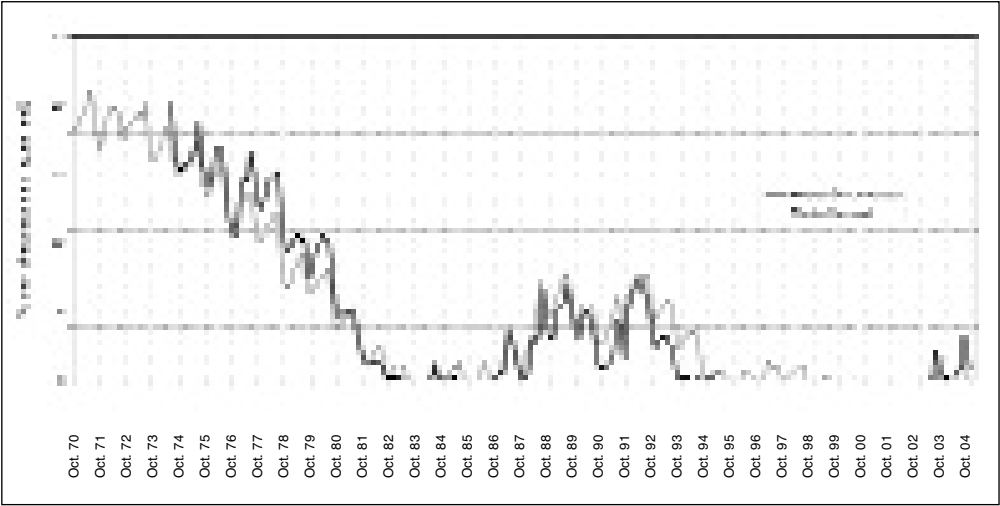


Figura 5. Comparación entre la evolución de la laguna de Gallocanta y la simulación del modelo

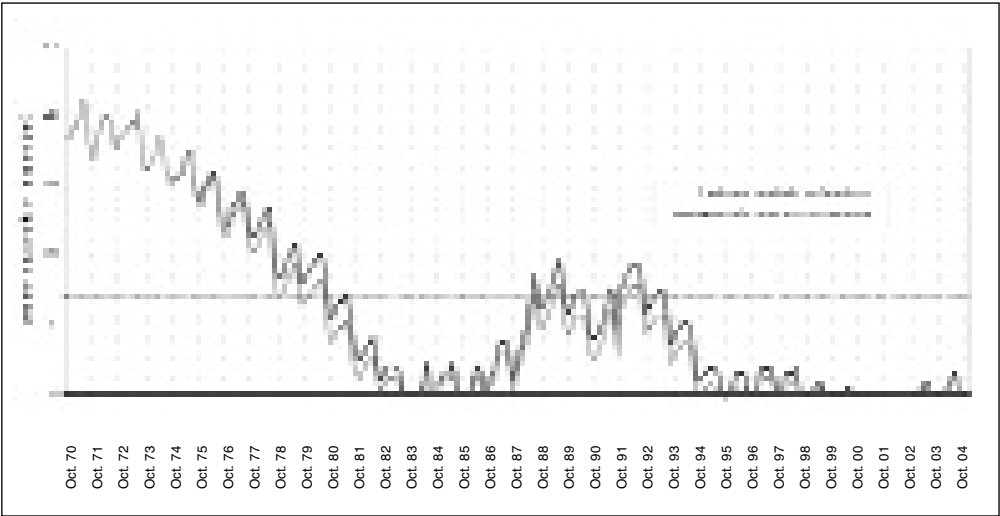


Figura 6. Efecto de los bombeos en la evolución de la laguna de Gallocanta

- Las unidades hidroestratigráficas consideradas han sido 9, que corresponden a las principales formaciones geológicas. Las porosidades eficaces contempladas son las siguientes: acuífero detrítico cuaternario 5%, calizas jurásicas 1,5%, dolomías en facies Muschelkalk 0,5% y calizas cretácicas 0,2%.
- Las entradas de agua en el modelo corresponden a la infiltración de las precipitaciones, las aportaciones de las ramblas, la escorrentía superficial de la cuenca vertiente a la laguna y la precipitación directa sobre la laguna. Las salidas son exclusivamente la evaporación directa y en franja capilar en la laguna y las extracciones por bombeo desde pozos.

Se ha optado por utilizar un modelo de flujo en medio poroso al tener que simular una realidad hidrogeológica muy compleja, a gran escala, y con varios acuíferos detríticos y carbonatados. No obstante el acuífero jurásico puede considerarse como carbonatado de flujo difuso, y el cretácico como carbonatado intermedio fisurado y carstificado (Bayó *et al*, 1986).

Los límites del modelo son todos impermeables, y se corresponden con la definición de la masa de agua subterránea, que se presenta en el mapa hidrogeológico. El límite S se sitúa sobre un alargado afloramiento de las facies Keuper. El límite NE coincide con el contacto de los materiales paleozoicos, que a los efectos del modelo pueden considerarse como impermeables. Los límites SE y ONO corresponden con divisorias hidrogeológicas más o menos fijas, a juzgar por la evolución piezométrica existente.

Sólo existe una excepción y es la franja de calizas jurásicas que se extiende entre las lagunas de La Zaida, cuyo comportamiento es el de un sumidero, y de Gallocanta. En esta zona se ha detectado un movimiento de la divisoria de hasta 3 km, de tal forma que en años muy húmedos se sitúa bajo la laguna de La Zaida, mientras que tras periodos secos prolongados se desplaza hacia la de Gallocanta. Una vez calibrado el modelo se realizó un análisis de sensibilidad, abriendo diversas ventanas laterales en el modelo, de forma que se reprodujera el movimiento de la divisoria en esa pequeña porción de acuífero. El resultado fue que apenas se notaba en la evolución de la laguna, por lo que no se tuvo en cuenta.

Durante la calibración del modelo se pretendía reproducir principalmente la evolución registrada de la laguna, cuya serie comienza en junio de 1974, y no tanto las series de medidas piezométricas disponibles, aunque algunas superan los 17 años de duración. Fue necesario ajustar algunos parámetros hidrogeológicos (permeabilidad y coeficiente de almacenamiento), las condiciones iniciales (aspecto muy importante ya que se partía del periodo húmedo más importante del pasado siglo), series de aportaciones hídricas y simulación hidrogeológica de la laguna.

Resultados de la modelización

La realización de un modelo numérico de flujo ha permitido cuantificar la afección que los bombeos han provocado sobre el régimen natural de la laguna de Gallocanta. Por lo que respecta a la sucesión de periodos en que la laguna ha presentado agua o ha permanecido seca, la inexistencia de bombeos durante los algo más de 34 años simulados no habría provocado que la laguna hubiese mantenido una lámina de agua durante un periodo de tiempo significativamente mayor. Como consecuencia de los bombeos, el volumen de agua almacenado en la laguna se reduce en aquellos periodos de tiempo en los que la laguna presenta agua, aunque esta reducción no es simultánea ni directamente proporcional al volumen de las extracciones.

Para el periodo simulado se observa una reducción del volumen de agua en la laguna por el efecto de los bombeos de hasta 2 hm³, en el año 1981 (año de máxima afección). Este volumen se traduce, para ese año, en una disminución de la profundidad del agua de 0,20 m. Sin embargo la configuración del vaso de la laguna hace que la máxima afección en cuanto a superficie mojada se produzca en 1995, con una reducción por efecto de los bombeos de 300 ha.

Tabla 2. Balances medios obtenidos por el modelo para la cuenca de la laguna de Gallocanta.

	Indicadores de los presupuestos en:	CON BOMBEO		SEN BOMBEO	
		1/0	4/1	1/0	4/1
POTENCIAL	ANALISIS DE LAS POSIBILIDADES	7/8	4/1	7/8	4/1
	Para controlar y regular la lámina de agua en la laguna	0/0	0/0	0/0	0/0
	Para regular el caudal de salida de la laguna	0/0	0/0	0/0	0/0
	TOTAL	7/8	4/1	7/8	4/1
POTENCIAL	ANALISIS DE LAS POSIBILIDADES	7/8	4/1	7/8	4/1
	Para controlar y regular la lámina de agua en la laguna	0/0	0/0	0/0	0/0
	Para regular el caudal de salida de la laguna	0/0	0/0	0/0	0/0
	TOTAL	7/8	4/1	7/8	4/1
VARIACION EN EL PRECIPITACION		7/8	4/1	7/8	4/1

Figura 7. Balances medios obtenidos por el modelo para la cuenca de la laguna de Gallocanta.

La evolución de la laguna desde 1925

La simulación que se ha expuesto partía de unas condiciones iniciales realmente extraordinarias, con la laguna totalmente llena (año 1974). Según la memoria colectiva, esa situación (incluso con campos ribereños inundados) no se había producido a lo largo de todo el siglo XX y fue la causante de que se instalara la escala para medir la evolución de la laguna, así como que se drenaran los prados de Las Cuerlas.

Una vez ajustado el modelo para el periodo 1974-2004, se quiso comprobar si también el modelo reproducía la subida de niveles que tuvo lugar a finales de los años 60. En principio existían datos pluviométricos, si bien el número de observatorios eran mucho menor, y sólo uno tenía una serie suficientemente larga y se situaba en el entorno de la laguna: el de Tornos.

Tal como puede verse en la figura 8, el modelo no reproduce ese importante llenado de la laguna; apenas si se superan los 7 hm³ de agua, frente a los casi 22 hm³ registrados.

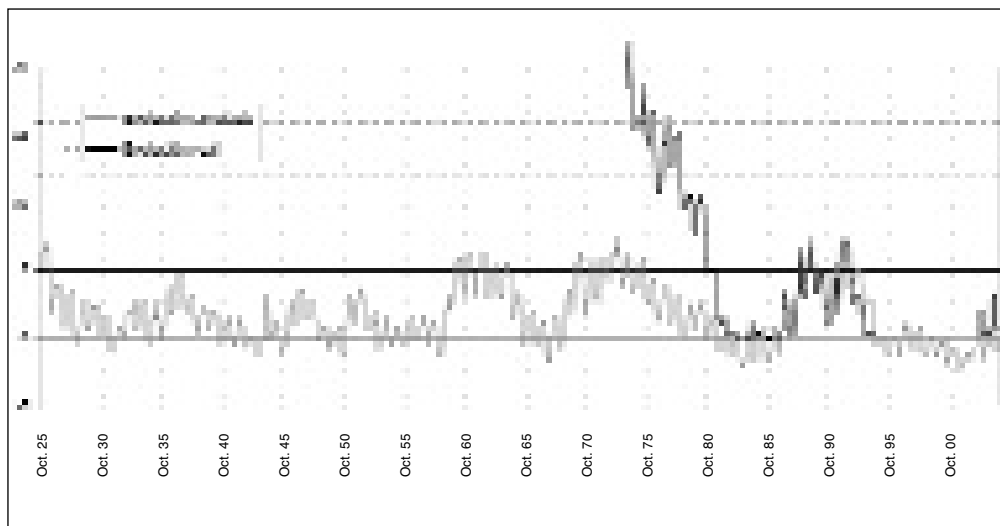


Figura 8. Evolución de la laguna de Gallocanta desde 1925 aplicando los mismos parámetros que los utilizados para el ajuste 1974-2004.

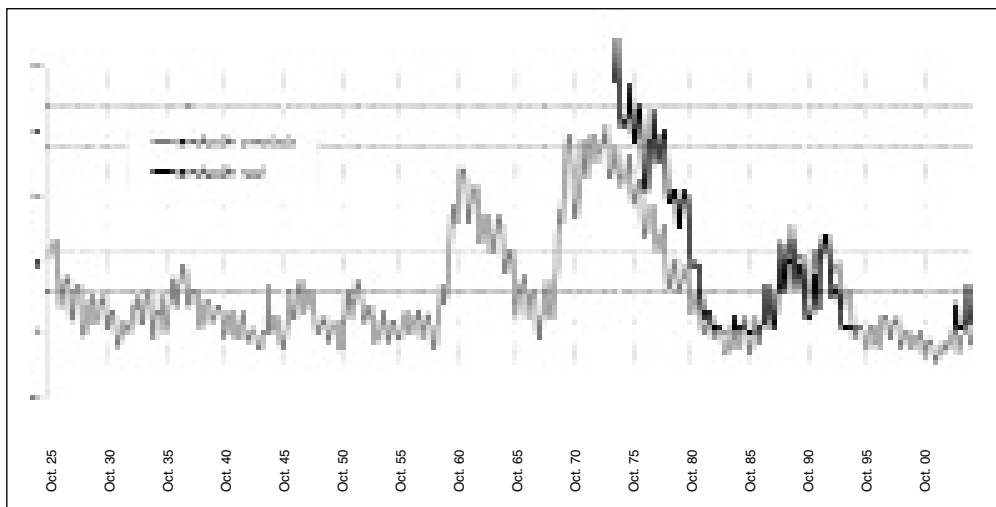


Figura 9. Evolución de la laguna de Gallocanta desde 1925 considerando que la rambla de los Pozuelos no pierde agua durante el periodo comprendido entre enero de 1960 y septiembre de 1975.

Antes de continuar con la exposición de los trabajos realizados conviene aclarar la fiabilidad de los datos disponibles sobre la evolución del nivel de la laguna, especialmente en esos años iniciales de control. La escala se instaló en 1974, en un momento en el que cubría en la laguna más de dos metros. Conforme el nivel fue descendiendo, al parecer tuvo que ser recolocada varias veces. Se estima que estuvo clavada en el sedimento entre 12 y 18 cm.

En la reconstrucción de la serie de niveles se ha considerado que todas las lecturas de esos años estaban sobreestimadas 18 cm; no obstante si esta cifra hubiera sido mayor estaríamos ante volúmenes almacenados menores, en cuyo caso el ajuste se aproximaría más a la realidad. Además hay que tener en cuenta que, dada la orografía tan llana y abierta del vaso de la laguna, 20 centímetros a esas alturas suponen tres hectómetros cúbicos de diferencia, por lo que el no conseguir un ajuste perfecto en ese periodo inicial de medición de la escala tampoco es tan relevante.

Sucesivas pasadas del modelo matemático de flujo subterráneo, en las que se modificaban algunos parámetros con carácter general, tendían a ajustar la subida de finales de los años 60 pero desajustaban la de los 80, periodo en el que hay mayor fiabilidad de datos hidrológicos. Por lo tanto la única forma de conseguir un mejor ajuste para toda la serie debía conseguirse modificando algún factor que sólo operara en ese periodo especialmente húmedo.

Estudiada la cuenca vertiente a la laguna y los datos hidrológicos históricos disponibles, tres circunstancias podrían haber causado esta extraordinaria entrada de agua:

- a. La transferencia de agua subterránea desde la laguna de La Zaida.
- b. Mayor aporte de la Rambla de los Pozuelos debido a la pérdida de su carácter influente antes de llegar a la masa de agua subterránea de Gallocanta.
- c. Una importante deforestación que al cambiar las condiciones del suelo provocara una mayor escorrentía superficial.

a. La transferencia de agua subterránea desde la laguna de La Zaida

La laguna de La Zaida, tal como ya se ha comentado anteriormente, constituye un sumidero de agua que alimenta los acuíferos jurásico y cretácico. Los datos piezométricos disponibles indican que el agua, una vez alcanza la zona saturada fluye hacia los manantiales de Cimballa.

Durante la realización del trabajo el nivel freático del acuífero jurásico bajo la laguna se ha llegado a situar a 54 metros de profundidad. Curiosamente con ocasión del periodo húmedo que sucedió durante los años 2003 y 2004, y como consecuencia de haber permanecido inundada varios meses, el nivel ascendió 40 metros, situándose a tan sólo 14 metros de la superficie.

En el periodo comprendido entre 1970 y 1974 la laguna de La Zaida permaneció ininterrumpidamente inundada, por lo que casi con toda probabilidad el nivel piezométrico debió alcanzar la superficie, máxime teniendo en cuenta que los años 60 habían sido también bastante húmedos. En esta circunstancia parte del agua que se infiltraba en la laguna fluía subterráneamente hacia la laguna de Gallocanta.

Se ha simulado este comportamiento forzando en el modelo unas celdas con nivel constante durante esos cuatro años. Estas celdas se sitúan en el límite del modelo, junto a la laguna de La Zaida. El resultado es que entra muy poca cantidad adicional de agua a la laguna de Gallocanta, por lo que puede despreciarse como causa del extraordinario llenado que registró.

b. Mayor aporte de la Rambla de los Pozuelos debido a la pérdida de su carácter influente antes de llegar a la masa de agua subterránea de Gallocanta

La rambla de los Pozuelos, durante todo el periodo estudiado, presenta un carácter influente, es decir va perdiendo gradualmente su caudal, infiltrándose en los acuíferos jurásico y cretácico. El cauce pierde progresivamente entidad y rara vez aporta agua a la laguna. Sin embargo el agua que se infiltra en su tramo medio fluye subterráneamente hacia los Ojos de Caminreal, mientras que la que se infiltra en el tramo bajo fluye subterráneamente hacia la laguna de Gallocanta. En el modelo esta últi-

ma circunstancia se simula mediante una batería de pozos de recarga, que sigue *grosso modo* el trazado de la rambla sobre la UH Gallocanta.

En la serie de aportaciones que genera el programa BALAN para la entrada de la rambla en el ámbito del modelo deben descontarse, por lo tanto, los caudales que se infiltran previamente y cuyo destino subterráneo no es la laguna de Gallocanta. Esta sustracción de caudales se ha realizado mediante un “umbral de corte”, de tal forma que si el caudal diario que genera el programa BALAN no alcanza esa cifra, se considera que se habrá infiltrado previamente, y por lo tanto no se tendrá en cuenta en los pozos de recarga. Si se supera el umbral, se procederá a infiltrar sólo el caudal que ha superado el corte. Con esta forma de operar se ha ajustado el comportamiento de la laguna para el periodo comprendido entre 1974 y 2004.

Diversos testimonios de gente de Odón, pueblo situado en el tramo medio de la rambla de los Pozuelos, indican que durante los años 60 y parte de los 70, la rambla no se secó, llevando un caudal de agua muy limpia. Curiosamente el vecino río Piedra vivió una circunstancia parecida, llevando caudal abundante aguas arriba de su nacimiento actual, en los Ojos de Cimballa.

Estas dos observaciones apuntan a que durante ese periodo especialmente húmedo los niveles piezométricos subieron extraordinariamente, cambiando el comportamiento hidrogeológico de ambos cauces, de tal forma que dejaron de ser influentes y pasaron a ser efluentes.

Con el modelo matemático se ha simulado esta circunstancia descrita, de tal forma que durante el periodo comprendido entre 1960 y 1975 se ha considerado que la rambla de los Pozuelos no tenía pérdidas antes de alcanzar la UH Gallocanta. En la figura 9 se observa cómo el modelo reproduce mucho mejor la evolución de niveles, llegando a superar los 15 hm³.

c. Una importante deforestación que al cambiar las condiciones del suelo provocara una mayor escorrentía superficial

En el entorno de la laguna de Gallocanta se produjo una importante deforestación entre los años 1960 y 1975. Básicamente se talaron encinares (carrascas) y se convirtió en suelo agrícola. Los datos recopilados indican entre 1100 y 1300 ha en la cuenca de la Rambla de los Pozuelos y 200 ha, como mínimo en el resto. Además la deforestación se concentró especialmente entre los años 1968 y 1970, con casi 1000 ha.

Esta deforestación tuvo que provocar un aumento de la escorrentía superficial, pero lamentablemente no se dispone de datos hidrológicos para poder realizar ninguna

estimación. La tendencia general, a partir de 1975, es sin embargo hacia un incremento progresivo de la masa forestal, por abandono de aquellas tierras menos productivas.

Conclusiones sobre la evolución histórica de la laguna

De los tres factores planteados para explicar el extraordinario nivel que alcanzó la laguna de Gallocanta a comienzos de los años 70, el segundo (la pérdida del carácter influente de la rambla de los Pozuelos) es sin duda el que más agua aporta a la laguna; el primero (transferencia subterránea desde La Zaida) puede obviarse, y el tercero (deforestación) es de difícil estimación.

Si comparamos la serie de aportaciones generadas por el programa BALAN –que son las entradas de agua tanto superficiales como subterráneas consideradas en el modelo matemático de flujo subterráneo–, con las aportaciones históricas de los dos ríos vecinos: el Piedra (en Nuévalos) y el Jiloca (en Calamocha) vemos que realmente debe de haber un mayor aporte de agua a la laguna a comienzos de los años 70 (figura 10).

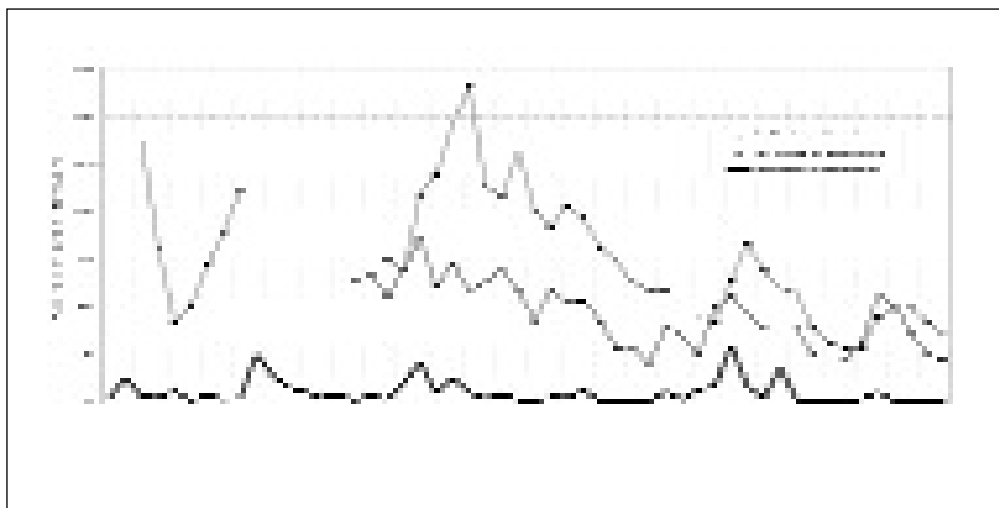


Figura 10. Comparación entre las aportaciones registradas en las estaciones de aforos del Jiloca en Calamocha y el Piedra en Nuévalos con las utilizadas en el modelo para Gallocanta.

Otros datos históricos recopilados hablan de una laguna que se ha secado, o al menos no ha tenido lámina de agua aparente, a lo largo del siglo XX; en concreto hay testimonios que apuntan hacia el año 1960. El modelo reproduce un secado de la laguna en 1959, que encaja *grosso modo* con dicha observación.

También hay fotos antiguas de paseos en barca por la laguna. En concreto hay una fechada entre los años 1946 y 1947. El modelo confirma este dato ya que indica que la laguna llegó a alcanzar en esas fechas 4 hm³.

Por lo tanto, tras la modelización de la masa de agua subterránea de Gallocanta puede concluirse diciendo que la laguna ha fluctuado a lo largo de los últimos 80 años llegando a presentar varios episodios de secado y un episodio extraordinariamente húmedo, a comienzos de los años 70. Estos resultados están en consonancia con los trabajos sedimentológicos realizados recientemente (Rodó et al, 2002).

Gestión del agua subterránea en Gallocanta

Una vez estudiada la evolución histórica de la laguna de Gallocanta y cuantificada la afección que los bombeos han provocado en su régimen natural, los resultados fueron presentados, explicados y discutidos ampliamente con todos los interesados. Los regantes quedaron satisfechos al comprobar que, a pesar de las acusaciones de las que habían sido objeto, tampoco habían afectado tanto a la laguna. El colectivo ecologista se tranquilizó al ver que la afección no había sido irreversible.

Sin embargo esta unanimidad se rompe en el momento que se mira hacia el futuro. La afección existe y desde el punto de vista ambiental no parece prudente que se pueda pensar en aumentar el regadío en la zona. Por otro lado los regantes aducen que si bien en los años 80 realmente se bombeó bastante agua de los acuíferos, la cifra se ha reducido notablemente en los últimos años.

Desde la Confederación Hidrográfica del Ebro se continúa actuando con prudencia. Las concesiones solicitadas siguen paradas, y se siguen controlando las variables hidrogeológicas: bombeos, niveles piezométricos, aportaciones de los barrancos, nivel de la laguna y datos meteorológicos. También se está trabajando con el Gobierno de Aragón en la posibilidad de atender los usos del agua actuales y futuros desde pozos situados fuera de la masa de agua subterránea, aunque dentro de la cuenca endorreica.

Bibliografía

- BAYÓ, A.; CASTIELLA, J.; CUSTODIO, E.; NIÑEROLA, S. y VIRGOS, L. (1986): *Ensayo sobre las diversas tipologías de acuíferos en rocas carbonatadas de España. Identificación, técnicas de estudio y formas de captación y explotación*. Jornadas sobre el karst, Euskadi 86. San Sebastián, t II: 225-340.
- BLASCO, O.; SAN ROMÁN, J. y GARCÍA VERA, M.A. (2004): *Modelado numérico de flujo de la U.H. Gallocanta (Cuenca del Ebro)*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. T-XXVI: 513-523.
- CHE (1997): *Balance de la unidad hidrogeológica de Gallocanta 7.03*. Consultor: M.A. García Vera. Informe inédito. Zaragoza.
- CHE (1999): *Evaluación metodológica para la estimación de la evaporación capilar en la laguna de Gallocanta*. Consultor: EPTISA. Informe inédito. Zaragoza.
- CHE (2001): *La evaporación en la laguna de Gallocanta: comparación de métodos*. Consultor: CSIC (Est. Exp. Aula Dei). Informe inédito. Zaragoza.
- CHE (2002): *Aplicación del método de renovación de superficie para el cálculo de la ETR en humedales: aplicación a la laguna de Gallocanta*. Consultor: CSIC (Est. Exp. Aula Dei). Informe inédito. Zaragoza.
- CHE (2003a): *Georreferenciación de imágenes del satélite Landsat del tramo central de la cuenca del Ebro con interés para estudios hidrológicos*. Consultor: Nerea Díaz de Arcaya. Informe interno. Zaragoza.
- CHE (2003b): *Caracterización espacio-temporal del contenido de humedad en la zona no saturada del vaso de la laguna de Gallocanta*. Consultor: CSIC (Est. Exp. Aula Dei). Informe inédito. Zaragoza.
- CHE (2003c): *Establecimiento de las normas de explotación de la unidad hidrogeológica "Gallocanta" y la delimitación de los perímetros de protección de la laguna*. Consultor: EPTISA. Informe inédito. Zaragoza.
- CHE (2004a): *Estimación de la evolución reciente del vaso de la laguna de Gallocanta mediante técnicas de teledetección espacial*. Consultor: CITA (DGA). Informe interno. Zaragoza.
- CHE (2004b): *Evolución del contenido de humedad y de la tasa de evaporación en humedales: aplicación a la laguna de Gallocanta*. Consultor: CSIC (Est. Exp. Aula Dei). Informe inédito. Zaragoza.
- RODÓ, X.; GIRALT, S.; BURJACHS, F.; COMÍN, F.A.; TENORIO, R.G. y JULIÀ, R. (2002): *High-resolution saline lake sediments as enhanced tools for relating proxy paleolake records to recent climatic data series*. Sedimentary Geology 148, pp 203-220.
- SAN ROMÁN, J.; GARCÍA VERA, M.A.; BLASCO, O. y COLOMA, P. (2005): *La laguna de Gallocanta: hidrogeología e implicaciones ambientales*. Naturaleza Aragonesa, 15: 50-60.

- SAN ROMÁN, J.; GARCÍA VERA, M.A.; BLASCO, O. y COLOMA, P. (2006): *Toma de datos, modelación y gestión del agua subterránea en la cuenca endorreica de la laguna de Gallocanta (España)*. Jornadas internacionales: De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada. Publicaciones del IGME. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas n° 21, pp 551-558.
- SPANO, D.; SNYDER, R.L.; DUCE, P., PAW, U.K.T. (1997): *Surface renewal analysis for sensible heat flux density using structure functions*. Agriculture and Forest Meteorology. 86:259-271.
- SPANO, D.; SNYDER, R.L.; DUCE, P., PAW, U.K.T. (2000): *Estimating sensible and latent heat flux densities from grapevine canopies using surface renewal*. Agriculture and Forest Meteorology. 104 (3): 171-183.