

RESEARCH ARTICLE

## Numerical modeling of a multilayer coastal aquifer in extreme drought with additional exploitation and impact on its associated ecosystems: Júcar river and La Albufera de Valencia (Plana de Valencia Sur, Spain)

*Modelación numérica de un acuífero costero multicapa en sequía extrema con explotación adicional e impacto sobre sus ecosistemas asociados: río Júcar y Albufera de Valencia (Plana de Valencia Sur, España)*

Bruno J. Ballesteros Navarro<sup>1</sup>, J. Oriol Navarro Odriozola<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España. Unidad Territorial de Valencia. C/Cirilo Amorós, 42. 46004 Valencia. España.

<sup>2</sup> TYPESA. Departamento de Geotécnica. Parque Empresarial Táctica. C/ Botiguers, 5. 46980 Paterna. Valencia. España.

Corresponding author: [b.ballesteros@igme.es](mailto:b.ballesteros@igme.es) (Bruno J. Ballesteros Navarro)

### ABSTRACT

#### Key points

La Plana de Valencia Sur can be considered as a strategic aquifer

La Plana de Valencia Sur can be exploited intensively during times of extreme weather conditions

We have analyzed the consequences of intensive exploitation of the system on each of the elements that make up its water balance and its associated ecosystems

La Plana de Valencia Sur (MASub 080.142) constitutes a coastal hydrogeological system with high potential, which gives it great aptitude so that it can be considered as a strategic aquifer, understanding as such that it can be exploited in a short-term and intensive way during times of drought in order to compensate for the deficit created in demand systems. For this purpose, in the mid-90s and the first decade of this century, a large number of groundwaters catchments were built that were used during the extremely dry period from 2005 to 2008. This additional and scheduled exploitation required a meticulous piezometric and hydrochemical monitoring, as well as the volumes extracted, which was carried out by the Júcar Hydrographic Confederation (CHJ) and the Geological Survey of Spain (IGME). The data obtained allowed us to know the response of the system to a situation of exceptional water stress and to develop a detailed model of underground flow with the Visual MODFLOW software. The model domain, discretised in 4,357 cells of 359x359 m, covers an area of 56,15 km<sup>2</sup> and consists of four layers equivalent to the four geological formations that comprise it. With its calibration and adjustment in steady state and transitory flow regimes, the aquifer balance has been determined, as well as its behaviour and evolution. One of the most relevant aspects is that it incorporates in a different way the main ecosystems dependent on groundwater: Júcar and Verde rivers, ullales or springs, drainage channels and La Albufera lake, in addition to direct outlets to the sea. The conclusions obtained include, at a general level, the suitability of the actions carried out and their environmental viability, confirming its good characteristics as a strategic aquifer, as well as its ability to be exploited intensively during times of extreme weather conditions. It also analyses, in a particularized way, the consequences that the intensive exploitation of the system has had on each of the different elements that make up its water balance, which has allowed us to know the conditions suffered by the two large ecosystems with which it is related, Júcar River and La Albufera de Valencia, throughout the period analysed.

**Keywords:** Plana Valencia Sur Aquifer; Groundwater; Flow model; Drought; Albufera.

#### Article History:

Received: 03/06/2021

Accepted: 30/07/2021

## RESUMEN

## Puntos clave

La Plana de Valencia Sur puede considerarse como un acuífero estratégico

La Plana de Valencia Sur puede ser intensamente explotado durante periodos climáticos extremos

Se han analizado las consecuencias que una explotación intensiva del acuífero tiene sobre cada variable que integra su balance hídrico y sobre sus ecosistemas asociados

La Plana de Valencia Sur (MASub 080.142) constituye un sistema hidrogeológico litoral con un elevado potencial, lo que le confiere una gran aptitud para que pueda ser considerado como un acuífero estratégico, entendiéndose como tal aquel que puede ser explotado de forma coyuntural e intensiva durante las épocas de sequía con el fin de compensar el déficit creado en los sistemas de demanda. Con este objetivo, a mitad de los años 90 y de la primera década del presente siglo se construyó un elevado número de captaciones que fueron utilizadas durante el periodo extremadamente seco de 2005 a 2008. Esta explotación adicional y programada requirió de un minucioso control piezométrico e hidroquímico, así como de los volúmenes extraídos, que fue llevado a cabo por la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Los datos obtenidos permitieron desarrollar un detallado modelo de flujo subterráneo con el software Visual MODFLOW. El dominio del modelo, discretizado en 4.357 celdas de 359x359 m, abarca una superficie de 561,5 km<sup>2</sup> y consta de cuatro capas equivalentes a las cuatro formaciones geológicas que la integran. Uno de los aspectos de mayor relevancia del modelo es que incorpora de forma diferenciada los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas: ríos Júcar y Verde, ullales o surgencias, canales de drenaje y lago de La Albufera, además de las salidas directas al mar. Entre las conclusiones obtenidas destacan la idoneidad de las actuaciones llevadas a cabo y su viabilidad medioambiental, confirmando sus buenas características como acuífero estratégico. También se analizan las consecuencias que los bombeos adicionales, calificados como bombeos de sequía, tuvieron sobre cada uno de diferentes elementos que integran su balance hídrico y las afecciones sufridas por los dos grandes ecosistemas con los que se encuentra relacionado: río Júcar y La Albufera de Valencia.

**Palabras clave:** Acuífero Plana Valencia Sur; Aguas subterráneas; Modelo de flujo; Sequía; Albufera.

**Historial del artículo:**  
Recibido: 03/06/2021  
Aceptado: 30/07/2021

## 1. Introducción

En los acuíferos costeros la investigación hidrogeológica suele centrarse en el análisis y evaluación de los procesos de salinización por intrusión de aguas de procedencia marina. Sin embargo, estos acuíferos, sobre todo los localizados en la cuenca mediterránea, suelen albergar en sus áreas más litorales ecosistemas acuáticos de gran interés medioambiental, siendo mucho menos frecuentes los estudios que analizan las relaciones de las aguas subterráneas con estos ecosistemas. El artículo que aquí se presenta aborda esta cuestión mediante simulación numérica en el denominado acuífero de la Plana de Valencia Sur, donde existen implicaciones medioambientales de singular relevancia, entre las que destacan su relación con el río Júcar y, especialmente, con el lago de La Albufera de Valencia, humedal de importancia internacional incluido en la lista del Convenio de Ramsar.

Desde el punto de vista numérico, el sistema acuífero de la Plana de Valencia ha sido tratado en varias ocasiones. El primer modelo se elaboró en el marco de los trabajos del PNIAS (IGME-IRYDA, 1977), mientras que el segundo constituyó una revisión del anterior (IGME, 1981). En ambos casos se contempló toda la superficie ocupada por las dos mitades en la que actualmente se encuentra dividida la Plana de Valencia. Sólo Sahuquillo *et al.* (1997) afrontaron de

forma individualizada la modelación de su parte sur. También, con posterioridad, el IGME y la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) llevaron a cabo conjuntamente diversos trabajos para conocer con mayor precisión el comportamiento hidrodinámico de la MASub 080.142 Plana de Valencia Sur, considerada como un acuífero estratégico y de gran interés por su situación, dimensiones y elevados recursos (IGME-CHJ, 2006, 2007, 2008).

El modelo numérico de flujo de la MASub Plana de Valencia Sur, objeto de este artículo, fue realizado por el IGME en 2012 mediante el software Visual MODFLOW basado en el código conocido como MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) desarrollado por el U.S. Geological Survey, y un avance de sus resultados fue presentado en el Congreso Hispano-Luso: Las aguas subterráneas y la planificación hidrológica (Ballesteros y Navarro, 2016). Este primer modelo ha sido redefinido y mejorado por los mismos autores al incorporar diversas modificaciones que han contribuido a un ajuste del proceso simulado más acorde a la realidad.

## 2. Objetivos

Los objetivos más inmediatos planteados por el modelo numérico han sido contribuir a la mejora del modelo conceptual de funcionamiento hi-

drodinámico, obtener el balance hídrico medio anual, y valorar el comportamiento y la incidencia que tuvo la explotación adicional y ocasional del sistema realizada entre el 15 de abril 2006 y el 30 de septiembre de 2008 para compensar el déficit de recursos superficiales provocado por la sequía sufrida durante esos años.

Las mencionadas actuaciones propiciaron una situación desconocida hasta entonces, denominada en este artículo como situación de estrés hídrico (SEH), por lo que el sistema hidrogeológico fue sometido a un minucioso seguimiento piezométrico y de la calidad del agua por parte de la CHJ y del IGME. Con los datos obtenidos se ha construido un modelo matemático cuya finalidad es la de disponer de una herramienta que permita valorar en términos numéricos y objetivos el comportamiento del propio acuífero, así como las afecciones ocasionadas a los ecosistemas acuáticos con él relacionados, especialmente al río Júcar y a La Albufera de Valencia.

Al tratarse de un acuífero costero, es obligado comentar que durante el periodo SEH el control

de la calidad de sus aguas no detectó procesos de salinización mínimamente relevantes, debido entre otras cuestiones al elevado volumen de recursos del sistema, razón por la cual el comportamiento del flujo subterráneo se ha simulado con densidad constante.

### 3. Zona de estudio

El área modelada, con una superficie de 561,5 km<sup>2</sup>, coincide prácticamente con la delimitación oficial de la MASub 080.142 Plana de Valencia Sur de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (566,19 km<sup>2</sup>) y se extiende total o parcialmente sobre 45 términos municipales de la provincia de Valencia (Figura 1). Su límite norte define el lago de La Albufera de Valencia (inscrita en el Convenio de Ramsar) y los suaves relieves calizos del anticlinal cretácico de Lombai. Los límites oeste y sur los configuran la sierra del Ave, el macizo del Caroch y la sierra de Las Agujas, también mayoritariamente carbonatados, mientras que al este se encuentra el mar Mediterráneo.

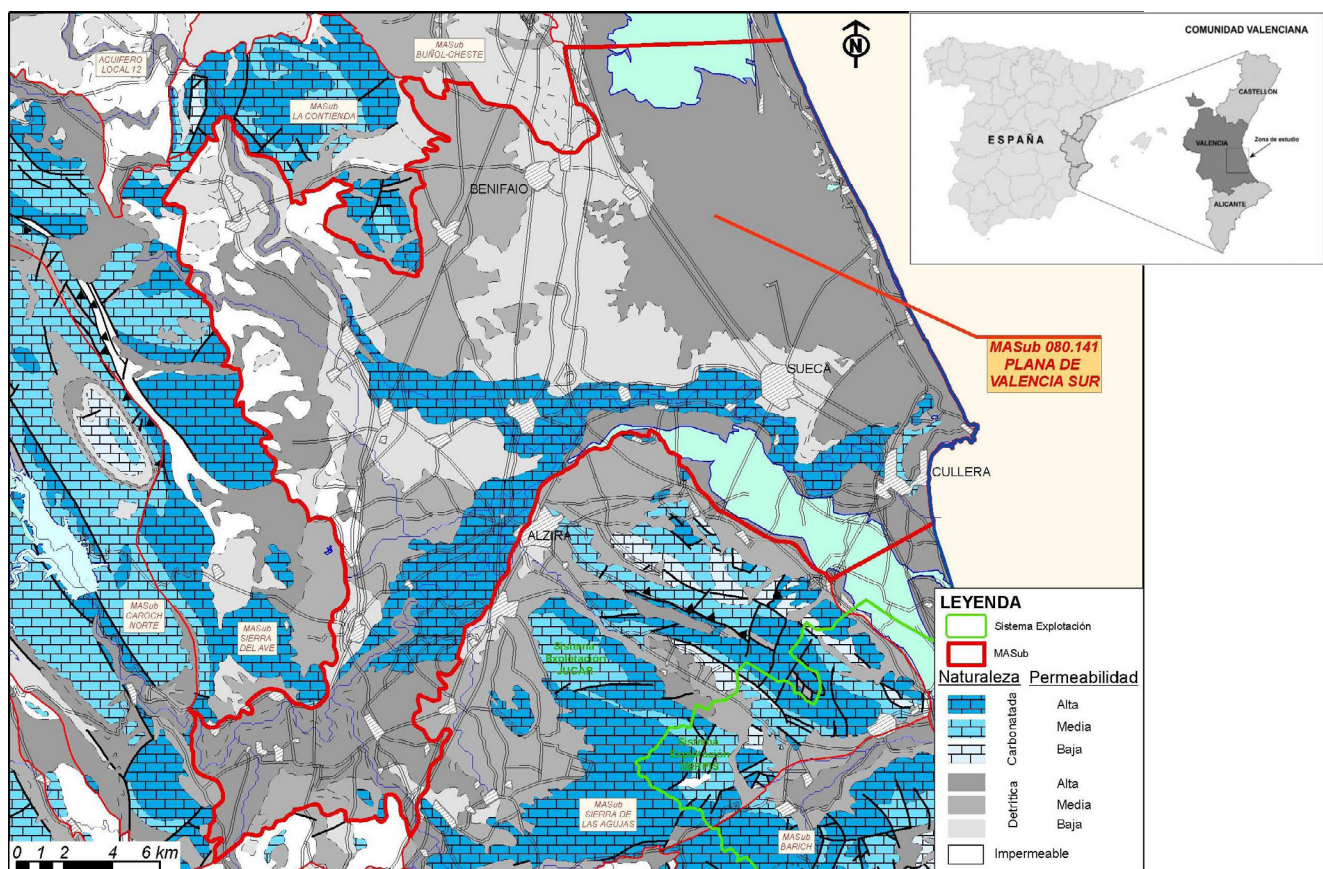
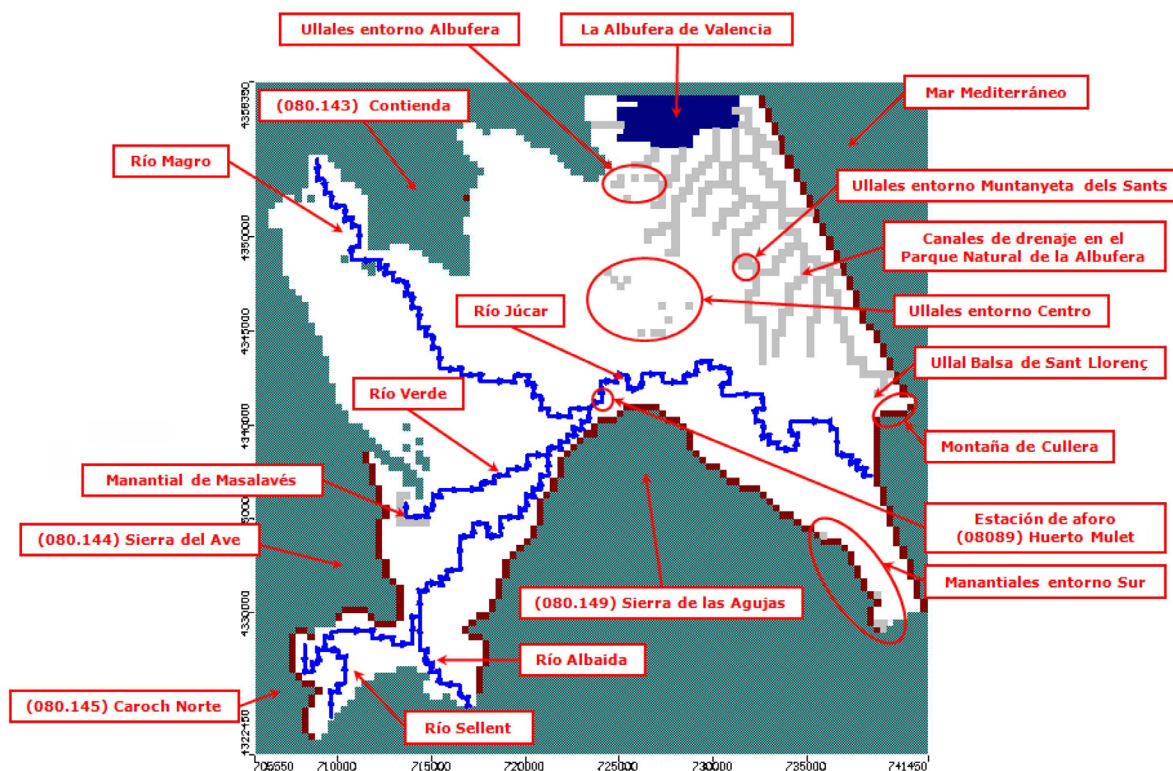


Figura 1. Localización de la zona de estudio (IGME, 2012).

Figure 1. Location of the study area (IGME, 2012).



**Figura 2.** Principales elementos y topónimos del acuífero Plana de Valencia Sur (Ballesteros y Navarro, 2016).

**Figure 2.** Main elements and place names of Plana de Valencia Sur aquifer (Ballesteros and Navarro, 2016).

Desde un punto de vista geológico, el área se sitúa en la zona de contacto entre la Cordillera Ibérica, con directriz NO-SE, y la Cordillera Bética, con directriz SO-NE. En este ámbito territorial, asociada a la etapa de distensión oligoceno-neógena y ligada a la creación y estructuración del surco de Valencia, se originó una importante cuenca sedimentaria con una geometría de *horst* y *grabens* (Vera, 2004) que fue progresivamente rellenada por depósitos continentales y lacustres durante el final del Cenozoico y el Cuaternario.

La morfología del territorio es la de una extensa planicie con una pendiente que descende progresivamente desde los 240 m de cota del sector más occidental hasta el nivel del mar. En ella sobresalen algunos relieves aislados de formaciones carbonatadas cretácicas cuyos mayores exponentes son la Montaña de Cullera (Figura 2), con 233 m s.n.m., y la Muntanyeta dels Sants. A lo largo de la superficie así delimitada discurren el río Júcar y sus afluentes Magro, Verde, Albaida y Sellent, mientras que en la mitad meridional se asienta el lago de La Albufera, alimentado por un complejo entramado de canales de drenaje y de manantiales, o *ullales* en la terminología local, asociados a flujos sub-

terráneos. En la mayor parte de la superficie del acuífero se desarrolla una intensa actividad agrícola orientada al cultivo de cítricos y del arroz, receptores de un importante volumen de recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos.

#### 4. Modelo hidrogeológico conceptual

Cualquier modelo numérico necesita partir de un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico suficientemente representativo de la realidad, en el que la calibración y la validación del modelo numérico inicial sean sometidas posteriormente a un proceso de retroalimentación que permita evaluar, a su vez, la bondad de dicho modelo conceptual y, en su caso, proceder a su mejora. Con este fin, se describen los principales rasgos y características en las que se ha basado el modelo.

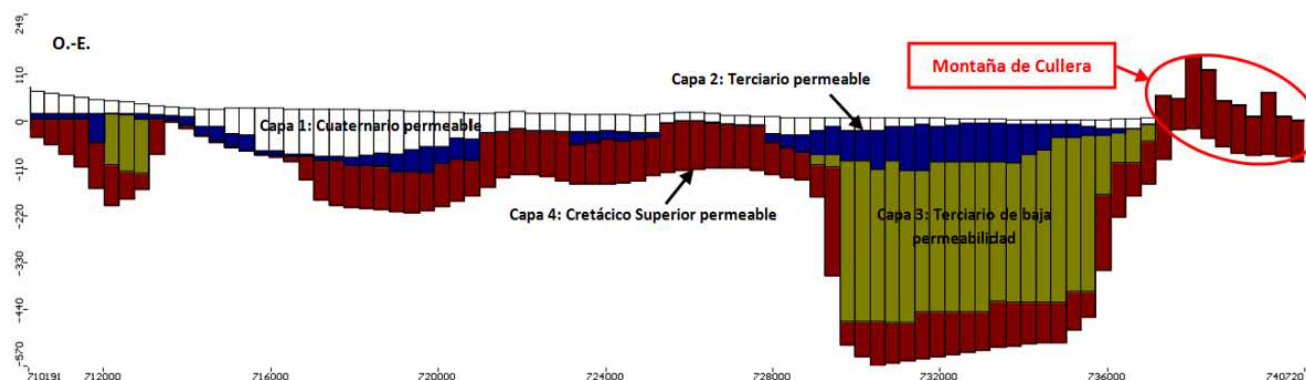
##### 4.1. Litología y geometría del sistema

En el esquema tectosedimentario del sistema se han diferenciado cuatro formaciones geológicas, asignadas a su vez a otras tantas capas numéricas, cuya distribución geométrica se estableció mediante un minucioso análisis

Capa	Litología	Espesor (m)	Edad
1	Gravas, arenas y conglomerados	0-120	Cuaternario
2	Areniscas y conglomerados. Calizas	0-300	Plioceno
3	Margas	0-400	Mioceno
4	Calizas y dolomías	>200	Cretácico

**Tabla 1.** Litologías y espesores de las capas definidas en el modelo.

**Table 1.** Lithologies and thicknesses of the layers defined in the model.



**Figura 3.** Sección geológica de orientación O-E del acuífero Plana de Valencia Sur (zona central).

**Figure 3.** Geological cross-section of orientation W-E of Plana de Valencia Sur (central zone).

litoestratigráfico y sedimentológico realizado a partir de cartografía geológica, prospección geofísica y columnas litológicas de sondeos (IGME, 2012) (Tabla 1 y Figura 3).

La formación más superficial responde a una litología de materiales detríticos gruesos, de alta permeabilidad y edad cuaternaria, constituidos por gravas, arenas y conglomerados calizos embutidos en una matriz con diferente grado de consolidación. Entre estas litologías se disponen también algunos materiales como finos, limos y arcillas, que no llegan a provocar desconexiones hidráulicas relevantes. Estos sedimentos, con un espesor máximo de 120 m, se extienden a lo largo del sistema hidrogeológico de una forma bastante continua, aunque tienden a perder potencia hacia el este. Bajo la anterior formación se dispone un tramo (Terciario permeable) de areniscas y conglomerados del Plioceno, con una permeabilidad algo menor que la suprayacente, así como algunos horizontes de calizas lacustres del Mioceno terminal (Pontiense). El conjunto presenta frecuentes pasadas de materiales finos que limitan la interconexión hidráulica vertical y horizontal, y le confieren un comportamiento hidrodinámico de acuífero multicapa con diversas presiones y cargas hidráulicas. Esta formación alcanza hasta 300 m de potencia en la mitad

oriental del sistema, mientras que su presencia y continuidad es sensiblemente menor en la mitad occidental.

Infrayacente a las dos formaciones anteriores se encuentra un tramo margoso de baja permeabilidad y edad Mioceno (Terciario de baja permeabilidad) que aparece de forma discontinua en la mitad occidental del acuífero, pero adquiere una gran continuidad y potencia en la mitad oriental, donde rellena las zonas de *graben*, con espesores de hasta 400 m. Por último, la formación más profunda corresponde a los carbonatos de alta permeabilidad del Cretácico Superior, distribuidos de forma muy irregular al estar afectados por fracturas y deformaciones de primer orden que, incluso, posibilitan su afloramiento en la Muntanyeta dels Sants y en la Montaña de Cullera (Figura 3). Normalmente, subyacen al Mioceno margoso, pero en algunos sectores donde esta formación se encuentra ausente permiten su conexión hidráulica con los sedimentos permeables pliocenos y cuaternarios. La potencia asignada a la formación acuífera cretácica es mayor de 200 m y su muro, que constituye a su vez la base impermeable de todo el sistema acuífero, viene dado por los tramos margosos del propio cretácico y/o por las arcillas con yesos del Trías Keuper.

#### 4.2. Esquema de funcionamiento y componentes del balance hídrico

Las formaciones permeables del Cuaternario y Plioceno se encuentran de forma habitual en conexión hidráulica vertical. También en la mitad occidental del sistema, donde las margas miocenas de baja permeabilidad aparecen de forma discontinua, existe conexión directa entre las citadas formaciones y los carbonatos cretácicos subyacentes, mientras que, por el contrario, la gran continuidad y espesor que adquieren los sedimentos miocenos en la mitad oriental imposibilitan la conexión hidráulica de aquéllos con las formaciones pliocuaternarias.

En régimen natural y a escala global, el flujo subterráneo adquiere en la mitad septentrional del acuífero un sentido O-E, desde el interior hacia La Albufera y el mar Mediterráneo, mientras que en la mitad meridional se dirige hacia el río Júcar y sus afluentes, así como también hacia el mar. No obstante, en régimen alterado y a escala más local, en algunos sectores se aprecian modificaciones hidráulicas en los flujos horizontales respecto a dicho régimen natural.

En la situación actual, las entradas de recursos hídricos al sistema se producen por la infiltra-

ción del agua de la precipitación atmosférica y de los excedentes de riego, por infiltración de los cauces superficiales en sus tramos perdedores y por transferencias laterales subterráneas desde las MASubs contiguas. Las salidas tienen lugar por los canales de drenaje que discurren por el interior del Parque Natural de La Albufera, por los manantiales y *ullals*, ubicados esencialmente en el entorno del parque, y a través del propio lecho del lago. El sistema también es drenado de forma importante por los ríos con tramos ganadores, por salidas subterráneas al mar Mediterráneo y por los aprovechamientos y bombeos practicados en toda su superficie. De forma similar, se ceden recursos por transferencia lateral al acuífero de la Sierra de las Agujas (Figura 4).

#### 4.3. Ecosistemas asociados

El acuífero de la Plana de Valencia está estrechamente relacionado con dos importantes ecosistemas: el lago de La Albufera y el río Júcar. Por lo que respecta a las aguas subterráneas, el primero está mantenido por aportes directos procedentes de las surgencias difusas existentes en el propio lecho del lago (1) y por aportes indirectos de su entorno más inmediato, correspondien-

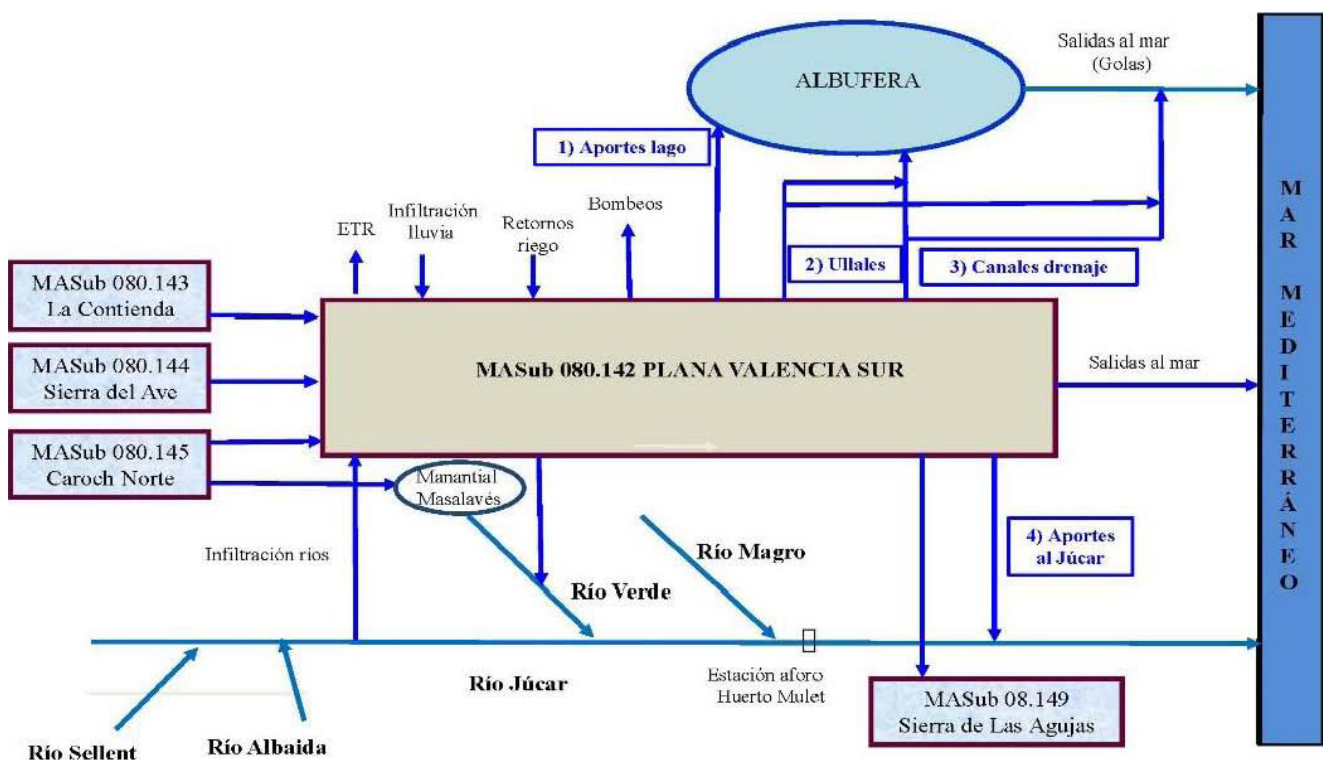


Figura 4. Esquema de funcionamiento hidrodinámico del sistema hidrogeológico Plana de Valencia Sur.

Figure 4. Hydrodynamic behavior scheme of hydrogeological system Plana de Valencia Sur.

Periodo de paso	Inicio	Final
1	15 abril 2006	31 octubre 2006
2	1 noviembre 2006	30 abril 2007
3	1 mayo 2007	30 septiembre 2007
4	1 octubre 2007	29 febrero 2008
5	1 marzo 2008	30 septiembre 2008

**Tabla 2.** Periodos de paso de la simulación en régimen transitorio (15/04/2006-30/09/2008).

**Table 2.** Periods of passage of the simulation in transitory regime (15/04 / 2006-30 / 09/2008).

tes a los *ullales*, o surgencias en la zona de la marjal (2), así como a los canales de drenaje (3). Por su parte, el río Júcar (4) es alimentado a través del lecho de su cauce, si bien mantiene con el acuífero una relación variable (espacial y temporal), por lo que para su estudio se han diferenciado varios tramos (Figuras 4 y 22).

## 5. Descripción del modelo numérico

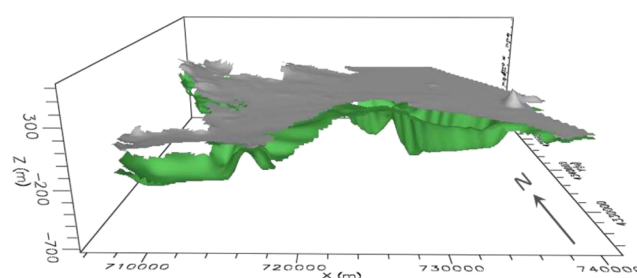
El dominio de trabajo queda delimitado por las coordenadas X: 705.500-741.450 e Y: 4.322.450-4.358.350 (elipsoide WGS84. Coordenadas UTM Huso 30S). El territorio se ha discretizado en 100 filas y 100 columnas con celdas cuadradas de 359 x 359 m con una extensión de 0,129 km<sup>2</sup>. Esto supone una superficie de 1.288,8 km<sup>2</sup>, si bien no todas las celdas son activas, ya que de las 10.000 disponibles sólo 4.357 constituyen el dominio del modelo en su capa superior, lo que implica una superficie real de trabajo de 561,5 km<sup>2</sup>. En cuanto a la discretización vertical, como se describe posteriormente con más detalle, el modelo consta de cuatro capas con una distribución de celdas activas e inactivas ligeramente diferente según la disposición de los materiales de baja permeabilidad que conforman su base.

La simulación en régimen permanente se ha establecido para el año medio de un periodo de 18 años, en concreto del comprendido entre el 1 de octubre de 1990 y el 30 de septiembre de 2008, y se ha elaborado a partir de datos medios de los diferentes parámetros que intervienen en la modelación (bombeos, niveles piezométricos, registros hidrométricos en manantiales y en el río Júcar, lámina de agua en el lago de la albufera, etc.). Para el lapso temporal indicado también se ha estimado la infiltración mensual media a través de la superficie del terreno, que engloba tanto la recarga por la precipitación como los retornos de riego y las inundaciones estacionales en el entorno del lago para el cultivo del arroz.

Para la simulación del modelo en régimen transitorio se ha utilizado el periodo seco comprendido entre el 15 de abril de 2006 y el 30 de septiembre de 2008. En el proceso se diferenciaron cinco periodos de paso (Tabla 2) que corresponden a periodos alternativos con bombeos reducidos, sin extracciones excepcionales por sequía (periodo invernal), y elevados, en los que a la explotación habitual se suman las extracciones excepcionales por sequía (periodo estival).

### 5.1. Capas

Las cuatro capas introducidas equivalen a las cuatro formaciones geológicas diferenciadas. La capa 1 a los materiales detríticos (gravas, arenas y conglomerados) de elevada permeabilidad del Cuaternario, la capa 2 a los materiales permeables detríticos del Plioceno y calizas del Mioceno terminal (Pontiense), la capa 3 representa los materiales margosos de baja permeabilidad del Mioceno y, finalmente, la capa 4 se atribuye a los carbonatos permeables cretácicos (Tabla 2). Para que el modelo pueda trabajar se han introducido las siguientes superficies: topográfica, base del Cuaternario, base del Plioceno, techo del Cretácico (dada la discontinuidad del Mioceno en la zona occidental del sistema) y muro del sistema (Figura 5).



**Figura 5.** Superficie topográfica y de muro del acuífero Plana de Valencia Sur.

**Figure 5.** Topographic and base surfaces of Plana de Valencia Sur aquifer.

### 5.2. Parámetros hidrodinámicos

La información existente al respecto es precisa y abundante para los materiales cuaternarios de la capa 1, ya que son fácilmente accesibles y existen numerosas captaciones y ensayos de bombeo. Para las restantes capas, localizadas a profundidades progresivamente mayores, la información es sensiblemente inferior.

Así, para la capa 1 (K muy alta por porosidad intergranular) se han introducido valores de permeabilidad horizontal ( $K_x=K_y$ ) con un rango entre 0,01 y 1.000 m/d, valores similares a los obtenidos en ensayos de pozos y sondeos (Tabla 3), lo que ha supuesto definir quince dominios diferentes (Figura 6). Para la capa 2 (K media/alta por porosidad y fisuración) la permeabilidad horizontal obtenida en campo oscila entre los 20 y los 400 m/d. No obstante, los sondeos que alcanzan esta capa se encuentran influenciados por los materiales cuaternarios suprayacentes, por lo que se estimó en 30 m/d su valor más representativo. A la capa 3 (K muy baja), por sus características litológicas, se ha asignado una permeabilidad horizontal de 0,1 m/d. En cuanto a la capa 4 (K alta por fisuración y karsificación), los valores puntuales de permeabilidad horizontal obtenidos en sondeos oscilan entre los 10 y los 500 m/d, por lo que en principio se estimó en 45 m/d como el más representativo de la mayor parte del área modelada. Sin embargo, el proceso de calibración exigió aumentar dicho valor hasta los 200 m/d en el sector noroccidental.

Entre los tramos permeables de las capas 1 y 2 se disponen frecuentes horizontes de material fino que generan situaciones de semiconfinamiento e incluso de confinamiento. El tratamiento de estas capas como libres dificultó su calibración numérica, por lo que para conseguir un ajuste adecuado se aplicaron en sucesivas simulaciones coeficientes de almacenamiento

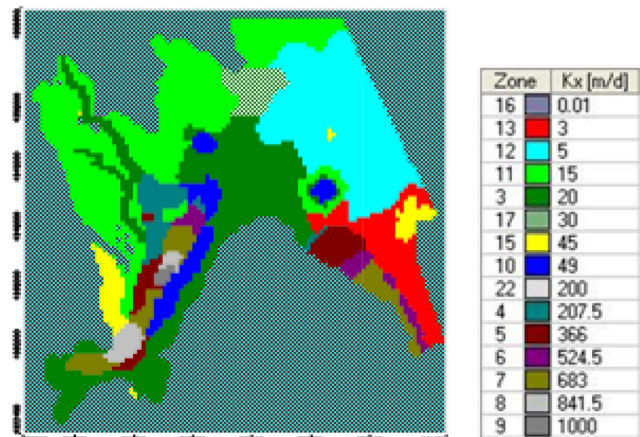


Figura 6. Permeabilidad horizontal estimada ( $K_x=K_y$ ) para la Capa 1 (IGME, 2012).

Figure 6. Estimated horizontal permeability ( $K_x=K_y$ ) for Layer 1 (IGME, 2012).

(S) inferiores a los proporcionados por el modelo conceptual (IGME, 2012).

Como ya se ha comentado, el flujo vertical a través de la capa 3 es prácticamente nulo allí donde adquiere cierto espesor (mitad oriental del modelo), con la consiguiente desconexión hidráulica de las capas 1 y 2 con la 4. Por el contrario, existe conexión hidráulica en la mitad occidental, donde la capa 3 llega a estar ausente. Esto supone que la capa 4 está confinada en unos lugares, mientras que en otros está semiconfinada. Para afrontar esta problemática se trabajó del siguiente modo: i) se consideraron los valores bibliográficos de los parámetros *specific yield* (Johnson, 1967) y *specific storage* (Younger, 1993), más acordes con los observados en la naturaleza y optimizados posteriormente después de los correspondientes análisis con PEST y de sensibilidad, ii) las capas se consideraron como *Type 3 Confined/Unconfined* que permite variaciones de la transmisividad y del coeficiente de almacenamiento que puede adquirir valores confinados y/o libres, permitiendo también el cese del goteo ver-

Capa	Permeabilidad (K)	
	Valores de campo (m/día)	Valores aplicados (m/día)
1	0,01 a 1.000	0,01 a 1.000
2	20 a 400	30
3	-	0,1
4	10 a 500	45 (200 sector noroccidental)

Tabla 3. Permeabilidad aplicada a las 4 capas del modelo.

Table 3. Permeability applied to the 4 layers of the model.



Capa	Coefficiente de almacenamiento (S)
1 y 2	$5 \times 10^{-2}$ a $2,5 \times 10^{-3}$
3	$10^{-5}$
4	$3 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-5}$

**Tabla 4.** Coeficientes de almacenamiento aplicados.

**Table 4.** Applied storage coefficients.

tical hacia la capa infrayacente si la superior superior se seca (Waterloo Hydrogeologic, 2015). Finalmente, iii) en aquellos lugares donde el modelo conceptual consideraba probable la conexión hidráulica entre capas se aumentó el valor de  $K_z$  al mínimo necesario para conseguir una única superficie piezométrica, resultante de las diversas cargas hidráulicas de cada una de las capas implicadas. Los coeficientes de almacenamiento asignados se exponen en la Tabla 4.

### 5.3. Condiciones de borde

La condición *constant heads* responde a la representación de un límite abierto al flujo lateral subterráneo. Donde no se da esta condición se interpreta que el límite es hidráulicamente cerrado. Las celdas consideradas como tales en las 4 capas para cada capa del modelo se indican en la Figura 7.

La condición *river*, que sólo afecta a la capa superior, se utilizó para simular los intercambios hídricos entre el acuífero y La Albufera de Valencia a través de su lecho (Figura 8 izq.). Para el régimen permanente se estimó una altura media de la lámina de agua en la laguna de 0,26 m s.n.m. En régimen transitorio, a partir de la información procedente de la CHJ y de la empresa TYPESA, se determinaron los niveles referidos en la Tabla 5 para los diferentes periodos de paso.

La condición *stream*, que al igual que en el caso anterior sólo afecta a la capa superior, se

empleó para establecer la relación de la MASub con el río Júcar y de sus afluentes: Magro, Verde, Albaida y Sellent. Dicha condición permite evaluar la relación río-acuífero en cualquier tramo de cauce fluvial para cada periodo de paso y calcular los caudales circulantes totales al final del mismo, fruto tanto de los intercambios con el acuífero como del aporte superficial del tramo fluvial anterior (Figura 8 dcha.).

Por último, con la condición *drain*, también sólo aplicable a la capa 1, se simuló los principales manantiales, así como los canales de drenaje, que drenan al lago o directamente al mar a través de las denominadas *golas* o canales de desagüe (Perellonet, Perelló, Rei y Sant Llorenç). Los manantiales se ubican preferentemente en la zona centro-oriental del sistema, mientras los canales de drenaje lo hacen en su banda más oriental (Figura 9).

### 5.4. Recarga

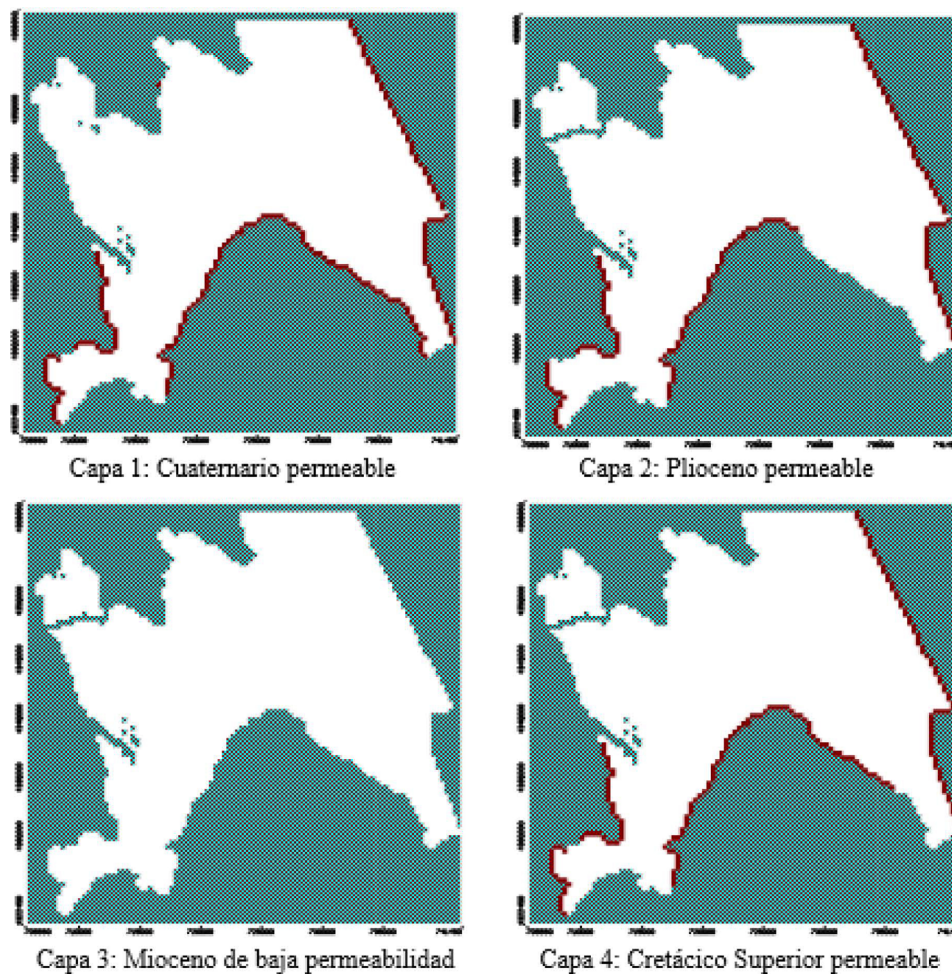
La metodología utilizada para estimar el valor de la recarga en cada celda ha sido compleja y por sí sola podría ser objeto de un único artículo, por lo que aquí se expone es sólo un breve resumen. La metodología aplicada determina de forma conjunta la recarga por infiltración de agua de lluvia y la correspondiente a los excedentes de riego.

Los datos de partida fueron los suministrados por las estaciones meteorológicas de la AEMET e IVIA (octubre 1980-mayo 2009) sobre precipi-

Orden periodo de paso	Periodo	Cota media de La Albufera (m s.n.m.)
1	15 abril 2006 - 31 octubre 2006	0,22
2	1 noviembre 2006 - 30 abril 2007	0,26
3	1 mayo 2007 - 30 septiembre 2007	0,24
4	1 octubre 2007 - 29 febrero 2008	0,35
5	1 marzo 2008 - 30 septiembre 2008	0,22

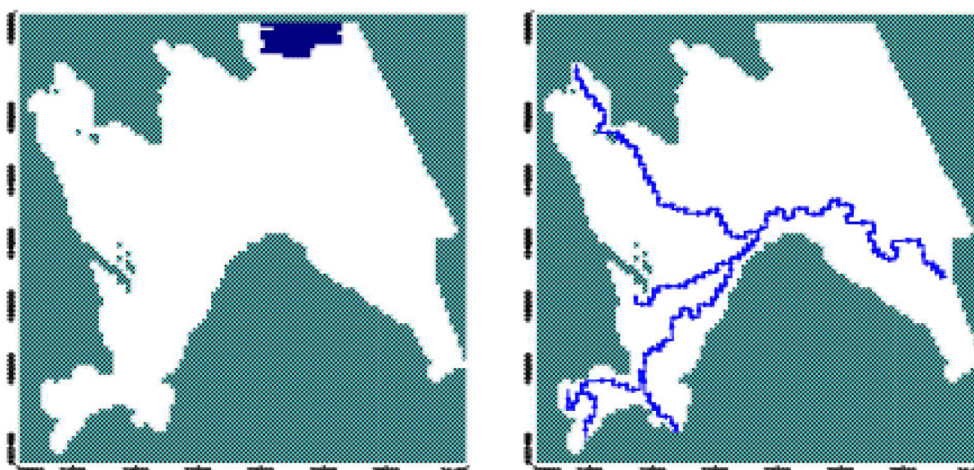
**Tabla 5.** Cota media del nivel del lago de La Albufera para los cinco periodos de paso en régimen transitorio.

**Table 5.** Average level of the lake of La Albufera for the five periods of passage in transitory regime.



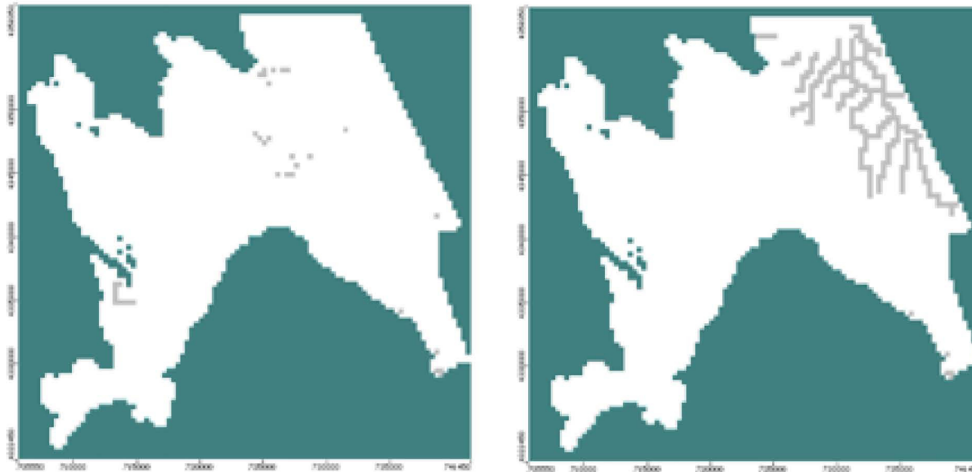
**Figura 7.** Distribución de “constant heads” para las 4 capas del modelo numérico.

**Figure 7.** Distribution of constant heads for the 4 layers of numerical model.



**Figura 8.** Localización de La Albufera de Valencia (izq.), y del río Júcar y sus afluentes (dcha.).

**Figure 8.** Location of the Albufera of Valencia (left), and the Júcar river and its tributaries (right).



**Figura 9.** Localización de manantiales (izq.) y canales de drenaje (dcha.) en el modelo numérico.

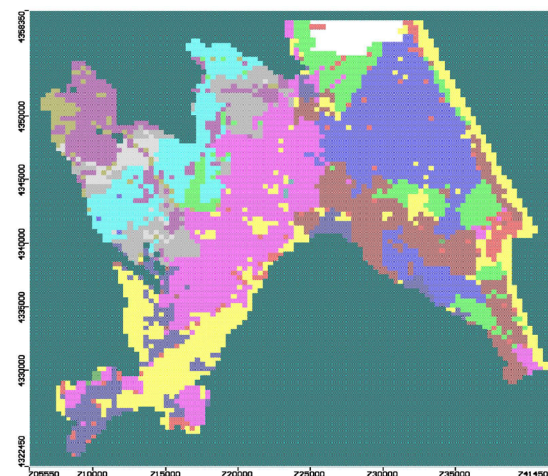
**Figure 9.** Location of springs (left) and drain channels (right) in the numerical model.

tación, temperatura y valor de ETo, el mapa digital de Cultivos y Aprovechamientos del Suelo elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), y la delimitación de las Zonas de Riego facilitado por la CHJ. La selección y procesado de esta información condujo tanto a la delimitación de los polígonos de trabajo por uso del suelo (cítricos, arroz, otros cultivos, cultivos mixtos, zonas urbanas y de infraestructuras, afloramientos rocosos y zonas litorales) como a la deducción de las series de precipitación y ETo en cada uno de estos polígonos de trabajo (en mm/día) para el periodo modelado (octubre 1980-mayo 2009). Posteriormente, el cálculo del coeficiente de cultivo diario a partir de información del IVIA y de la FAO permitió calcular la ETP (mm/día) también por polígono de trabajo. Conocida la superficie de dichos polígonos, constituidos en unidades básicas de cálculo, se agregaron los valores de precipitaciones y ETP en hm<sup>3</sup>/día.

A partir de la información obtenida se delimitaron siete Zonas de Riego según sus características (derivaciones de riego, forma de riego, dotación, coeficientes de retorno, etc.) y tipo de cultivo (arrozal, naranjo, mixto, etc.). En aquellos lugares con información insuficiente se procedió a extrapolarla a partir de la existente en áreas cercanas con características similares. Este tipo de información se distribuyó, una vez más, entre los polígonos de trabajo de cada una de las Zonas de Riego, por lo que se pudo estimar la dosis de riego por polígono (hm<sup>3</sup>/mes).

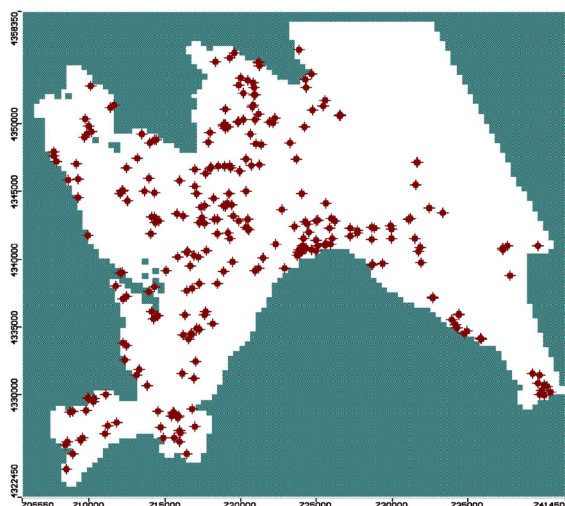
Conocidos los valores mensuales de los términos comentados, se determinó el balance hídrico

en el suelo (Pérez, 2005) y se evaluó (hm<sup>3</sup>/mes y por polígono de trabajo) su grado de humedad, la ETR y los excedentes totales desglosados en escorrentía superficial e infiltración. Finalmente, y una vez cuantificados dichos términos, los valores de infiltración se agruparon en dominios espaciales con los que se alimentó el modelo numérico tanto en régimen permanente como transitorio, aplicados, únicamente y como es lógico, sobre la capa 1 (Figura 10). Dado que en gran parte del dominio de trabajo las aguas subterráneas se encuentran muy próximas a la superficie, se ha con-



**Figura 10.** Distribución de los valores de recarga por infiltración (mm/d) (capa 1, régimen permanente). Azul oscuro:2,00, marrón:1,71, rosa:1,47, azul claro:1,45, gris claro:1,24, verde:1,17, amarillo:0,75, morado:0,64 y gris oscuro: 0,21.

**Figure 10.** Distribution of recharge values by infiltration (m/d) (layer 1, steady state flow regime). Dark blue:2.00, brown:1.71, pink:1.47, light blue:1.45, light gray:1.24, green:1.17, yellow:0.75, purple:0.64, and dark gray: 0.21.



**Figura 11.** Bombeos considerados en el modelo numérico.  
**Figure 11.** Pumping wells considered in the numerical model.

siderado que la infiltración a través del terreno atraviesa la zona vadosa y alcanza el acuífero en un mismo periodo de paso.

### 5.5. Condiciones iniciales y bombeos

Para la primera simulación, Visual MODFLOW requiere la introducción de una piezometría inicial que si es bien escogida reduce sensiblemente el tiempo de cálculo. De este modo, para el régimen permanente se aplicó una piezometría media de 2,5 m s.n.m. en el tercio más oriental del dominio, mientras que para el resto se estableció en 27,5 m s.n.m. Estas cargas corresponden a las medias de los niveles piezométricos disponibles para el periodo 01/10/1990-30/09/2008. Conseguido un modelo estable y representativo del sistema hidrogeológico en régimen permanente, las piezometrías resultantes se tomaron como niveles iniciales en la simulación en régimen transitorio.

Por su parte, las captaciones de aguas subterráneas abundan en las tres cuartas partes occidentales del dominio del modelo, siendo prácti-

camente inexistentes en la franja oriental-litoral (Figura 11). La información sobre este término, proporcionada por el IGME y la CHJ, permitió identificar 217 explotaciones de las que, en conjunto y hasta el año 2005, se extraía un volumen anual algo superior a los 56 hm<sup>3</sup>. En el modelo se han incorporado todas las que igualan o superan los 10 m<sup>3</sup>/día.

La comentada situación de escasez de recursos hídricos superficiales sufrida en la Demarcación Hidrográfica del Júcar entre los años 2006 y 2008 obligó a la puesta en marcha de los sondeos de sequía construidos en su mayor parte entre los años 1995 y 1996 con el fin de cubrir la demanda agrícola. De las 217 captaciones contempladas en el modelo numérico (Figura 12), 83 son de este tipo. Los 68,8 hm<sup>3</sup> extraídos en ellas de forma adicional durante la sequía supusieron una explotación intensiva y coyuntural del acuífero (IGME-CHJ, 2006, 2007 y 2008), con un incremento del 87%, 96% y 56% respecto a los practicados habitualmente en el sistema durante las tres campañas de riego correspondientes a cada uno de esos años (Tabla 6). Los volúmenes extraídos se asignaron en el modelo de forma discretizada a cada una de las captaciones.

### 5.6. Calibración del modelo

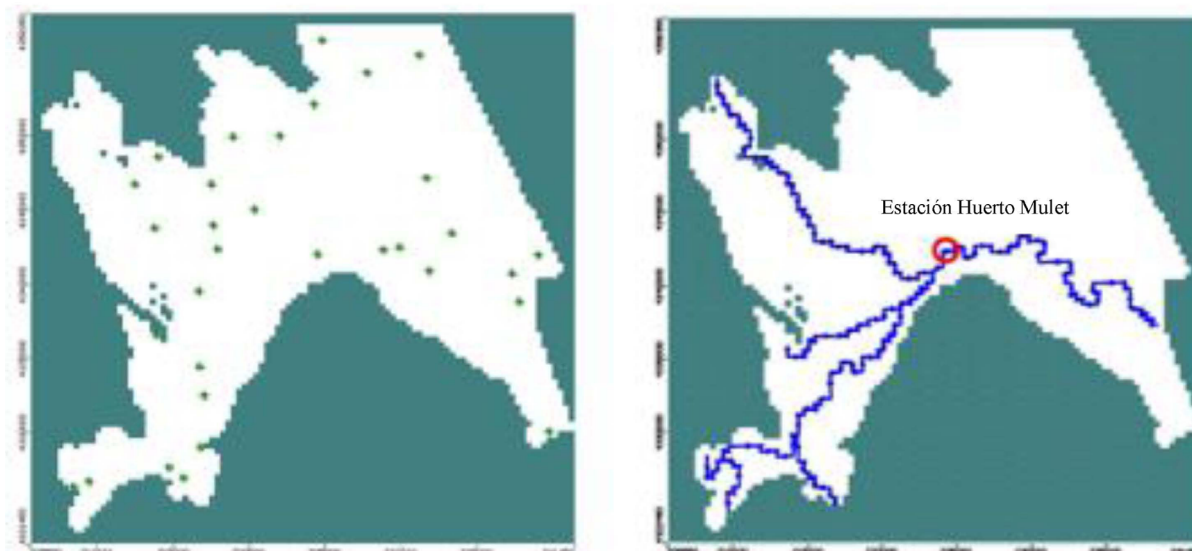
Por tratarse de un método relativamente rápido y de fácil convergencia, para resolver el cálculo de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales del flujo subterráneo, tanto en régimen permanente como en transitorio, se utilizó el algoritmo WHS desarrollado por Waterloo Hydrogeologic.

En la calibración del modelo numérico se han utilizado 32 puntos de control piezométrico, para el caso del régimen permanente, y 35 para el transitorio, seleccionados en función de sus características (localización, evolución piezométrica, co-

Periodo paso	Inicio periodo	Final periodo	Bombeos (hm <sup>3</sup> )		
			Totales	Sequía	Restantes
1	15 abril 2006	31 octubre 2006	58,4	27,1 ( 87%)(*)	31,3
2	1 noviembre 2006	30 abril 2007	25,5	0	25,5
3	1 mayo 2007	30 septiembre 2007	46,8	22,9 (96%)(*)	23,9
4	1 octubre 2007	29 febrero 2008	21,4	0	21,4
5	1 marzo 2008	30 septiembre 2008	52,3	18,8 (56%)(*)	33,5
	Total		204,4	68,8	135,6

**Tabla 6.** Volumen bombeado. (\*) Incremento porcentual sobre explotación habitual.

**Table 6.** Pumped volume. (\*) Percentage increase over normal exploitation.



**Figura 12.** Piezómetros considerados (izqda.) y situación de la estación de aforo de Huerto Mulet (dcha.).

**Figure 12.** Head observation wells considered (left) and location of the Huerto Mulet gauging station (right).

lumna litológica, esquema constructivo, etc.), con el fin de conseguir una distribución homogénea y representativa (Figura 12 izq.). También se contó con las series de caudales circulantes por el río Júcar en la estación de aforo 08089 Huerto Mulet (Figura 12 dcha.), así como de las principales surgencias de aguas subterráneas. Los datos suministrados por el sitio web del CEDEX, en el primer caso, y por la CHJ y el IGME, en el segundo, fueron claves para ajustar el valor de la conductancia de estos cauces y manantiales.

El caudal medio en la estación 08089 Huerto Mulet para el periodo 01/10/1990-30/09/2008 (régimen permanente) es de 19,24 m<sup>3</sup>/s (606,8 hm<sup>3</sup>/año), mientras que para el periodo 15/04/2006-30/09/2008 (régimen transitorio) es notablemente inferior, 12,32 m<sup>3</sup>/s (388,5 hm<sup>3</sup>/año). A su vez, los caudales medios registrados en los 5 periodos de paso simulados son de 9,09, 6,14, 13,11, 19,45 y 13,82 m<sup>3</sup>/s respectivamente, con una media de 12,6 hm<sup>3</sup> (Tabla 7 y Figura 13).

### 5.7. Régimen permanente

La simulación en régimen permanente presenta una mayor sencillez inicial y velocidad de ejecución que en régimen transitorio, así como una más fácil comparativa entre los datos reales y los calculados. Sus resultados reflejan la situación hidrodinámica del acuífero con piezometrías y caudales medios, hecho que facilita la posterior simulación en régimen transitorio. El modelo numérico se consideró calibrado en régimen permanente (periodo 1/10/1990 a 30/09/2008) cuando, además de su coherencia con el modelo conceptual, la piezometría calculada se ajustó a la piezometría media observada en los puntos de control. La bondad y fiabilidad del proceso se obtuvo del contraste de ambas series de valores, con una buena calibración en todas sus áreas y un error *Normalized RMS* adecuado (4,63%) (Figura 14). Sólo en 4 puntos, de los 32 considerados, el ajuste fue menor a causa de los irregulares subafloramientos del

Periodo de paso	Lapso temporal	Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	Volumen equival. (hm <sup>3</sup> /año)
1	15/04/ 2006 - 31/10/2006	9,09	286,7
2	01/11/2006 - 30/04/2006	6,14	193,6
3	01/05/2007 - 30/09/2007	13,11	413,4
4	01/10/2007 - 29/02/2008	19,45	613,4
5	01/03/2008 - 30/09/2008	13,82	435,8
		<b>12,32</b>	<b>388,5</b>

**Tabla 7.** Caudal del río Júcar en la estación de aforo 08089 Huerto Mulet (Algemesí-Valencia).

**Table 7.** Flow of the Júcar river at the gauging station 08089 Huerto Mulet (Algemesí-Valencia).

**ESTACIÓN DE AFORO (08089) HUERTO MULET**

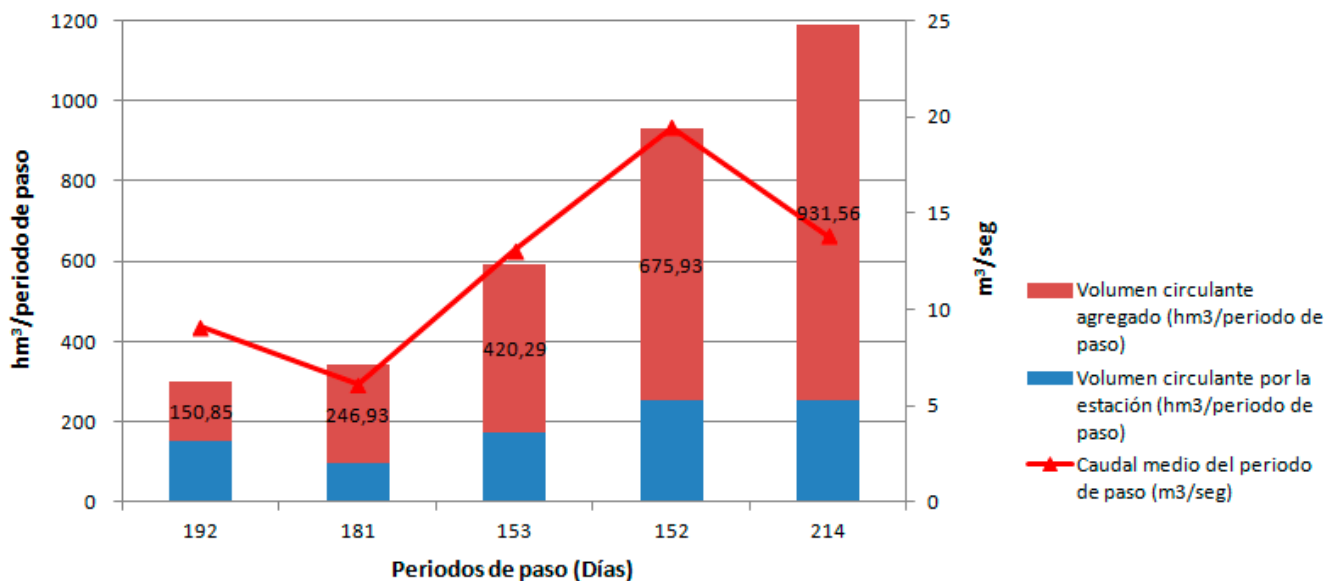


Figura 13. Caudales del río Júcar y volúmenes acumulados en la estación 08089 Huerto Mulet.

Figure 13. Flows of the river Júcar and accumulated volumes in the station 08089 Huerto Mulet.

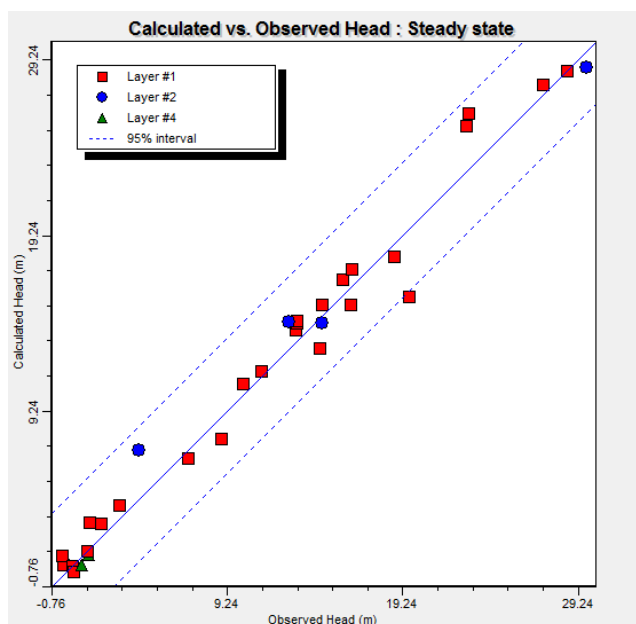


Figura 14. Calibración en régimen permanente (Calculado vs. nivel observado) en 32 piezómetros.

Figure 14. Calibration in steady state flow regime (Calculated vs. observed head) in 32 head observation wells.

impermeable de base que complicaron la correcta interpretación de la estructura geológica local. El residual máximo fue de 3,84 m, mientras que el mínimo de 0,002 m, con residual medio absoluto de 1,05 m y un coeficiente de correlación de 0,989.

**5.8. Régimen transitorio**

Como se ha comentado, el lapso temporal de la simulación en régimen transitorio (15/04/2006-30/09/2008) corresponde a una época de preci-



Figura 15. Piezómetros considerados en régimen transitorio. La evolución de los identificados numéricamente se expone en la Figura 16.

Figure 15. Head observation wells considered in the transient flow. The evolution of those identified numerically is shown in Figure 16.

pitaciones muy escasas en la que la explotación del sistema se incrementó sustancialmente por la puesta en marcha de las captaciones de sequía, con un volumen adicional explotado de 68,8 hm<sup>3</sup>. Después del ajuste del modelo, apoyado en datos de 35 piezómetros (Figura 15), el error *Normalized RMS* obtenido varía entre el 7,29% del primer periodo de paso y el 5,48% del tercero, valores bastante adecuados dada la incertidumbre sobre la geometría del muro de baja permeabilidad en algunos sectores. En estos lugares se dan las cifras más elevadas de residual máximo (entre 5,08 y 3,31 m en el primer y tercer periodo de paso, cuando los residuales mínimos se aproximan a cero), y los residuales medios absolutos (entre 1,47 y 1,17 m, para los mismos periodos de paso).

Por su parte, el coeficiente de correlación presenta valores máximos en el segundo y tercer paso temporal (0,984), con un mínimo en el primero (0,976), lo que evidencia la mayor dificultad para calibrar el primer periodo de paso debido al proceso de calentamiento inicial del modelo (Figuras 16 y 17).

## 6. Discusión

### 6.1. Funcionamiento en régimen permanente y balance hídrico medio

Los resultados obtenidos en régimen permanente muestran que en el tramo superior del sistema el flujo subterráneo discurre en sentido E, hacia los canales de drenaje y la costa mediterránea, y NE, hacia el entorno de La Albufera y sus ullales, es decir hacia las principales zonas de descarga. Este flujo procede en su inicio de las transferencias laterales de acuíferos colindantes (Figuras 2 y 18 izq.) y es alimentado progresivamente por la infiltración del agua de lluvia, retornos de riego y aportes de ríos. La única excepción se da en su interacción con el acuífero de la Sierra de las Agujas, donde la gran concentración de captaciones existentes en los sectores más cercanos a la Plana de Valencia Sur provoca un efecto de llamada del flujo subterráneo hacia él (Figura 18 dcha.).

Dentro del esquema general de funcionamiento resalta el papel desempeñado por los ríos

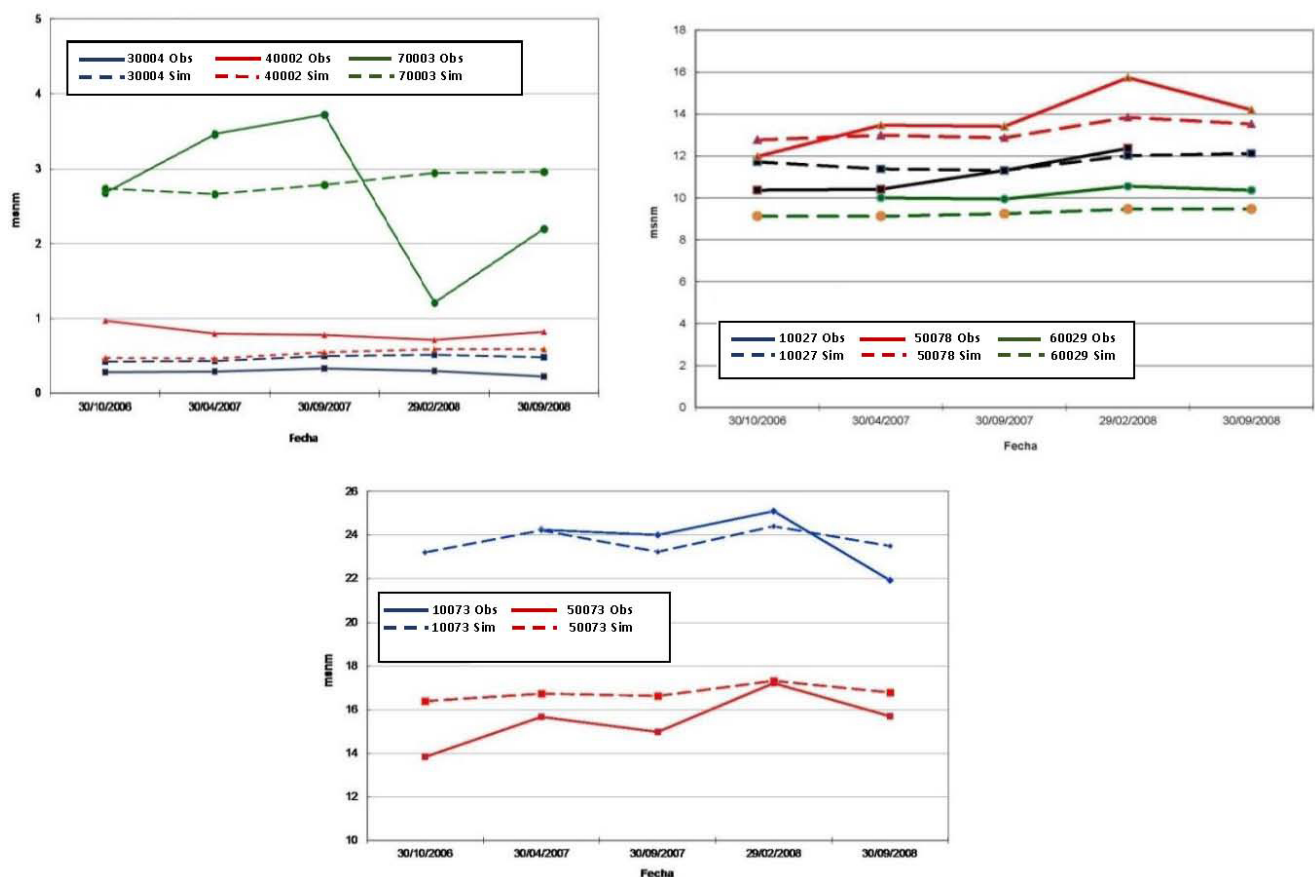


Figura 16. Piezometría observada vs. piezometría simulada (a trazos) en 8 puntos de control.

Figure 16. Observed piezometric level vs. simulated piezometric level in 8 head observation wells.

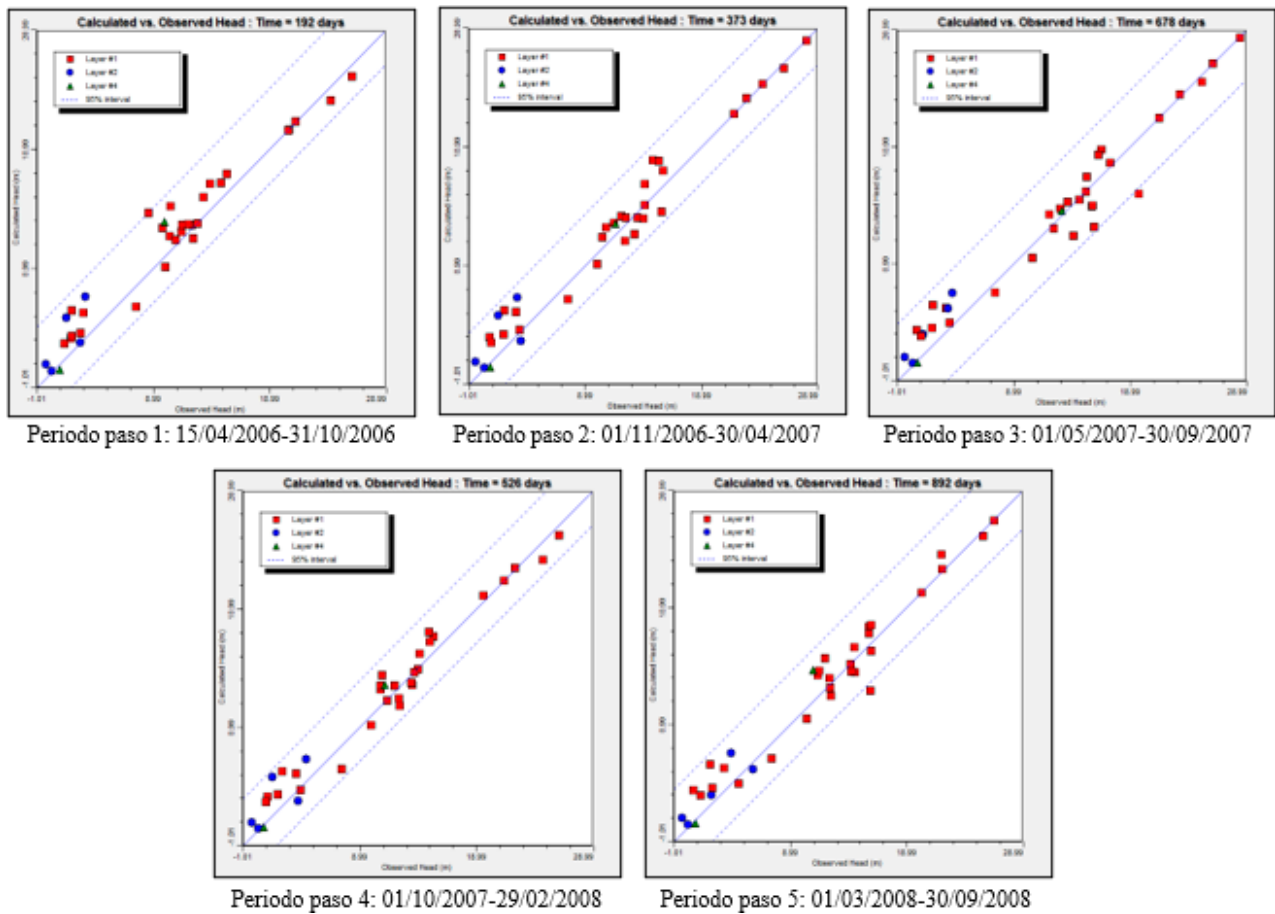


Figura 17. Piezometría calculada vs. piezometría observada en régimen transitorio.

Figure 17. Calculated head vs. observed head after the transient flow simulation.

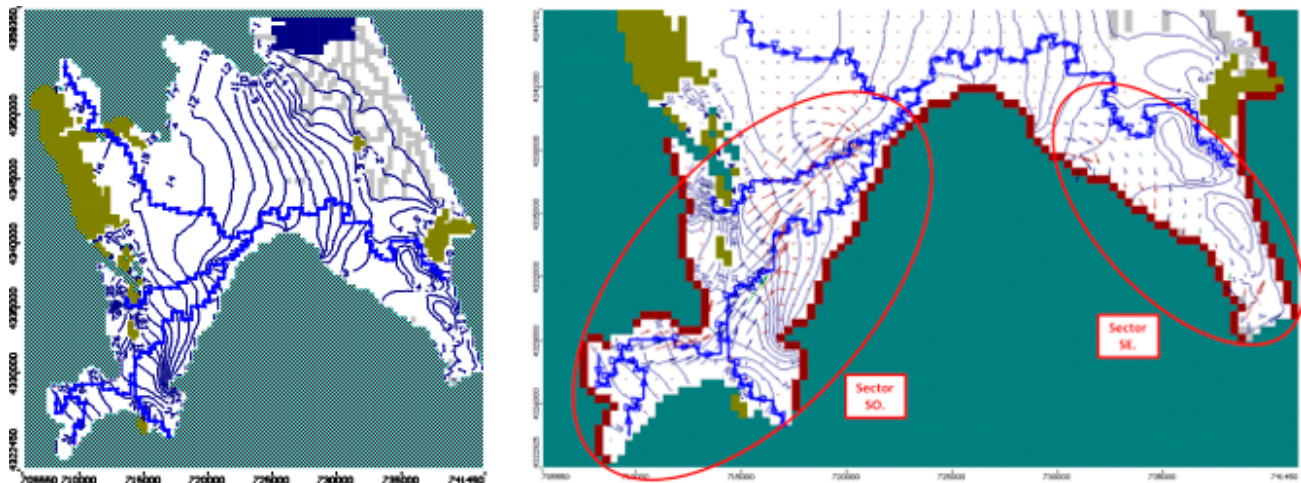


Figura 18. Superficie piezométrica de la Capa 1 en régimen permanente y detalle de la mitad meridional.

Figure 18. Water table for Layer 1 in steady state flow regime and southern half detail.

Júcar y Verde, que constituyen sendos ejes de drenaje en la mayor parte de su recorrido, especialmente en sus tramos finales. Destaca también la importante acción reguladora de los canales drenaje del entorno del parque natural que se

erigen, junto con los ríos, en el principal mecanismo de descarga del sistema. Por otra parte, comparada con los importantes recursos del acuífero, la explotación de las aguas subterráneas a través de pozos y sondeos es bastante modera-



da, sin detectarse conos de depresión ni alteraciones piezométricas significativas. En estas condiciones, el modelo en régimen permanente define una superficie piezométrica con un máximo cercano a los 79 m s.n.m. en su límite NO, y desciende de forma rápida con un acusado gradiente hidráulico hasta los 14-16 m s.n.m. en su parte centro-occidental, a partir de donde se suaviza notablemente. Por último, la piezometría cerca de la costa y en los alrededores de La Albufera ronda la cota cero.

También es obligado poner de manifiesto el funcionamiento del manantial de Masalavés que, si bien está ubicado en el sector más occidental de la Plana, constituye en realidad la principal salida del acuífero de la Sierra del Ave, de manera que parte de los recursos transferidos desde éste al acuífero de la Plana de Valencia Sur (40,7 hm<sup>3</sup>/año) son drenados casi inmediatamente por

la surgencia (12,8 hm<sup>3</sup>/año). De ahí que la transferencia finalmente considerada sea de sólo 27,9 hm<sup>3</sup>/año.

El análisis confirma, tal y como plantea el modelo conceptual, que las superficies piezométricas de las formaciones cuaternarias y pliocenas (capas 1 y 2: K muy alta) son similares, por lo que pueden ser consideradas como un único acuífero. Así mismo, se comprueba que la capa 3 (margas: K muy baja), al tener escasa potencia (incluso llega a estar ausente), alcanza en el sector occidental cargas hidráulicas muy parecidas a las de las capas superiores, mientras que las diferencias se incrementan en dirección a la zona litoral, donde adquiere un espesor de centenas de metros en el *graben* de orientación cuasi-paralela a la costa. Finalmente, la capa 4 (calizas permeables del Cretácico superior) también presenta un comportamiento hidrodinámico similar

<b>Balance hídrico MASub 08.141 Plana de Valencia Sur (Periodo 1990/2008)</b>		
<b>Entradas</b>		<b>hm<sup>3</sup>/año</b>
Infiltración (lluvia+retornos riego)		283,8
Transferencias laterales desde MASub		42,6
MASub Caroch Norte	11,4	
MASub Contienda	3,3	
MASub S. del Ave	27,9 (40,7-12,8 Masalavés)	
Aportes de ríos		35,4
Río Albaida	29,6	
Río Sellent	5,6	
Río Magro	0,2	
<b>Aportaciones totales</b>		<b>361,8</b>
<b>Salidas</b>		<b>hm<sup>3</sup>/año</b>
Transferencias laterales hacia MASub		34,8
MASub S. de las Agujas	34,8	
Drenaje a ríos		112,8
Río Júcar	52,9	
Río Verde	59,9	
Manantial de Masalavés		( 12,8) <sup>(*)</sup>
Ullales Marjal		26,3
Canales de drenaje		96,6
Albufera		13,0
Mar		22,2
Bombeos		56,1
<b>Salidas totales</b>		<b>361,8</b>

**Tabla 8.** Balance hídrico en régimen permanente (Periodo1990-2008). (\*) No computa.

**Table 8.** Water balance in steady state flow regime simulation (Period 1990-2008). (\*) Not compute.

al de las capas 1 y 2 en la mitad occidental de la MASub. La razón estriba en el escaso o casi nulo espesor de la capa 3, insuficiente para confinar a los materiales cretácicos, al contrario de lo que sucede en la mitad oriental donde su mayor potencia sí genera confinamiento.

El balance hídrico medio del sistema en régimen permanente, desglosado en sus diferentes términos mediante el programa ZONE BUDGET incluido en Visual MODFLOW, se ha determinado para el periodo de años 1990 a 2008 (Tabla 8). Los resultados indican un importante volumen de recursos renovables ( $361,8 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), procedentes especialmente de la infiltración a través de la superficie del terreno (precipitación y retornos de riego), que suponen el 78% de las entradas hídricas al sistema. Menor entidad e importancia tienen las transferencias laterales subterráneas de acuíferos colindantes, cifradas en el 12%, y los aportes de los ríos Albaida, Sellent y Magro, en este caso en el 10%.

Por el lado opuesto, el 31% de los recursos del sistema contribuyen a incrementar el caudal de los ríos Júcar y Verde ( $112,8 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), así como a alimentar por transferencia lateral a la vecina MASub 080.149 Sierra de las Agujas (10%). Sin embargo, el mayor drenaje del acuífero, con el 34% del total de las salidas ( $122,9 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), se verifica en la zona de marjal por medio de los canales que lo atraviesan (27%), así como de las surgencias y *ullales* existentes en su entorno (7%). Los aportes al lago de La Albufera a través de su lecho son muy reducidos y apenas alcanzan el 4%, como también lo son las transferencias subterráneas al mar, cercanas al 6%. Dentro de este contexto, las extracciones por bombeo son moderadas y del orden del 15% de los recursos renovables. Esta circunstancia permite calificar a esta MASub como un acuífero estratégico capaz de soportar extracciones importantes con las que compensar los déficits hídricos generados durante los periodos secos.

## 6.2. Funcionamiento en situación de estrés hídrico (SEH). Régimen transitorio

Una vez calibrado y validado el modelo numérico en régimen transitorio, se determinó el balance hídrico global para la SEH (abril 2006-septiembre 2008), así como para sus 5 periodos de paso (Tabla 9). En el primero de ellos, y respecto a la media, se aprecia un descenso generalizado

de la superficie piezométrica, entre 8 y 1 m, en la mitad occidental del acuífero, mientras que en la mitad oriental es inferior a 1 m. La misma situación se repite en los pasos 3 y 5, sometidos a un mayor estrés hídrico por el incremento de las extracciones en los pozos de sequía. Por el contrario, durante los periodos de paso 2 y 4 en los que no hay extracciones por ser épocas más húmedas y de menor requerimiento hídrico, la superficie piezométrica de la mitad occidental del acuífero experimenta una cierta recuperación (casi 1 m en el entorno del río Magro) (Figura 19).

Sin embargo, los términos más afectados respecto al balance medio fueron las salidas a los ríos (Júcar y Verde) y a los canales de drenaje, cuyos caudales se redujeron de forma muy sensible en los periodos en los que se dieron las extracciones adicionales por sequía. Por otra parte, el manantial de Masalavés estuvo seco durante todo el periodo simulado.

Otro aspecto especialmente significativo es que se constataron inversiones del flujo subterráneo en las transferencias con los acuíferos colindantes condicionadas por la situación piezométrica. Al contrario de lo que sucede en régimen permanente, en el que el acuífero de la Sierra de las Agujas (MASub 080.149) obtiene recursos la Plana de Valencia Sur, durante la SEH es donante neto de recursos a ésta en todos los periodos de paso. En lo que atañe al Caroch Norte (MASub 080.145) y Sierra del Ave (MASub 080.144) se convierten en receptores de recursos de la Plana en los periodos 1 y 3 para el primer caso, y en los 2, 4 y 5 para el segundo (Tabla 9, valores en rojo).

De lo anterior se concluye que en la SEH la Plana de Valencia Sur dejó de ser receptora neta de recursos por transferencias laterales subterráneas, para pasar a tener un carácter ligeramente perdedor. Respecto a esto hay que resaltar que los periodos de paso 1 y 2 son los de menor recarga por infiltración, al ser la época más seca del periodo, siendo en el primero, además, en el que se realizaron considerables extracciones de aguas subterráneas para compensar el déficit de aguas superficiales. Como resultado, en ellos se produjo una variación negativa del almacenamiento y, por tanto, un consumo de reservas subterráneas de hasta  $33,7 \text{ hm}^3$  ( $35,1$  y  $8,6 \text{ hm}^3$ , respectivamente), que fue parcialmente compensado en los últimos tres periodos de paso, especialmente durante el paso 4 (sin bombeos de sequía), para quedar al final de

<b>Balance hídrico</b>	<b>Paso 1</b>	<b>Paso 2</b>	<b>Paso 3</b>	<b>Paso 4</b>	<b>Paso 5</b>	
<b>MASub 08.141 Plana Valencia Sur</b>	<b>15/04/2006</b>	<b>01/11/2006</b>	<b>01/05/2007</b>	<b>01/10/2007</b>	<b>01/03/2008</b>	<b>Total periodo</b>
<b>Período: 15/04/2006-30/09/2008</b>	<b>31/10/2006</b>	<b>30/04/2007</b>	<b>30/09/2007</b>	<b>29/02/2008</b>	<b>30/09/2008</b>	
<b>Entradas (hm<sup>3</sup>)</b>						
Infiltración (lluvia+retornos riego)	107,2	86,5	120,5	140,6	188,4	643,4
Transferencias laterales desde MASub	11,5	27,5	14,4	16,9	17,9	48,5 <sup>(1)</sup>
MASub Caroch Norte		(20,4)		(14,8)	(16,1)	
MASub Contienda	(1,1)	(1,2)	(0,6)	(0,3)	(1,4)	
MASub S. del Ave	(4,5)		(8,7)			
MASub S. de las Agujas	(5,9)	(5,9)	(5,1)	(1,8)	(0,4)	
Aportes de ríos	18,6	17,5	14,9	14,7	20,8	86,5
Río Albaida	(16,0)	(15,0)	(12,8)	(12,6)	(17,9)	
Río Sellent	(2,5)	(2,40)	(2,0)	(2,0)	(2,8)	
Río Magro	(0,1)	(0,1)	(0,1)	(0,1)	(0,1)	
<b>Aportaciones totales</b>	<b>137,3</b>	<b>131,5</b>	<b>149,8</b>	<b>172,2</b>	<b>227,1</b>	<b>778,4</b>
<b>Salidas (hm<sup>3</sup>)</b>						
Transferencias laterales hacia MASub	10,7	20,7	15,9	20,5	30,4	58,4 <sup>(2)</sup>
MASub Caroch Norte	(10,7)		(15,9)			
MASub S. del Ave		(20,7)		(20,5)	(30,4)	
Drenaje a ríos	22,3	32,9	22,9	42,6	45,1	165,9
Río Júcar	(10,1)	(17,2)	(11,1)	(23,2)	(23,7)	
Río Verde	(12,2)	(15,7)	(11,8)	(19,4)	(21,4)	
Manantial de Masalavés	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ullales Marjal	13,4	12,3	10,7	10,9	15,4	62,5
Canales de drenaje	41,6	35,0	37,5	42,7	59,4	216,1
Lago de La Albufera	6,2	5,2	5,3	5,2	8,1	30,1
Mar	9,8	8,6	9,2	10,2	14,0	51,7
Bombeos	58,4	25,5	46,8	21,4	52,3	204,4
<b>Salidas totales</b>	<b>162,4</b>	<b>140,2</b>	<b>148,3</b>	<b>153,5</b>	<b>224,7</b>	<b>789,1</b>
<b>Variación almacenamiento (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>- 25,1</b>	<b>- 8,6</b>	<b>+ 1,5</b>	<b>+ 18,9</b>	<b>+ 2,6</b>	<b>- 10,7</b>

(1) Compensado con volúmenes de salida (1) Compensated with output volumes

(2) Compensado con volúmenes de entrada (2) Compensated with input volumes

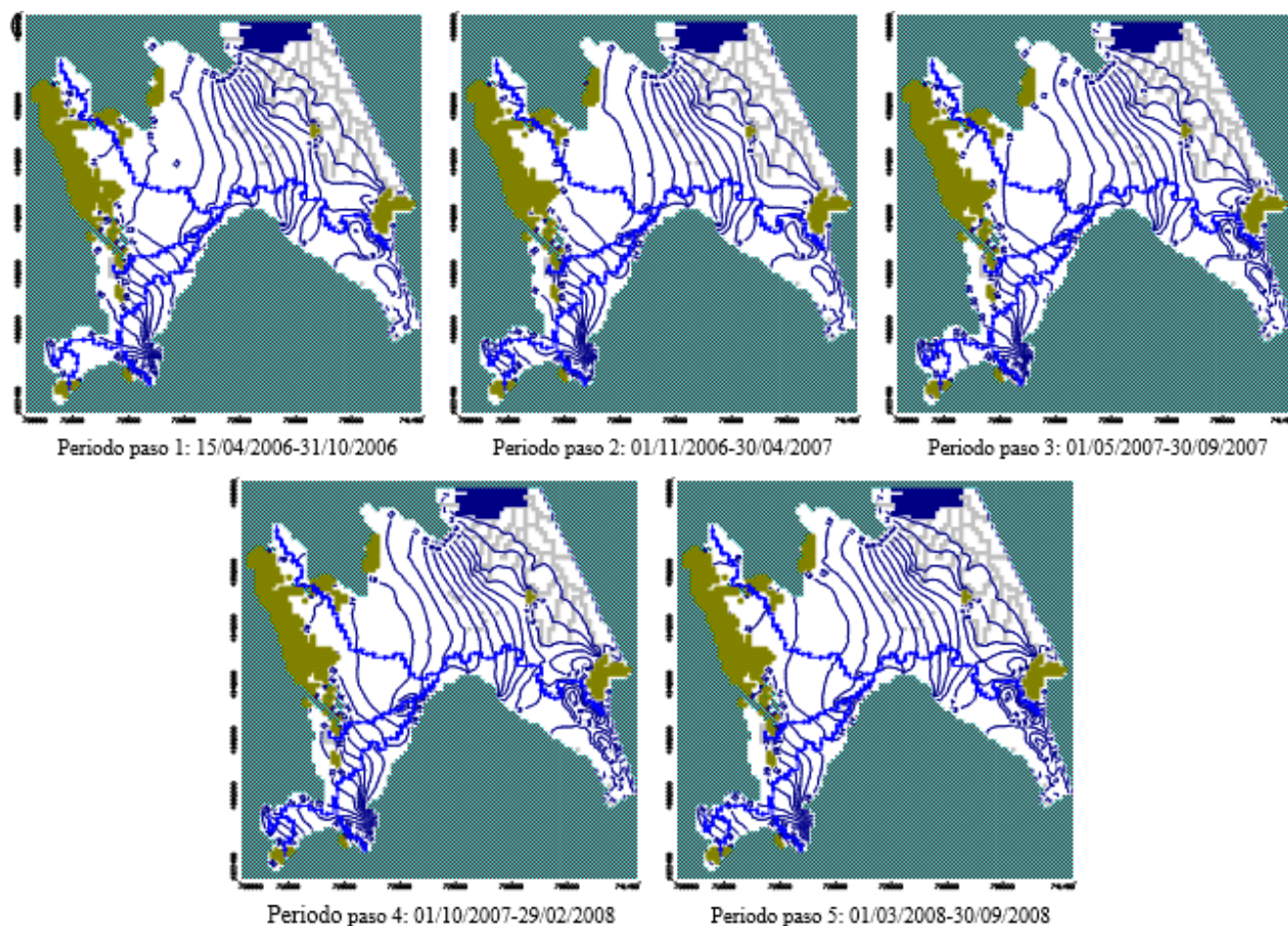
**Tabla 9.** Balance hídrico de la MASub 080.142 Plana de Valencia Sur. Régimen transitorio en SEH (abril 2006-septiembre 2008).**Table 9.** Water balance of the MASub 080.142 Plana de Valencia Sur. Transient flow in SEH (april 2006-septembre 2008).

la SEH (septiembre 2008) en sólo 10,7 hm<sup>3</sup>, aunque con clara tendencia a la recuperación.

### 6.3. Afecciones ambientales en SEH. Comportamiento del sistema

Uno de los principales problemas que plantea la explotación de las aguas subterráneas es la afección que pueda causar a los ecosistemas acuáticos relacionados con ellas, razón

por la cual sus posibles efectos deben de ser evaluados de forma muy precisa. Como ya ha sido comentado, el acuífero de la Plana de Valencia Sur está íntimamente relacionado con el río Júcar y su tributario, el río Verde, así como con el lago de La Albufera. Para establecer los efectos causados sobre estos ecosistemas durante la SEH todas las relaciones hídricas implicadas se han traducido a caudales en m<sup>3</sup>/día (Tabla 10).



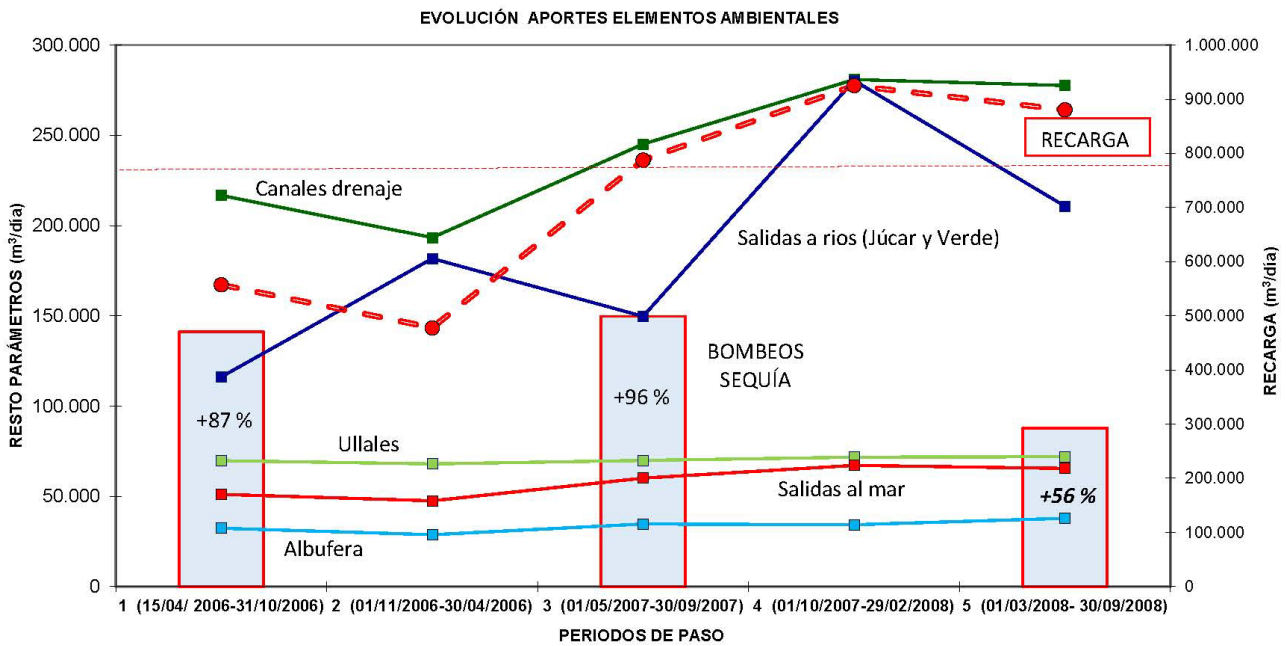
**Figura 19.** Superficies piezométricas de la Capa 1 en la simulación en régimen transitorio.

**Figure 19.** Water table for Layer 1 after the transient flow simulation.

<b>Régimen transitorio</b> <b>15/04/2006-30/09/2008</b> <b>(m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>Paso 1</b> <b>15/04/2006</b> <b>31/10/2006</b>	<b>Paso 2</b> <b>01/11/2006</b> <b>30/04/2007</b>	<b>Paso 3</b> <b>01/05/2007</b> <b>30/09/2007</b>	<b>Paso 4</b> <b>01/10/2007</b> <b>29/02/2008</b>	<b>Paso 5</b> <b>01/03/2008</b> <b>30/09/2008</b>	<b>Media</b> <b>total</b> <b>periodo</b>
Recarga (lluvia+retornos riego)	557.396	477.901	787.582	925.000	880.374	720.874
Salidas ríos Júcar y Verde	116.146	181.768	149.673	280.263	210.748	90.247
Canales de drenaje	216.667	193.370	245.098	280.921	277.570	242.377
Ullales	69.792	67.956	69.935	71.711	71.963	70.291
Lago Albufera	32.292	28.729	34.641	34.211	37.850	33.632
Aportes Parque Natural (totales)	318.750	290.055	349.673	386.842	387.383	185.874
Salidas al mar	51.042	47.514	60.131	67.105	65.421	58.072
Bombes sequía	141.146	-	149.673	-	87.850	123.077
<b>Var. almacenamiento (m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>-130.729</b>	<b>-47.512</b>	<b>9.804</b>	<b>124.342</b>	<b>12.150</b>	<b>-11.996</b>

**Tabla 10.** Relaciones hídricas de la MASub 080.142 Plana Valencia Sur con sus ecosistemas asociados (m<sup>3</sup>/día). Régimen transitorio en periodo SEH (abril 2006-septiembre 2008).

**Table 10.** Water relations of MASub 080.142 Plana Valencia Sur with its associated ecosystems (m<sup>3</sup>/day). Transitional regime in SEH period (April 2006-September 2008).



**Figura 20.** Aportes hídricos ambientales (m³/día) de la MASub 080.142 Plana Valencia Sur. Régimen transitorio en periodo SEH (abril 2006-septiembre 2008). En bombeos: % incremento de la explotación media.

**Figure 20.** Environmental water contributions (m³/day) in the MASub 080.142 Plana Valencia Sur. Transitory regime in the SEH period (April 2006-September 2008). In pumping: % increase in average exploitation.

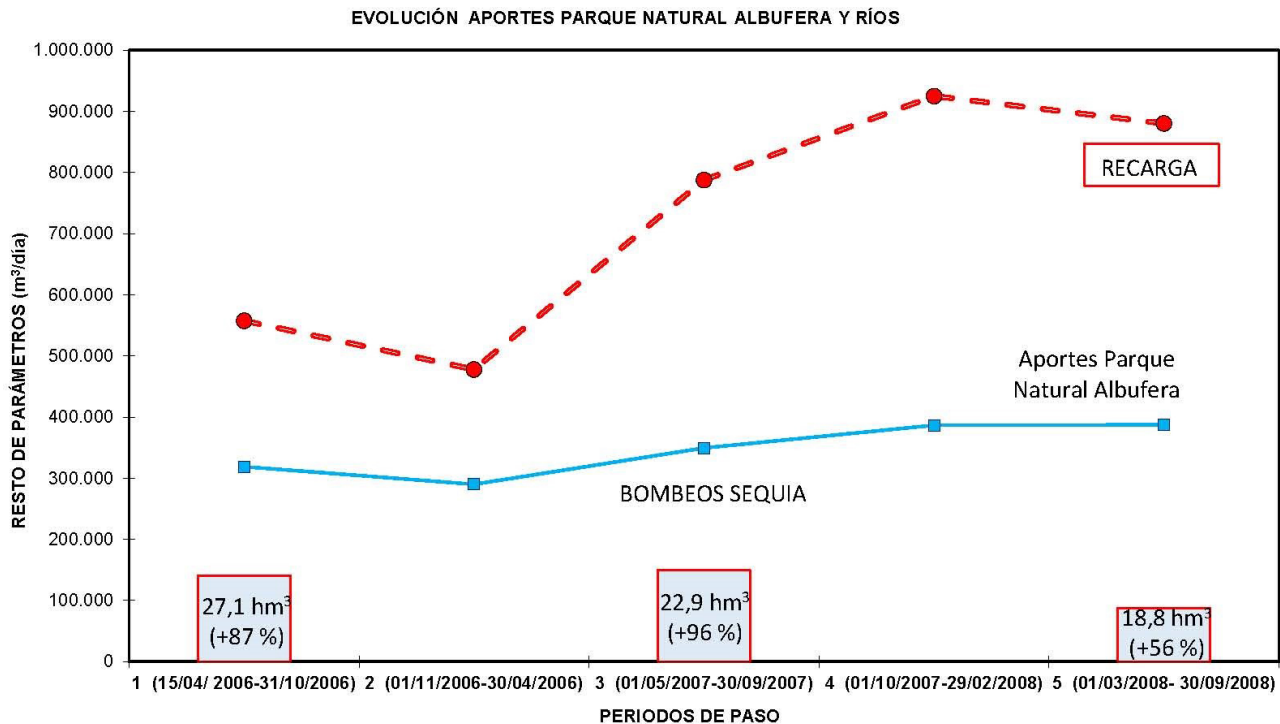
Del análisis comparado de los resultados se constata que el sistema está fuertemente controlado por la recarga (infiltración lluvia+retornos riego) y por el volumen de las extracciones. Dentro de este marco general de comportamiento, los elementos más vulnerables son, y por este orden, las salidas a los ríos y a los canales de drenaje. Esta afección es, sin embargo, diferente, ya que los ríos son afectados de forma muy directa por los bombeos, mientras que los canales de drenaje dependen más de la recarga general del sistema. El hecho se observa claramente en el periodo de paso 2, en el que a pesar de haber un menor volumen por infiltración los aportes a los ríos aumentan, mientras que por el contrario descienden en los canales de drenaje. También en los periodos de paso 3 y 5, con una mayor recarga, descienden los aportes a los ríos respecto a los periodos anteriores a causa de los bombeos, pero no así en los canales de drenaje (Figura 20). Como se puede apreciar, la evolución de la recarga del sistema y el caudal de los canales de drenaje es muy similar.

Por su parte, los ullales, las salidas directas a La Albufera y las salidas al mar apenas varían, y su comportamiento, al igual que los canales de drenaje, está especialmente influenciado por la recarga general del sistema.

En esta línea de razonamiento, y analizada la evolución de los aportes hídricos a los dos gran-

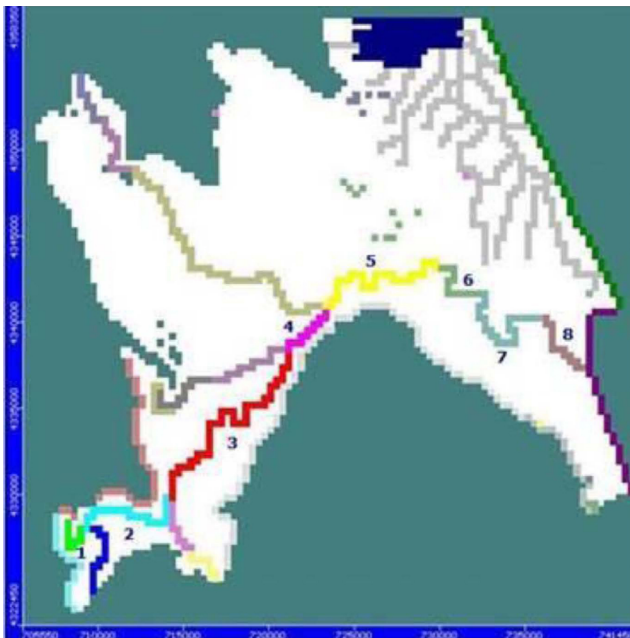
des ecosistemas relacionados con el acuífero, se observa que los que contribuyen al mantenimiento del Parque Natural de La Albufera (canales drenaje, ullales y salidas directas al lago) apenas se ven afectados por las explotaciones de sequía, mientras que son los ríos los que acusan, de forma casi exclusiva, el efecto de los bombeos (Figura 20). En concreto, los resultados arrojados por el modelo indican que durante la SEH, con un descenso del 7% de la recarga media y un incremento del 50% en las explotaciones, los aportes hídricos al Parque Natural de La Albufera se reducen en un 7%, mientras que en los ríos (Júcar y Verde) los caudales aportados por el acuífero lo hacen en un 40%.

Sin embargo, la afección sufrida por el río Júcar difiere a lo largo de su recorrido, ya que en unos lugares tiene carácter influente y, en otros, efluente. Por esta razón, y para su estudio detallado, se han establecido 8 tramos de control (Figura 22). En 3 de ellos (1, 2 y 6) el río cede agua al acuífero, mientras que en los restantes es el acuífero el que aporta agua al río. Este hecho se constata tanto para la media interanual (régimen permanente) como para cada uno de los periodos de paso simulados en la SEH, con una clara disminución de los aportes al río en aquéllos en los que se realizan extracciones por sequía (pasos 1, 3 y 5) (Figura 23). Se observa también que



**Figura 21.** Aportes hídricos de la MASub 080.142 Plana Valencia Sur al Parque Natural de La Albufera ( $\text{m}^3/\text{día}$ ). Régimen transitorio en SEH (abril 2006-septiembre 2008). En bombeos: % incremento sobre la explotación media.

**Figure 21.** Water contributions from MASub 080.142 Plana Valencia Sur to La Albufera Natural Park ( $\text{m}^3/\text{day}$ ). Transitory regime in the SEH (April 2006-September 2008). In pumping: % increase over average exploitation.



**Figura 22.** Tramos diferenciados en el río Júcar para el estudio de su relación hídrica con el acuífero de Plana de Valencia Sur.

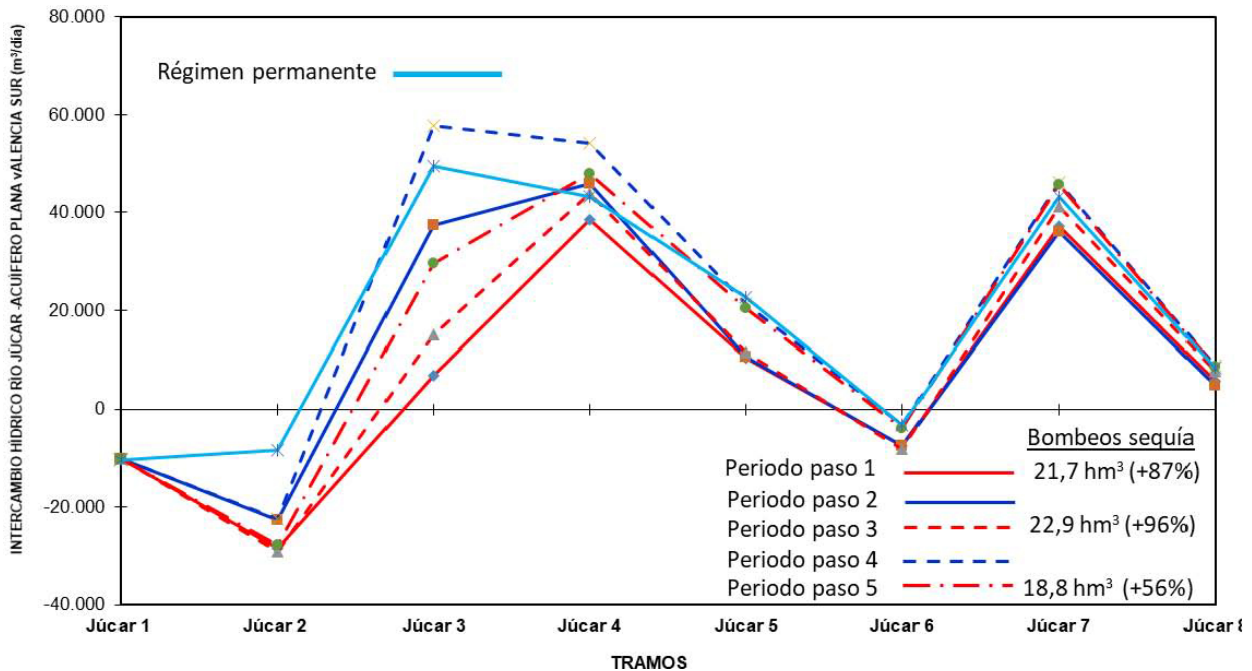
**Figure 22.** Differentiated sections in the Júcar river for the study of its water relationship with the Plana de Valencia Sur aquifer.

en los 4 tramos finales la afección al río se minimiza y pasa a ser prácticamente irrelevante.

Analizado de forma independiente el comportamiento de los diferentes tramos del Júcar en cada uno de los periodos de paso, destaca como el más intensamente afectado por los bombeos de sequía el cauce medio del río (tramo 3), con una evolución muy estrecha y directamente proporcional al volumen de las explotaciones. En este sentido, es especialmente significativo el tercer periodo de paso en el que la recarga del sistema se incrementa en un 39% ( $309.681 \text{ m}^3/\text{día}$ ), mientras que, por el contrario, los aportes al río se reducen en más de la mitad, en concreto en un 60% ( $22.451 \text{ m}^3/\text{día}$ ). Lo mismo sucede en el último periodo de paso, aunque de forma más atenuada (Figura 24).

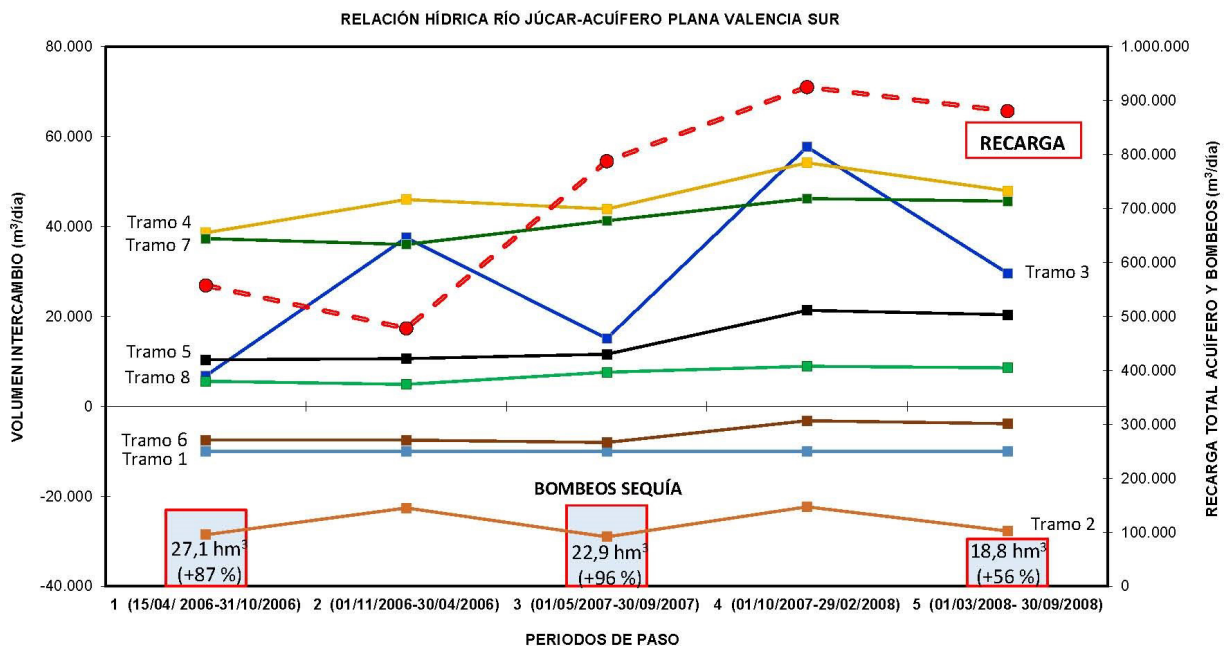
## 7. Conclusiones

Con la información disponible se ha podido ajustar y calibrar en régimen permanente y transitorio un modelo numérico de flujo subterráneo de la MASub 080.142 Plana de Valencia Sur cuyos resultados ofrecen una gran robustez, así como una elevada fiabilidad y solvencia. En este



**Figura 23.** Intercambio hídrico entre el acuífero de Plana de Valencia Sur y el río Júcar a lo largo de su cauce. Valores positivos: aportes al río.

**Figure 23.** Water exchange between the Plana de Valencia Sur aquifer and Júcar river along its channel. Positive values: contributions to the river.



**Figura 24.** Comportamiento de Intercambio hídrico entre el río Júcar y el acuífero de Plana de Valencia Sur. Valores positivos: aportes al río.

**Figure 24.** Water exchange between the Júcar river and the Plana de Valencia Sur aquifer. Positive values: contributions to the river.

aspecto, el modelo numérico es perfectamente coherente con el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico previamente establecido, si bien ha sido necesario plantear algunas modi-

ficaciones, que han permitido su mejora mediante retroalimentación.

Durante la situación de estrés hídrico (SEH) los volúmenes excepcional y ocasionalmente ex-

Periodo paso	Diferencia respecto al valor medio anual (%)					
	Bombeos sequía	Recarga	Río Júcar	Conjunto ríos	P. Natural Albufera	Mar
1	+ 87 (27,1 hm <sup>3</sup> )	- 28	- 64	- 62	- 14	- 16
2	-	- 39	- 34	- 41	- 22	- 22
3	+ 96 (22,9 hm <sup>3</sup> )	+ 1	- 50	- 52	- 6	- 1
4	-	+ 19	+ 5	- 9	+ 4	+ 10
5	+ 56 (18,8 hm <sup>3</sup> )	+ 13	- 24	- 32	+ 4	+ 8

**Tabla 11.** Variación de la recarga y de los aportes hídricos de la MASub 080.142 Plana Valencia Sur respecto a la media anual (%). Régimen transitorio en periodo SEH (abril 2006-septiembre 2008).

**Table 11.** Variation of recharge and water inputs of the MASub 080.142 Plana Valencia Sur related to the annual average (%). Transitional regime in SEH period (April 2006-September 2008).

traídos por sequía correspondieron al 7,5% de los recursos renovables del acuífero, lo que supuso incrementar del 15,5% al 23% su explotación. De los resultados obtenidos resalta el hecho de que sólo en los dos primeros periodos de paso simulados de la SEH, coincidentes con la menor precipitación y por tanto también con la menor recarga, se generó un consumo de reservas del sistema (33,7 hm<sup>3</sup>). En los siguientes periodos se apreció una sensible mejora, aunque no total, traducida en un incremento del almacenamiento en 23 hm<sup>3</sup>, con una clara tendencia a la recuperación, por lo que finalmente sólo se redujo en 10,7 hm<sup>3</sup>, equivalente al 2,8% de sus recursos renovables.

A pesar de que durante los últimos periodos de paso las precipitaciones fueron mayores, no se consiguió la recuperación del manantial de Masalavés, ya que su funcionamiento está vinculado a la MASub 080.144 Sierra del Ave, de la que constituye su principal punto de drenaje, y, por tanto y en la práctica, con una relación indirecta con el acuífero de la Plana.

Los resultados indican que la mayor afección sufrida por el acuífero se debe a la disminución de la infiltración a través del terreno por la escasez de las precipitaciones, con su máximo exponente en el periodo de paso 2 que fue del 39% del valor medio anual (Tabla 11).

En los elementos ambientales asociados se constata que durante la SEH los más afectados son los ríos que transitan por el sistema hidrogeológico, con una disminución de aportes entre el 32% y el 62% respecto a su valor medio anual en los periodos con bombeos adicionales, pero con un descenso del 41% en el segundo periodo de paso en el que no los hay. En el río Júcar, especialmente en su curso medio (tramo 3), existe una estrecha relación entre las extracciones de sequía y los aportes del acuífero a su cauce, lo que se

traduce en una disminución de estos últimos en un 64% y en un 50% para los periodos de paso primero y tercero, respectivamente.

Respecto al conjunto marjal-lago (Parque Natural), los aportes disminuyen en los 3 primeros periodos, 14%, 22% y 6%, respectivamente. Es de reseñar su acusado descenso en el segundo, sin incremento de las extracciones, pero con una tasa de recarga muy baja, lo que reafirma la gran dependencia del sistema hidrogeológico de este último concepto. También es de resaltar que el Parque Natural prácticamente recupera su situación habitual al final del total del periodo modelado, con aportes un 4% superiores a la media anual, lo que pone de manifiesto la escasa repercusión que sobre él tuvieron las explotaciones de sequía.

Por otra parte, en las salidas al mar se da un proceso similar y tampoco se ven muy afectadas por los bombeos de sequía, con descensos del 16% y del 1%, para el primer y tercer periodo, y del 22% en el segundo, con recuperación muy clara en los dos últimos. Este hecho puede explicar la ausencia de procesos de salinización significativos en el acuífero durante la SEH.

De forma global, se aprecia la práctica recuperación del acuífero en apenas año y medio después de los episodios temporales más secos, si bien en el último de ellos las salidas a los ríos Júcar y Verde, un 32% inferiores a la media anual, acusan el efecto de los bombeos de sequía.

Como conclusión general, y por los argumentos expuestos, la simulación realizada indica que la repercusión sobre el ecosistema que configura el Parque Natural de La Albufera de Valencia debida a la explotación adicional realizada en el acuífero de la Plana de Valencia Sur de manera ocasional durante el periodo seco, ha sido mínima y prácticamente inapreciable. En el río Júcar, sin embargo, sí se aprecia la influencia de estos



bombes de una forma bastante inmediata y directa, aunque también se observa su rápida recuperación una vez cesadas las extracciones.

En consecuencia, desde punto de vista de la planificación hidrológica y de la gestión de los recursos hídricos, es oportuno decir que la MASb de la Plana de Valencia Sur, por sus especiales características hidrogeológicas, presenta un gran interés como acuífero estratégico y sus recursos pueden ser utilizados durante las épocas de estrés hídrico para paliar los déficits hídricos generados en estas situaciones, con la especial recomendación de que las explotaciones coyunturales se realicen, dentro de lo posible, en áreas alejadas de los cursos fluviales con el fin de mitigar su influencia sobre ellos.

### Agradecimientos

Al IGME y la CHJ por promover los trabajos que han hecho posible este artículo, así como por la información aportada. A la empresa TYP-SA, colaboradora en las diversas fases de los mismos, con especial mención a los técnicos de los departamentos de Medio Ambiente, Hidráulica y Geotecnia, y a las empresas TEYGE y TRT por su contribución al desarrollo del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico.

### Referencias

- Ballesteros Navarro, B. J., and Navarro Odriozola, J. O. (2016). Modelo numérico del acuífero Plana de Valencia Sur (Valencia-España). Determinación de su comportamiento hidrodinámico en situación de estrés hídrico y valoración medioambiental. Las aguas subterráneas y la planificación hidrológica. Congreso Hispano-Luso. AIH-GE, Madrid, 227-236.
- IGME (1981). Puesta a punto del modelo matemático realizado en 1974 para la Plana de Valencia. Informe inédito. Centro de Documentación del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- IGME (2012). Uso sostenible de las masas de agua subterránea en épocas de sequía. Aplicación a la cuenca baja del río Júcar. Modelo numérico de la Plana de Valencia Sur. Tomo 3. Informe inédito. Centro de Documentación del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- IGME-CHJ (2006). Comportamiento de los acuíferos ante actuaciones de sequía para uso agrícola en la cuenca del Júcar. Informe final de la campaña de riego. Año 2006. Memoria y Anexos. Informe inédito. Centro de Documentación del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 178 pp.
- IGME-CHJ (2007). Comportamiento de los acuíferos ante las actuaciones de sequía en los sistemas de explotación Júcar y Turia. Informe final. Campaña de 2007. Memoria y Anexos. Informe inédito. Centro de Documentación del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 196 pp.
- IGME-CHJ (2008). Uso sostenible de las masas de agua subterránea en el sistema de explotación Júcar en situaciones de sequía. Informe final. Campaña de 2008. Memoria y Anexos. Informe inédito. Centro de Documentación del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 187 pp.
- IGME-IRYDA (1977). Hidrogeología del Sistema Nº 51 Plana de Valencia. Informe técnico VIII. Investigación hidrogeológica de la Cuenca media y Baja del Júcar. Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas. Informe inédito. Centro de Documentación del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Johnson, A. I. (1967). Specific yield-compilation of specific yields for various materials. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 1662-D, 1-74.
- McDonald, M. G., and Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 6, Modeling Techniques, Denver, 586 pp.
- Pérez, M. A. (2005). Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica, para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva marco del Agua. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 387 pp.
- Younger, P. L. (1993). Simple Generalized Methods for estimating aquifer storage parameters. Quarterly Journal of Engineering Geology, 26, 127-135.
- Sahuquillo Herráiz, A., Capilla, J. E., and Ramos Ramis, F. (1997). Estimación de recargas y salidas en el acuífero de la Plana de Valencia Sur. La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Custodio, Llamas y Samper (eds.) Ministerio de Ciencia y Tecnología, Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid, 292-6, 429-436.
- Vera, J. A. (ed.) (2004). Geología de España. SGE-IGME, Madrid, 890 pp.
- Waterloo Hydrogeologic (2015). Visual MODFLOW 2011.1. User's Manual. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Ontario, 713 pp.

