

# Zonas húmedas mediterráneas y acuíferos asociados. Condicionantes hidrogeológicos del Marjal de Pegó-Oliva (Alicante-Valencia)

B. J. Ballesteros Navarro, J. A. Domínguez Sánchez, E. Díaz-Losada y O. García Menéndez

Instituto Geológico y Minero de España. C/Cirilo Amorós, 42. 46004. Valencia, España  
b.ballesteros@igme.es, ja.dominguez@igme.es, el.diaz@igme.es, o.garcia@igme.es

## RESUMEN

El marjal de Pegó-Oliva, incluido en la Convención de Ramsar como humedal de interés internacional, constituye un ecosistema acuático litoral típico del Mediterráneo Occidental. En la actualidad es un paraje natural protegido compatible con ciertas prácticas agrícolas tradicionales, como el cultivo de arroz, que presenta una íntima relación con las aguas subterráneas procedentes de sus acuíferos asociados laterales, de tipo kárstico, y de su acuífero basal, de naturaleza detrítica. La confluencia de distintos factores naturales y antrópicos hace que dichos acuíferos se encuentren afectados por diferentes procesos de salinización, lo que supone la existencia de una hidrodinámica compleja. Para intentar establecer el funcionamiento hidrológico del sistema y las interrelaciones hídricas entre los elementos que lo integran, la primera de las herramientas utilizadas ha sido la realización de perforaciones a testigo continuo con objeto de definir la geometría de las facies sedimentarias del acuífero detrítico basal. Posteriormente, se han determinado las cargas hidráulicas y las facies hidroquímicas asociadas a los diferentes cuerpos permeables, en los que se han identificado procesos de intrusión marina generados por causas antrópicas. También se ha detectado la presencia de salinización de carácter natural y fenómenos de termalismo ligados a los manantiales de los acuíferos kársticos. Todo esto aporta información de interés sobre el comportamiento del flujo subterráneo y sobre los distintos factores que intervienen en la formación y funcionamiento de las zonas húmedas litorales. Dadas las particulares características de este paraje natural, que hacen especialmente visibles algunos procesos hídricos, los resultados obtenidos pueden ser muy útiles para afrontar la definición del modelo conceptual de funcionamiento de otros ecosistemas litorales similares de la cuenca mediterránea.

Palabras clave: acuíferos asociados, hidrogeología, intrusión marina, Pegó-Oliva, zonas húmedas

## ***Mediterranean wetland and associated aquifers. Hydrogeology of Pegó-Oliva Natural Park (Alicante-Valencia, Spain)***

### ABSTRACT

*The Pegó-Oliva marshland, which was included in the Ramsar Convention (1971) as one wetland of international interest, constitutes a typical coastal aquatic ecosystem of the Western Mediterranean Sea. Currently, it is a Nature Reserve which coexists with traditional agricultural practises, like rice crop. It has a close relationship with groundwater systems. Thus, it receives discharges from lateral karstic aquifers and from a basal detritic one. Several factors of both natural and anthropogenic origin cause that such aquifers are affected to a certain extent by salinization processes. This fact implies the existence of complex hydrodynamic processes within the hydrological system and implies the necessity of a deep knowledge of each permeable formation, and its interactions with the sea and the wetland itself for a good understanding of the whole system. In this sense, the first tool used has been the stratigraphic and tectosedimentary study of the area by means of drilling several boreholes with collection of the core. As a result, the geometry of the sedimentary facies has been defined. Furthermore, the hydraulic head and hydrochemical facies of each permeable formation were determined as well as their hydraulic relationship, and the identification of sea water intrusion processes due to anthropogenic factors was done. However, an outstanding matter has been shown: the origin of this salinization is not only human but natural too. Besides that, the Chalk aquifer's springs that contribute to the marshland water resources show thermal phenomenon. All of this provides relevant information about groundwater flow and the different factors that act in coastal wetland areas and the principal causes of its formation and conservation. Given that in Pegó-Oliva marshland come together very particular circumstances the final outcomes could be very useful to face the design of conceptual models for other coastal ecosystems in the Mediterranean basin.*

*Key words: associated aquifers, hydrogeology, marine intrusion, Pegó-Oliva, wetlands*

## **Introducción**

El litoral mediterráneo español cuenta con un importante número y variedad de zonas palustres y lacus-

tres, entre las que figura el marjal de Pegó-Oliva. Este humedal reúne unas características similares a otros del Mediterráneo Occidental, y configura en muchos aspectos un ejemplo clásico de ecosistema acuático

litoral. Aunque con algunos elementos diferenciadores, en él tienen lugar procesos que pueden ser especialmente visualizados y que rompen con la imagen de un funcionamiento sencillo y fácil de ser explicado para este tipo de sistemas. Un análisis detallado muestra, de hecho, la gran complejidad que pueden alcanzar.

La zona húmeda, localizada geográficamente en el límite entre las provincias de Valencia y Alicante, se asienta sobre una pequeña llanura litoral en forma de cuña abierta al Mediterráneo por el este, que está flanqueada por las sierras de Mustalla al norte y Segaria al sur (fig. 1). Se trata de una antigua albufera, separada del mar por una barra arenosa o restinga de nueve kilómetros de longitud, que presenta un avanzado proceso de colmatación y espejos de agua

de varios decímetros de profundidad, normalmente inferior al medio metro. En su entorno se ubican, además, algunas balsas de agua o *ullales* asociadas a surgencias subterráneas. Aunque tiene relación hídrica con el acuífero detrítico sobre el que se asienta, la mayor parte de sus recursos proceden de los ríos de régimen permanente Bullent o Bullens y Racons, que, análoga y respectivamente, limitan el marjal por su borde septentrional y meridional. El caudal de estos ríos se genera a partir de las descargas de los acuíferos kársticos próximos, por lo que este paraje natural presenta una total dependencia de los recursos hídricos subterráneos.

El marjal de Pego-Oliva es uno de los espacios naturales de la Comunidad Valenciana incluidos en la lista del Convenio de Ramsar (1971), y constituye un

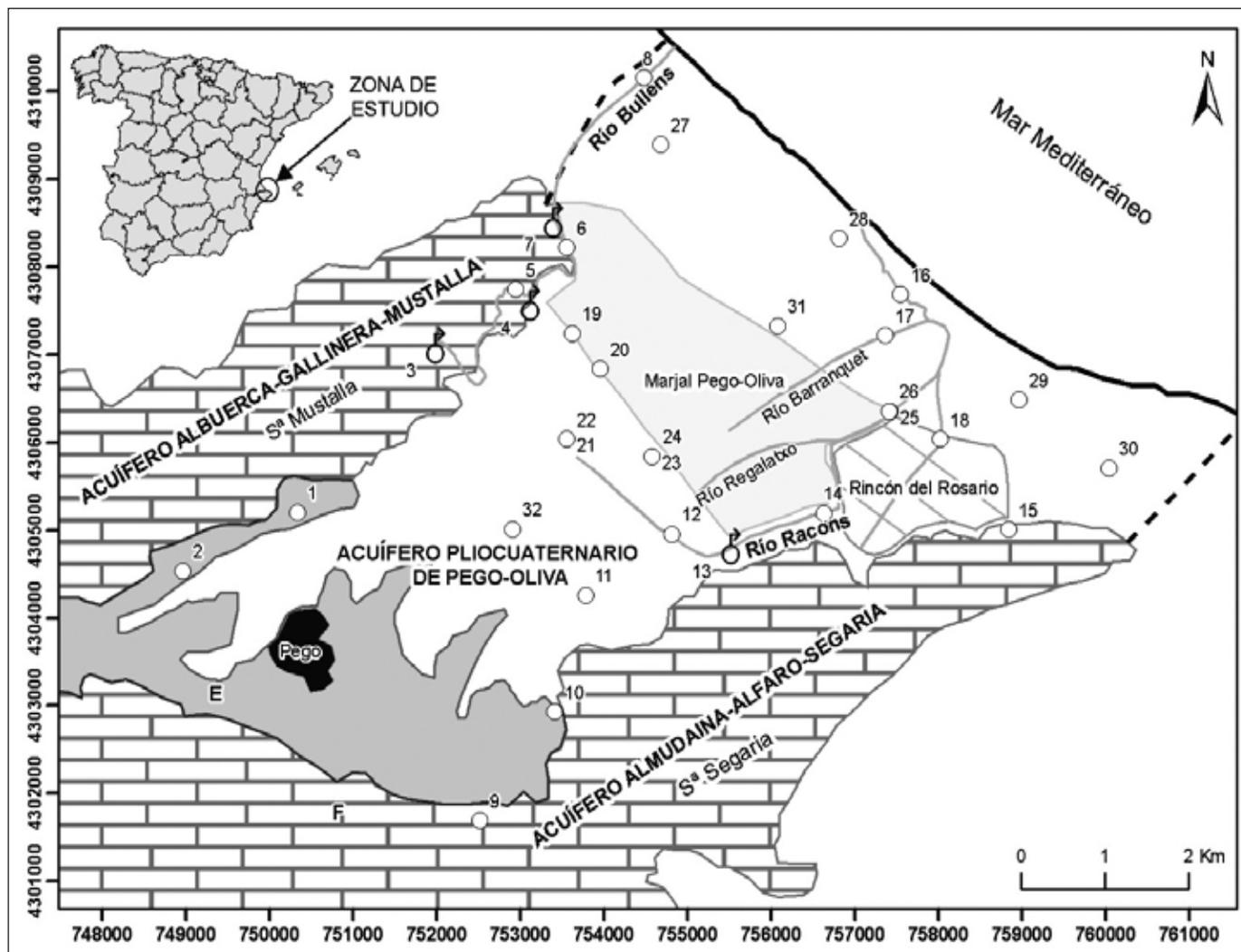


Figura 1. Localización de la zona de estudio y de los puntos de control  
 Figure 1. Location of the study area and control points

buen ejemplo en lo que a confluencia de intereses encontrados se refiere, pues como ecosistema regulador de regímenes hidrológicos y poseedor de recursos de indudable valor, tanto culturales, económicos y científicos, como recreativos, sus labores de utilización y conservación adquieren una complejidad considerable (Fornés *et al.*, 2008). El nuevo enfoque social a favor de la preservación de los espacios naturales ha propiciado importantes cambios en su uso y gestión. Así, se ha pasado de su Declaración de Utilidad Pública (Decreto Ley 1068/1970, de 21 de marzo), que hizo que se emprendieran trabajos para su desecación, a su inclusión en el Convenio de Ramsar el 4 de noviembre de 1994. La trayectoria de protección culmina el 27 de diciembre de 1994 con su declaración como Parque Natural por la Generalitat Valenciana, con una extensión de 1.253 ha. Sin embargo, a pesar del régimen de protección que le otorga la ley, en los últimos años han aflorado intereses contrapuestos entre los usuarios tradicionales del marjal y la filosofía de protección desarrollada (Domenech, 2003). La gran fragilidad de los ecosistemas asociados a los humedales, muy sensibles a cualquier mal uso o actuación inadecuada, es una de las causas por las que se generan y agudizan los problemas al provocarse alteraciones muy rápidas en su dinámica natural.

La intervención humana en el marjal de Pego-Oliva ha adquirido a lo largo de su historia, y adquiere todavía en la actualidad, una gran relevancia, siendo un hecho muy común a la totalidad de los humedales mediterráneos. Esta comienza a principios del siglo XVIII, con la construcción de algunas acequias de desagüe, si bien, la implantación del cultivo del arroz ocurre en 1848, y en 1886 se alcanzan las 330 ha (Ballesteros *et al.*, 2003). Gracias al apoyo que proporcionaba la Ley Cambó de 1918 se llega al máximo esplendor del cultivo del arroz en 1950, con una superficie superior a las 1.000 ha (Obartí, 2003), extensión reducida hasta las 350 ha en la siguiente década. Fue en este periodo cuando se realizó el sistema ortogonal de acequias de regadío y la construcción de la canalización del río Bullent para la evacuación directa de sus aguas al mar (Fornés *et al.*, 2008), lo que distorsionó el efecto que ejercía el humedal como colector natural de las descargas procedentes de los acuíferos carbonatados laterales. Estas obras se completaron con la construcción de una serie de compuertas, que en la actualidad controlan el nivel de las aguas en los canales de riego-drenaje y derivan las procedentes de los ríos para la inundación periódica de los campos de arroz. Independientemente de lo anterior, en el sector suroriental se localiza la explotación citrícola de la finca Oriol o Rincón del

Rosario (fig. 1), de unas 200 ha de extensión, donde se realiza la desecación del terreno mediante drenes de tipo *polder* y un sistema automatizado de bombeo que mantiene constante el nivel freático a cotas inferiores a la del nivel del mar. Los caudales extraídos son evacuados directamente al mar a través del río Racons.

### Geomorfología e hidrología del humedal

La formación y existencia del marjal de Pego-Oliva está íntimamente condicionada por los agentes hidrogeológicos. Desde el punto de vista del origen de sus recursos hídricos se encuentra dentro de los catalogados como humedales litorales septentrionales valencianos, que se caracterizan por su dependencia de las aguas subterráneas, tanto en lo que se refiere a su origen y formación como a su mantenimiento y conservación (Ballesteros, 2003). En cuanto a los aspectos más netamente geomorfológicos, se trata de un sistema de restinga-albufera que rellena una depresión tectónica litoral rodeada por macizos rocosos. En consecuencia, corresponde a un medio sedimentario de transición con predominio de los procesos de acumulación favorecidos por fenómenos de subsidencia, y donde la interpretación genética de los depósitos resulta en ocasiones compleja al estar influenciados por ambientes erosivo-sedimentarios contrapuestos: el continental y el marino (Ballesteros y Domínguez, 2007; Viñals, 1996).

Como se ha comentado, los principales elementos de alimentación de la zona húmeda son los cursos de agua permanente de los ríos Bullent y Racons, aunque también contribuyen a ésta la precipitación directa del agua de lluvia y los aportes hídricos del acuífero infrayacente sobre el que se asienta. Dichos ríos se forman de las aguas aportadas, de manera difusa y puntual, por dos acuíferos kársticos asociados laterales: Albuerca-Gallinera-Mustalla y Almudaina-Alfaro-Segaria. En concreto, el Bullent recibe recursos del primero de ellos a través de los manantiales de Las Aguas, Solinar y Font Salada, mientras que el cauce del Racons lo hace del manantial de Balsa Sineu que drena al segundo. Por otro lado, estos mismos ríos sirven, a su vez, en su tramo final, como mecanismo de drenaje del marjal hacia el mar. Lo hacen tanto de forma natural, por gravedad, como mediante rebombes practicados en su extremo suroriental cuando lo requiere el cultivo del arroz. En este último aspecto, conviene resaltar la importancia que adquieren las derivaciones de estos cauces para la periódica inundación de los campos, controlados mediante compuertas que regulan los flujos y el nivel de sus aguas.

En régimen natural los caudales, estimados por Obartí (2003) en 54 hm<sup>3</sup>/a, confluían en el marjal que hacía las funciones de colector.

Tal y como se ha hecho referencia, la zona húmeda se encuentra notablemente influenciada en la calidad de sus aguas y en su funcionamiento hidrológico por factores de orden natural y antrópico. Estos últimos contemplan modificaciones muy significativas que han alterado totalmente la hidrodinámica e hidroquímica del sistema. Entre las más relevantes se encuentra, como ya se ha comentado, la desecación y drenaje de la finca agrícola Oriol que mantiene el nivel piezométrico por debajo del nivel del mar, lo que se traduce en procesos de intrusión marina en el acuífero subyacente (Ballesteros, 2003; Fornés *et al.*, 2008).

Por otra parte, entre los factores naturales que contribuyen a la complejidad del sistema, destaca la existencia de aguas de salinidad variable en las surgencias que drenan los acuíferos kársticos asociados. Estos manantiales, situados a una distancia de la costa entre 1,5 y 4,4 km, presentan cotas de alumbramiento entre 0,5 y 1,9 m s.n.m. con una temperatura y mineralización crecientes en dirección a la costa (Domínguez y Ballesteros, 2008).

### Marco hidrogeológico

La zona húmeda propiamente dicha se asienta sobre sedimentos recientes que conforman su acuífero asociado basal, al cual se ha denominado Pliocuaternario de Pego-Oliva (PPO). Existen además dos importantes unidades hidrogeológicas de carácter carbonatado que actúan como acuíferos asociados laterales: Albuerca-Gallinera-Mustalla (AGM) por el norte y el de Almudaina-Alfaro-Segaria (AAS) por el sur. Ambas presentan continuidad geológica bajo el pliocuaternario de Pego-Oliva y constituyen, entonces, el denominado acuífero Mesozoico de Pego (MP).

El acuífero Almudaina-Alfaro-Segaria conforma un sistema kárstico de 190 km<sup>2</sup> de extensión, donde el flujo subterráneo se establece en sentido OSO-ENE, paralelo a la alineación tectónica de los relieves que lo forman. Estudios recientes, fijan sus recursos renovables en 37,43 hm<sup>3</sup>/a (DPA, 2007), las transferencias laterales al Pliocuaternario de Pego-Oliva en 23,27 hm<sup>3</sup>/a, las salidas al río Racons en 10 hm<sup>3</sup>/a y los bombeos de la finca Oriol en 16,5 hm<sup>3</sup>/a (Ballesteros *et al.*, 2007).

También de forma alargada y con la misma alineación y sentido del flujo subterráneo, el acuífero de Albuerca-Gallinera-Mustalla tiene una extensión de 165 km<sup>2</sup>. Las últimas investigaciones (Ballesteros *et al.*, 2007) establecen en 42,3 hm<sup>3</sup>/a los aportes al río

Bullent y en 6,8 hm<sup>3</sup>/a las transferencias al acuífero Pliocuaternario de Pego-Oliva.

Por su parte, el acuífero sobre el que se asienta el marjal, el Pliocuaternario de Pego-Oliva, integra un sistema litoral de tipo multicapa y permeabilidad por porosidad intergranular, dispuesto sobre un impermeable de base integrado por margas miocenas o por margas con yesos del Trías Keuper, sin embargo, en ciertos sectores la base del acuífero está formada por los materiales permeables carbonatados del acuífero Mesozoico de Pego (MP). Aunque su balance hídrico se encuentra todavía en fase de discusión y estudio, los datos con los que se cuenta hasta ahora (Ballesteros *et al.*, 2007) indican que su alimentación tiene lugar, además de por infiltración directa de agua de lluvia (11,8 hm<sup>3</sup>/a), por aportes laterales de los acuíferos carbonatados contiguos (30,1 hm<sup>3</sup>/a), por intrusión marina (9,2 hm<sup>3</sup>/a) y, en menor medida, por retornos de riego (2,3 hm<sup>3</sup>/a). Sus principales salidas corresponden al drenaje ejercido por el río Racons (39,4 hm<sup>3</sup>/a), surgencias naturales o ullales que alimentan al marjal (1,5 hm<sup>3</sup>/a), extracciones por bombeo (1,8 hm<sup>3</sup>/a) y drenaje de la finca Oriol (9,6 hm<sup>3</sup>/a).

### Litología y geometría de las formaciones geológicas del substrato

Para determinar las relaciones litoestratigráficas y la configuración tectosedimentaria de la zona, el IGME realizó siete perforaciones a testigo continuo (PDGEST-1 a 7) con profundidades comprendidas entre los 15 y los 130 m (tabla y fig. 1). Posteriormente, se procedió a la ejecución de sondeos de mayor diámetro con el objeto de captar y caracterizar hidrodinámicamente los diferentes tramos permeables atravesados. A partir de las columnas litológicas de éstas y otras perforaciones de la zona (SGOP, 1985; MOPTMA, 1995), así como de información procedente de sondeos eléctricos verticales (Universidad de Granada, 1986), tomografía eléctrica y sondeos electromagnéticos (DPA, 2005), se ha determinado la configuración del substrato geológico del marjal.

### Identificación, definición y disposición de tramos permeables. Interpretación tectónica

La investigación realizada ha permitido diferenciar cuatro conjuntos litoestratigráficas permeables bajo la zona húmeda, tres pertenecientes al Pliocuaternario (acuífero PPO) y otro, situado bajo los anteriores, de edad cretácica (acuífero MP). Sus características litológico-estructurales básicas, descri-

REF.	Nº IGME	TOPONIMIA	ACUÍFERO	UTM X	UTM Y	COTA Z	REF.	Nº IGME	TOPONIMIA	ACUÍFERO	UTM X	UTM Y	COTA Z
			Y TRAMO							Y TRAMO			
1	3031-5-19		AGM	750330	4305200	50	17	E-23	Rio Barranquet (*)	PPO	757365	4307215	1
2	3031-5-35	San José	AGM	748955	4304530	68	18	3031-6-94	Rincon del Rosario (**)	AAS / PPO	758022	4306032	-0,82
3	3031-6-4	Fte. Las Aguas	AGM	751987	4307107	2,84	19	3031-6-144	Ullal de Macareno	PPO (AS-MI)	753620	4307237	0,84
4	3031-6-3	Fte. Solinar	AGM	753122	4307590	1,01	20	3031-6-90	Ullal de Bullent	PPO (AS-MI)	753948	4306833	0,92
5	-	R.Bullent-Molino (*)	AGM	752940	4307740	1,8	21	3031-6-115	PDGEST-5a	MP	753550	4306038	3,45
6	-	R.Bullent-S. Pere (*)	AGM	753552	4308216	1,16	22	3031-6-116	PDGEST-5b	PPO (MI)	753552	4306034	3,42
7	3031-6-1	Fte. Salada	AGM	753399	4308535	0,49	23	3031-6-117	PDGEST-6b	PPO (CB)	754575	4305837	0,74
8	E21	Rio Bullent (*)	AGM	754480	4310150	0,1	24	3031-6-118	PDGEST-6c	PPO (AS)	754576	4305836	0,67
9	3032-2-48		AAS	752510	4301685	105	25	3031-6-120	PDGEST-7b	PPO (AS)	757417	4306350	1,02
10	3031-6-33	Motor Tarco	AAS	753412	4302927	46	26	3031-6-119	PDGEST-7a	PPO (MI)	757414	4306352	1,05
11	3031-6-99	Les Mondes	AAS	753779	4304257	14,42	27	3031-6-113	PDGEST-1	PPO (AS-MI)	754672	4309389	1,36
12	-	R. Racons-Cabeçol (*)	AAS	754810	4304950	4,5	28	3031-6-114	PDGEST-2	PPO (AS-MI)	756812	4308319	1,38
13	3031-6-2	Balsa Sineu	AAS	755525	4304812	2,38	29	3031-7-107	PDGEST-3	PPO (AS-MI)	758966	4306480	2,06
14	-	R. Racons-Limite (*)	AAS	756630	4305190	2,5	30	3031-7-108	PDGEST-4	PPO (MI)	760040	4305706	3,66
15	3031-7-105	Calpero-1	AAS	758838	4305003	5,05	31	3031-6-121	SGOP P-7	PPO (AS-MI)	756081	4307323	1,87
16	E-22	Rio Racons (*)	AAS	757550	4307680	0,2	32	3031-6-86	Plana	PPO	752904	4305009	11,96

(\*) Curso superficial (\*\*) Drenaje

Tabla 1. Manantiales y sondeos con asignación al acuífero de pertenencia. AGM: Albuera-Gallinera-Mustalla, AAS: Almudaina-Alfaro-Segaria, PPO: Pliocuaternal de Pego-Oliva (tramos AS: arenoso superficial, MI: multicapa intermedio, CB: conglomerado basal) y MP: acuífero mesozoico de Pego.

Table 1. Springs, boreholes and aquifers of Pego-Oliva marshland environment. AGM: Albuera-Gallinera-Mustalla, AAS: Almudaina-Alfaro-Segaria, PPO: Pliocuaternal of Pego-Oliva (stretch AS: superficial sandy, MI: multilayered intermediate, CB: basal conglomerate) y MP: Mesozoic of Pego

tas con mayor detalle por Ballesteros y Domínguez (2007), son las siguientes (fig. 2):

- *Tramo de arenas superficiales (AS)*: Presenta la relación hídrica más directa con el humedal. Consiste en un paquete de arenas finas de edad muy reciente que hacia el oeste queda cubierto por los depósitos de turba típicos de ambientes palustres y, finalmente, se interdigita con los materiales más groseros del glacis de Pego. Su espesor varía entre 7 y 20 m.
- *Conjunto multicapa intermedio (MI)*: Compuesto, básicamente, por limos y margas que configuran la base impermeable de las arenas suprayacentes. Presenta intercalaciones lenticulares de arenas, areniscas, gravas y cantos, o incluso paquetes de calizas bioclásticas. En el extremo suoriental se ha detectado también yeso deposicional de medio

marino-lagunar restringido. Su potencia media es de 60 m, aunque puede superar los 100 m, y su relación con las aguas superficiales se establece por medio de surgencias naturales y/o artificiales (ullales de Bullent y Macareno y sondeos) existentes en el entorno de la zona húmeda, así como a través del tramo permeable superior.

- *Conglomerado basal (CB)*: Bajo el conjunto anterior aparece una formación conglomerática constituida por gravas redondeadas más o menos cementadas, de matriz arcillosa o areno-arcillosa. Aunque en la vertical de la zona húmeda puede alcanzar los 100 m, su potencia más habitual es de 40 m. Hidráulicamente está relacionado con las calizas cretácicas sobre las que se asienta y con frecuencia los sondeos que lo atraviesan son surgentes.

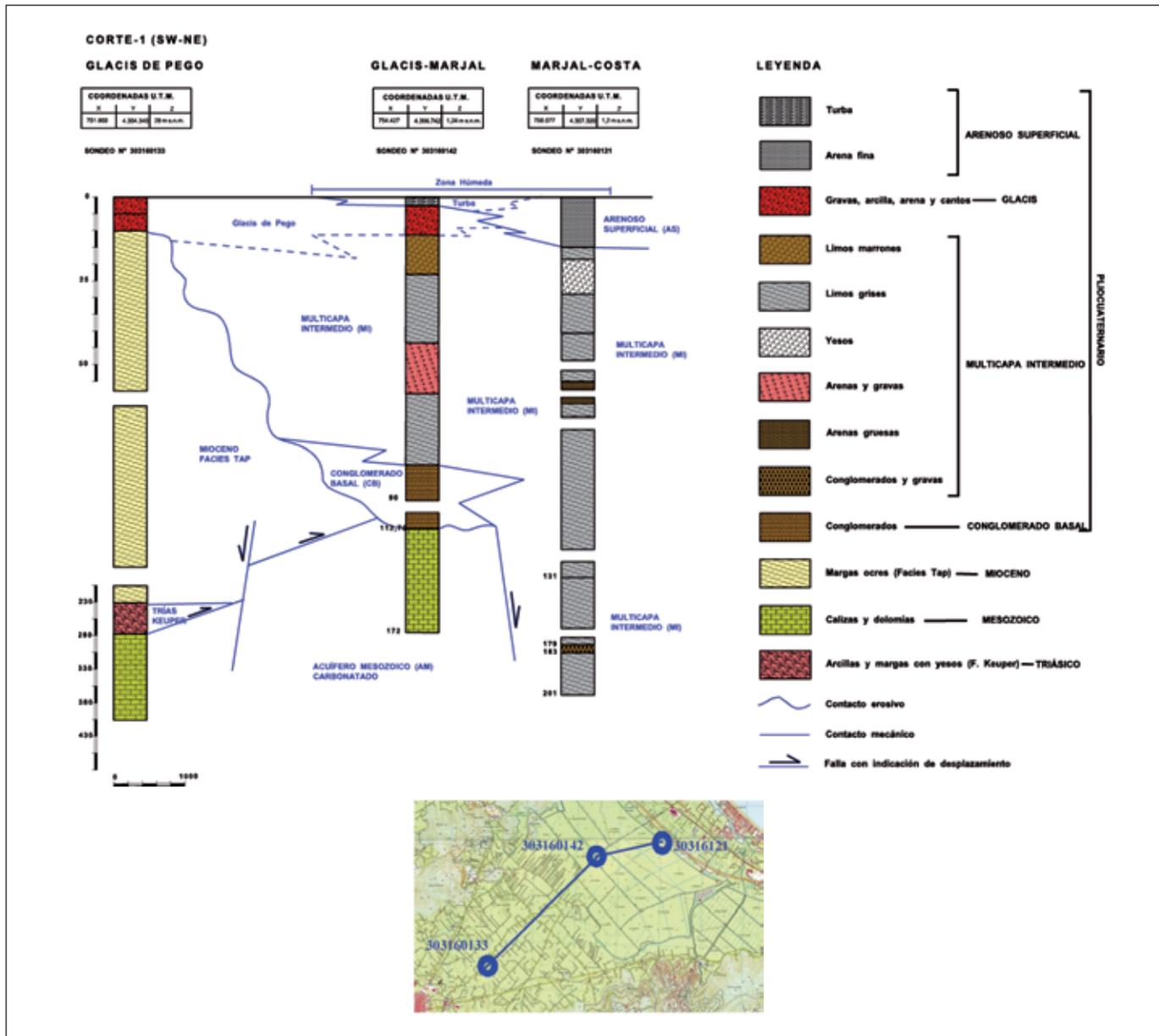


Figura 2. Esquema tectosedimentario del Pliocuatenario de Pegu-Oliva  
 Figure 2. Tectosedimentary diagram of Pliocuatertiary of Pegu-Oliva

- *Acuífero mesozoico de Pegu (MP)*: Constituido por calizas esparíticas y brechoides del Cretácico superior, se encuentra a profundidades superiores a los 200 m en el tercio oriental del área (zona costera). Más al interior, y en función de la tectónica, su posición es variable y los sondeos lo alcanzan a cotas localizadas entre los -44 y los -252 m s.n.m. Este conjunto permeable se encuentra directamente bajo el conglomerado basal cuando éste está presente,

aunque en la mayor parte del territorio se dispone infrayacente a las margas miocenas, o incluso, en el área suroccidental, bajo arcillas plásticas del Trías en facies Keuper. Este substrato configura un conjunto de bloques dispuestos en graderío de forma descendente hacia la costa, flanqueado por sendos bloques elevados al norte, sur y oeste (sierras de Mustalla, Segaria y Vall de Ebo), donde afloran formaciones carbonatadas mesozoicas (fig. 3).

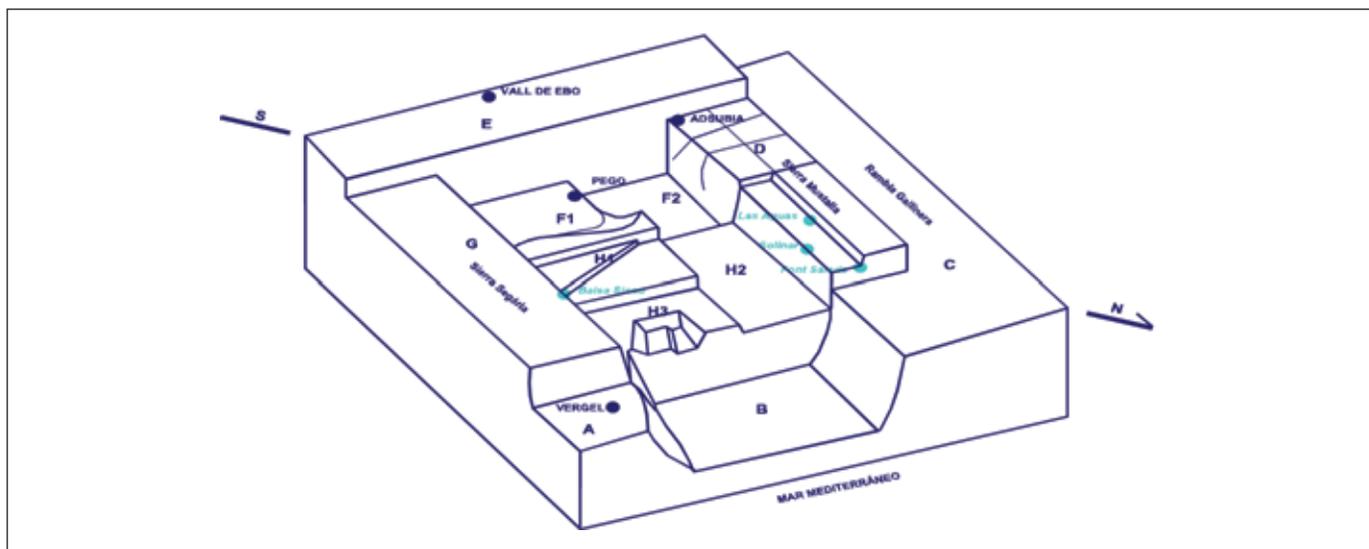


Figura 3. Interpretación tectónica del basamento mesozoico  
 Figure 3. Tectonic interpretation of the Mesozoic basement

### ***El flujo subterráneo en el Pliocuatnario de Pego-Oliva. Morfología y evolución de la superficie piezométrica***

En las zonas costeras o de descarga de los acuíferos detríticos litorales de tipo multicapa, el flujo subterráneo suele potenciar su componente vertical en detrimento de la horizontal. En condiciones naturales esto supone un incremento de la carga hidráulica con la profundidad y la posibilidad de obtener fenómenos de artesianismo en las perforaciones. Este esquema hidrogeológico es el imperante en el acuífero Pliocuatnario de Pego-Oliva, donde las piezometrías halladas para los tramos AS y MI muestran cargas hidráulicas muy similares, pero no coincidentes, con máximos cercanos a los 3 m s.n.m en las zonas más interiores y mínimos próximos a cero en la línea de costa (fig. 4). La excepción la constituye el sector de la finca Oriol donde la superficie piezométrica en el tramo AS se mantiene constante en torno a los -2 m s.n.m por drenaje forzado, con unas extracciones del orden de 16,5 hm<sup>3</sup>/a.

Los datos obtenidos indican que en las áreas costeras las cargas hidráulicas son ligeramente más elevadas en el tramo más profundo (MI) que en el superficial (AS), hecho potenciado por la depresión creada en el sector más oriental (finca Oriol). En las más interiores la superficie piezométrica tiende a converger, e incluso puede llegar a invertirse la relación de cargas hidráulicas. De forma general, el sentido del flujo subterráneo en ambos tramos permeables presenta una

componente hacia el mar, si bien en el tramo AS se pueden distinguir dos zonas bien diferenciadas que se extienden, respectivamente, sobre la mitad noroccidental y suroriental del acuífero a lo largo de la línea de costa. El gradiente hidráulico adquiere un valor considerablemente más bajo en la primera de ellas, entre 0,2 y 0,3 por mil, que en la segunda, donde llega a ser del 1 al 1,7 por mil. Este drenaje del terreno con fines agrícolas, al igual que sucede con los descritos por Holman y Hiscock (1998) en el noroeste de Norfolk, Inglaterra, ejerce una influencia apreciable sobre la interfase agua dulce/agua salada. En definitiva, genera la aparición de una amplia depresión piezométrica que provoca un efecto de llamada sobre el agua marina y el consiguiente proceso intrusivo, con la salinización de las aguas subterráneas.

La evolución piezométrica registrada a lo largo del periodo estudiado (mayo 06-marzo 07) es de escasa relevancia, con diferencias máximas que no alcanzan el metro entre los meses seco y húmedo (fig. 5 izqda). Presenta, en general, una tendencia ligeramente ascendente que alcanza su máximo en febrero de 2007, momento en el que comienza a ser decreciente para recuperar finalmente la situación inicial. Sin embargo, es de resaltar la diferente respuesta de la piezometría en ambos tramos, frente al aumento de las precipitaciones, debido a la interferencia creada por el drenaje de la finca Oriol y la necesidad de incrementar el bombeo en épocas de piezometría elevada por la mayor afluencia de aguas continentales. También se observa (fig. 5 dcha.) una dinámica muy

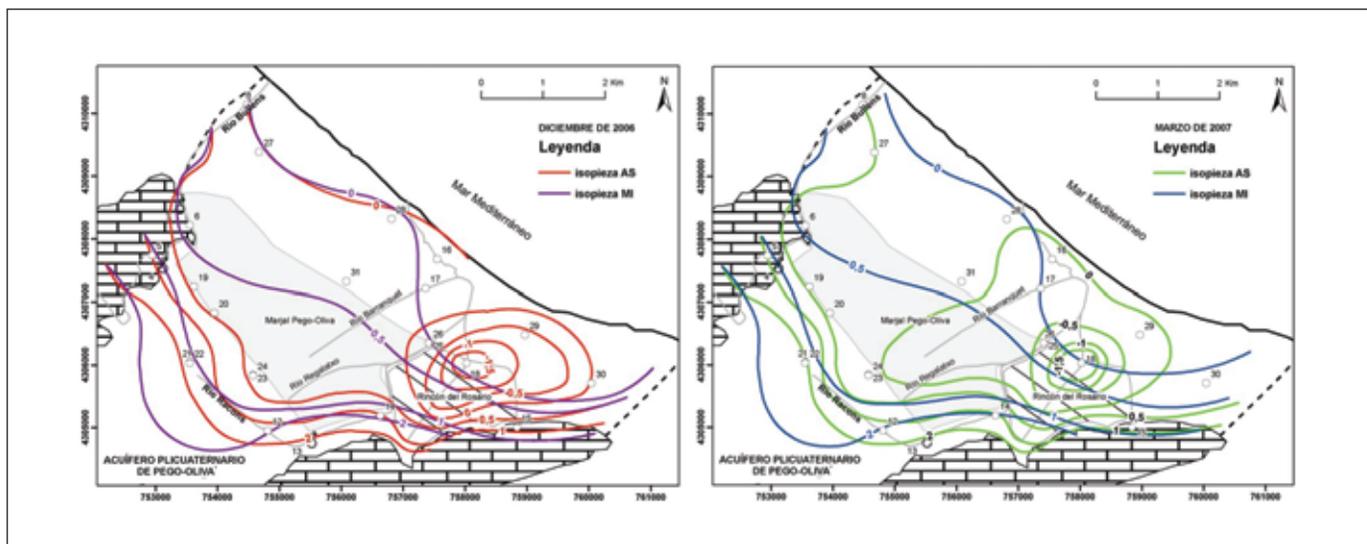


Figura 4. Isopiezas del tramo permeable arenoso superficial (AS) y del multicapa intermedio (MI) en diciembre de 2006 y en marzo de 2007  
 Figure 4. Contour map of hydraulic head of superficial sandy stretch (AS) and the multilayered intermediate one (MI) on december 2006 and march 2007

estable de la piezometría del acuífero Pliocuaternal, modificada sólo puntualmente por periodos de intensas sequías, como la de los años 1984/85 y 2005/06, o de precipitaciones intensas, como la de 1989/90.

### **El flujo subterráneo en los acuíferos kársticos asociados**

Dentro del contexto de los sistemas con permeabilidad por fisuración y karstificación, los acuíferos carbonatados asociados al marjal de Pegu-Oliva presentan un carácter poco inercial, por lo que responden de forma acusada frente a las precipitaciones y su efecto no perdura durante mucho tiempo. Una de sus consecuencias es la mayor variabilidad de la piezometría estacional con respecto al acuífero detrítico (fig. 5 inf. izqda.). En los referidos sistemas las piezometrías descienden progresivamente hacia las áreas de drenaje localizadas en las sierras de Mustalla y Segaria. Por otro lado, los dos acuíferos kársticos presentan conexión hidráulica con el acuífero pliocuaternal, y drenan hacia él parte de sus recursos.

### **Hidrodinámica de la interfase agua dulce-agua salada**

Para conocer el funcionamiento del acuífero asociado basal del humedal, uno de los aspectos de mayor interés es determinar el desarrollo espacial y la evo-

lución temporal de la zona de mezcla agua dulce/agua salada. Para ello mensualmente, entre diciembre de 2006 y marzo de 2007, se registró la temperatura y la conductividad eléctrica (CE) vertical en los sondeos PDGEST (fig.1 y tabla 1). Si bien por su complejidad, en los acuíferos multicapa es obligado admitir una cierta simplificación en la interpretación de los datos, la testificación periódica de las perforaciones, contrastada con su secuencia litológica, consigue obtener una visión 4D de los procesos de salinización. Esta técnica arroja una interesante información referente al comportamiento de los niveles permeables del Pliocuaternal de Pegu-Oliva y su respuesta frente a los fenómenos hidrometeorológicos, así como frente a las actuaciones de carácter antrópico. El conjunto de estas actividades ha permitido analizar el desplazamiento de la zona de mezcla agua continental/agua marina tanto en el tramo AS como en el MI.

El periodo de registros va desde una época de estiaje a otra húmeda, con precipitaciones importantes superiores a los 100 l/m<sup>2</sup> mensuales (tabla 2). Las mayores diferencias piezométricas e hidroquímicas se dan entre diciembre de 2006 y febrero de 2007 y, a falta de datos de un ciclo anual completo, sirven como referencia para establecer la amplitud de la variación del frente intrusivo y del comportamiento hidrodinámico del acuífero.

Del análisis de los diferentes perfiles resalta un comportamiento claramente diferenciado entre ellos, así, mientras en unas perforaciones las salinidades

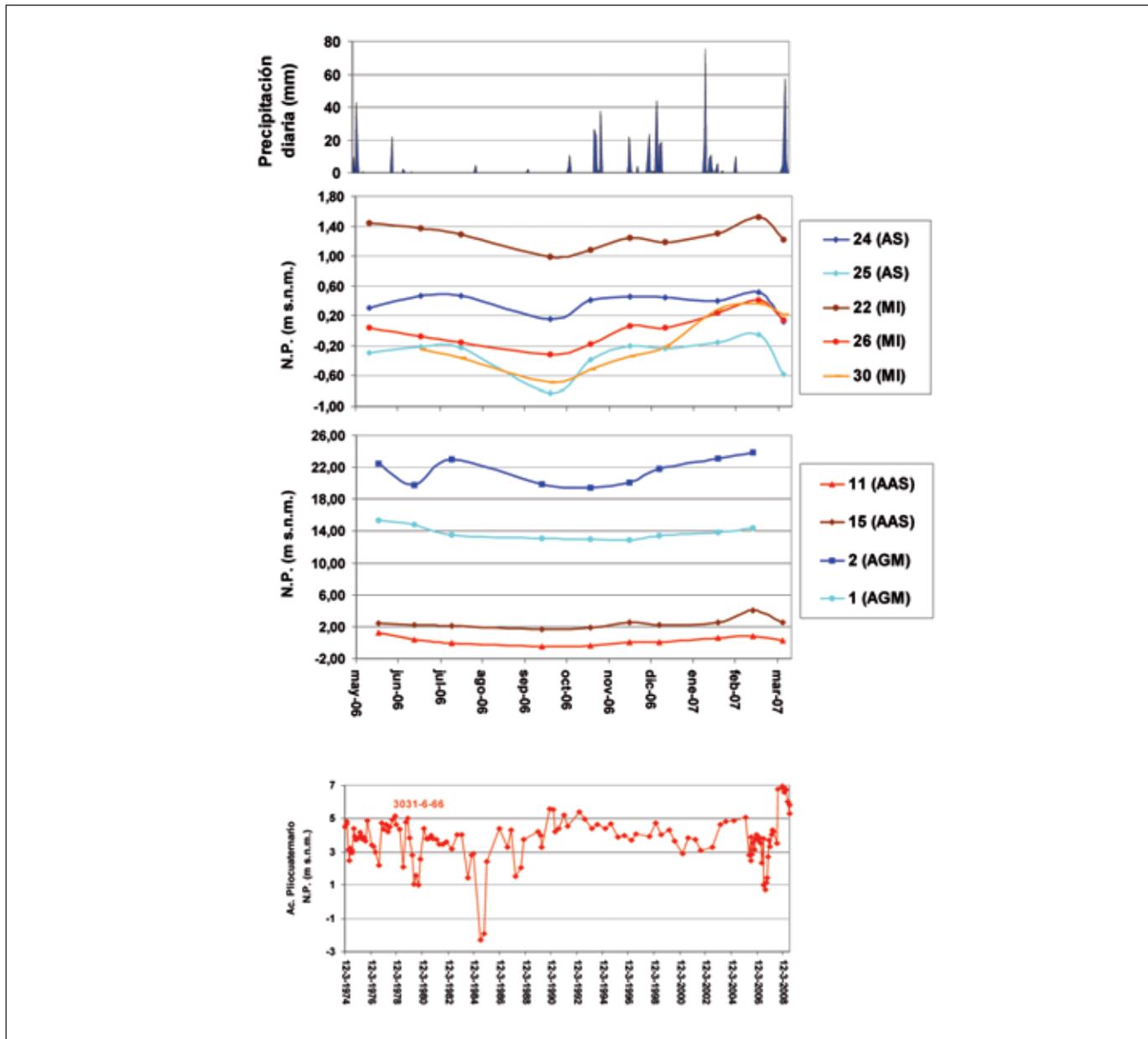


Figura 5. Evolución piezométrica en los acuíferos PPO (tramos AS y MI), AGM y AAS entre mayo de 2006 y marzo de 2007, y para el periodo 1974-2008 en el sondeo 32 (PPO). Datos climáticos del observatorio de Pego-Convento 8057A (AEMET)

Figure 5. Hydraulic head evolution in PPO (stretch AS and MI), AGM and AAS aquifers between may 2006 and march 2007, and from 1974 to 2008 in the point 32 (PPO). Climatic data from Pego-Convento 8057A (AEMET)

permanecen prácticamente invariables, en otras se observan modificaciones muy importantes (tabla 3 y fig. 6 a, b, c y d). Dicho comportamiento presenta, en primer lugar, un control espacial evidente debido al cual en los puntos más alejados de la costa la CE tiende a ser menor y a mantenerse estable (PDGEST-5a y 5b). En segundo lugar, se identifican los procesos modificadores de la zona de mezcla como conse-

cuencia de la dinámica natural (PDGEST-6b y 6c) y de las actividades antrópicas; en concreto con las importantes extracciones de aguas subterráneas de la finca Oriol, cuyos efectos son muy visibles en los perfiles de los sondeos PDGEST-7a y 7b.

Los procesos comentados, habitualmente presentes y reconocidos en los acuíferos litorales, adquieren una especial singularidad en el sector septentrional

CAMPAÑA	FECHA MEDIDA	PRECIPITACIÓN			PIEZOMETRIA MEDIA SONDEOS PDGEST (MSNM)
		Periodo	Parcial (l/m <sup>2</sup> )	Acumulada (l/m <sup>2</sup> )	
1	4 dic.2006	4 nov-3 dic	122,3	122.3	0,27
2	9 y 10 ene. 2007	4dic-9 ene	148,7	271.0	0,53
3	6 y 7 feb. 2007	10 ene-6 feb	125,2	396.2	0,68
4	12 y 27 mar. (2, 7a y b) 2007	7 feb-11mar	11,0	407.2	0,36

Tabla 2. Campañas de testificación de sondeos y registros de precipitación y piezometría  
 Table 2. Borehole logging campaigns and rainfall and hydraulic head measures

costero, concretada en una importante variación de la CE a lo largo del periodo de control. Dicha circunstancia se observa en la figura 7, donde se proyecta en planta la evolución espacial de la interfase en los principales tramos permeables (AS y MI) del acuífero

asociado basal. Para su elaboración se han tomado como valores representativos de la posición de la interfase agua dulce/agua salada, las medidas de la CE a una cota entre -8 y -10 m s.n.m. para el tramo AS y entre -33 y -46 m s.n.m. para el tramo MI. Los resul-

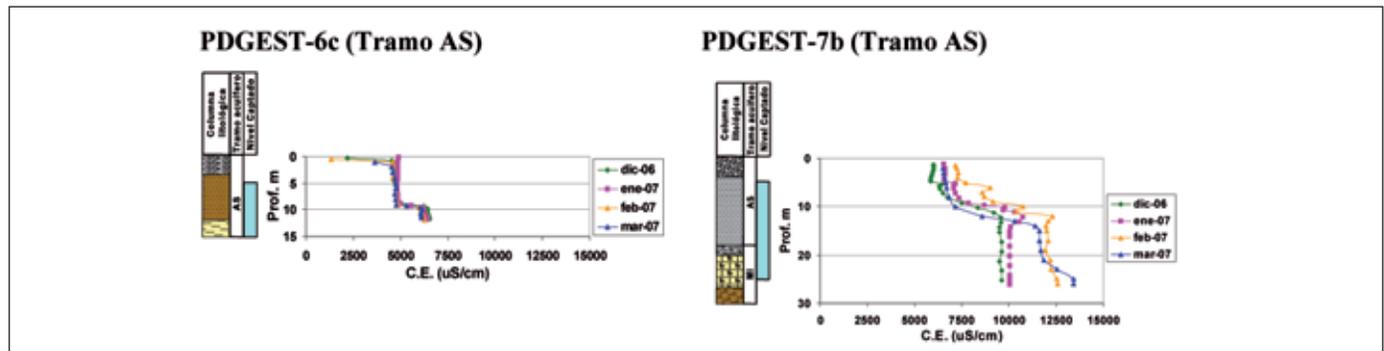


Figura 6 a. Litología y perfiles CE de las perforaciones que captan el tramo AS  
 Figure 6 a. Lithology and EC profiles of the boreholes that catch the AS stretch

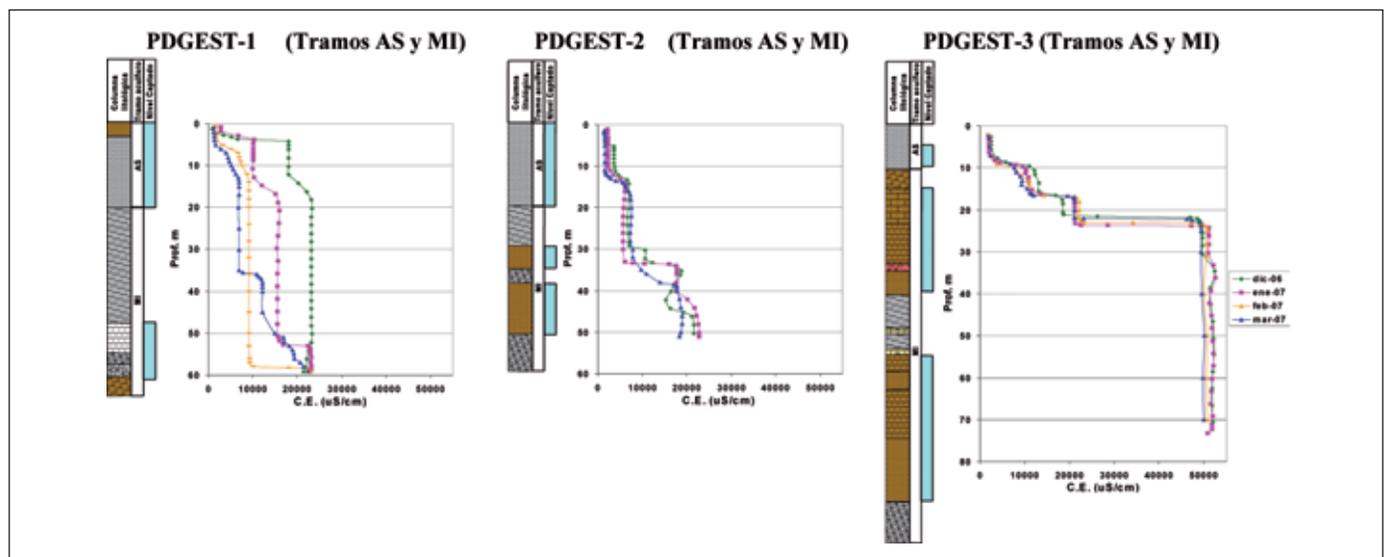


Figura 6 b. Litología y perfiles CE de las perforaciones que captan conjuntamente los tramos AS y MI  
 Figure 6 b. Lithology and EC profiles of the boreholes that catch both AS and MI stretches

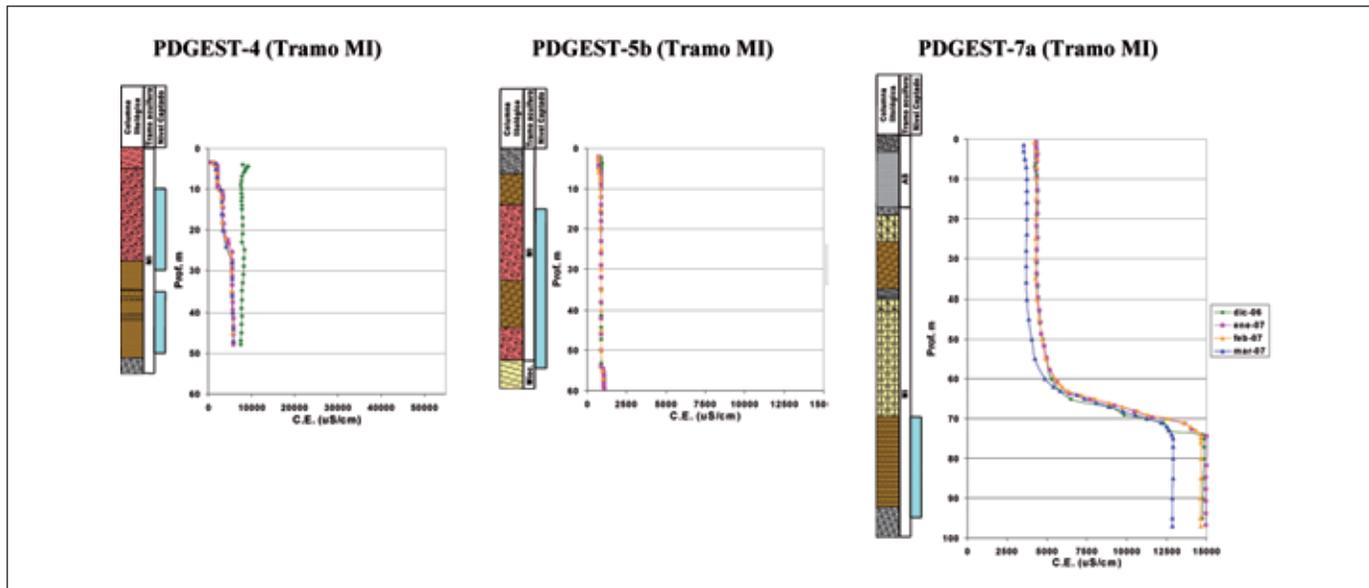


Figura 6 c. Litología y perfiles CE de las perforaciones que captan el tramo MI  
 Figure 6 c. Lithology and EC profiles of the boreholes that catch MI stretch

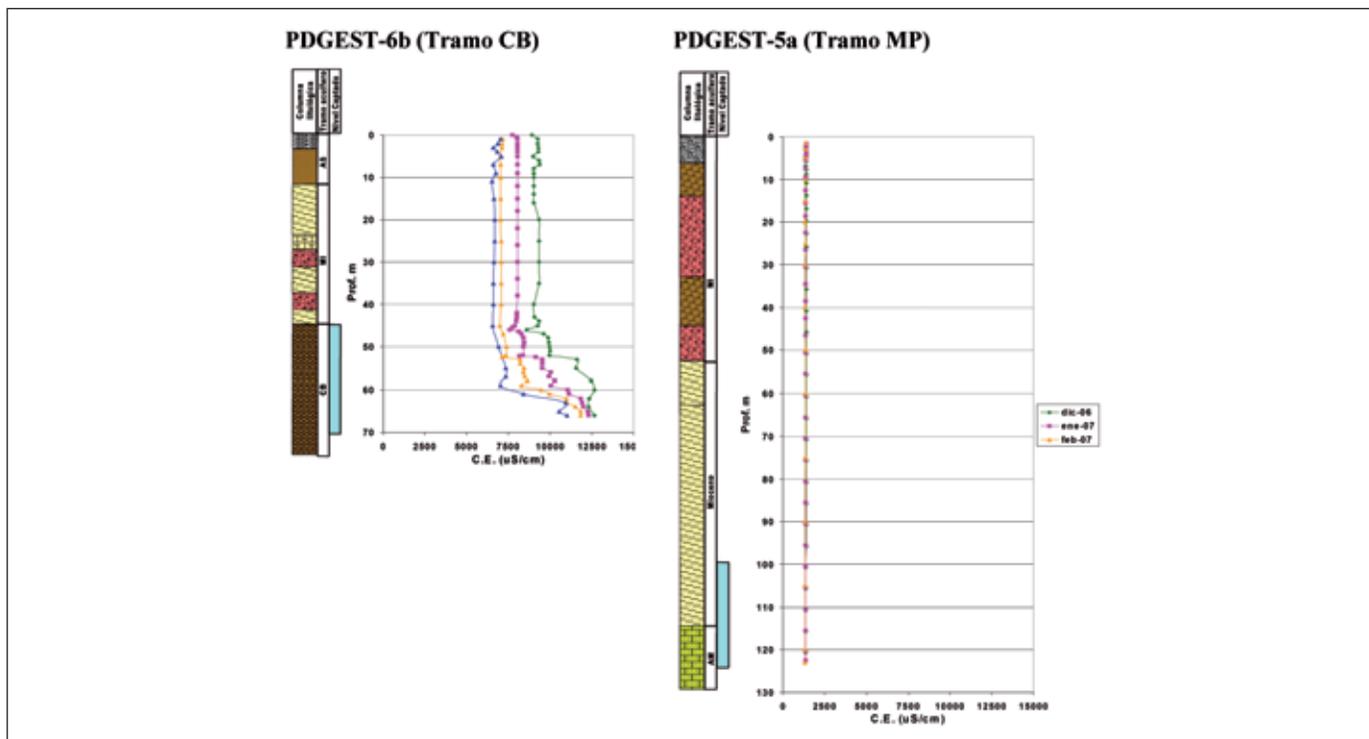


Figura 6 d. Litología y perfiles de CE de las perforaciones que captan el tramo CB y el acuífero mesozoico infrayacente (MP)  
 Figure 6 d. Lithology and EC profiles of the boreholes that catch CB stretch and the Mesozoic underlying aquifer (MP)

tados han permitido obtener conclusiones de gran interés sobre la dinámica del acuífero, entre las que resalta el diferente comportamiento de ambos horizontes permeables.

En el tramo AS, en diciembre de 2006 (fig. 7 sup. izqda.), se identifican claramente dos áreas con elevados valores de CE, una al este de la desembocadura del río Bullent donde se superan los 20.000 µS/cm,

SONDEO	NÚM. IDENT.	Z (MSNM)	TRAMO CAPTADO								EVOLUCIÓN INTERFASE (DIC06-FEB07)
			AS		MI		CB		AM		
			CE (µS/cm)	Prof. (m)	CE (µS/cm)	Prof. (m)	CE (µS/cm)	Prof. (m)	CE (µS/cm)	Prof. (m)	
PDGEST-1	27	1,36	1.000-2.800	0-5	9.100-23.300	> 20					RETROCEDE
			4.500-18.000	3,8-13							
			6.900-23.000	15 - 20							
PDGEST-2	28	1,38	1.500-3.900	0-12	5.700-10.600	20-32					RETROCEDE
			5.500-7.400	12-20	14.000-22.800	> 32					
PDGEST-3	29	2,06	2.000-2.500	0-9	7.000-13.200	9-16,5					RETROCEDE
					18.000-23.000	16,5-23					
					46.000-52.500	> 23					
PDGEST-4	30	3,66			1.700-9.000	0-50					ESTABLE
PDGEST-5a	21	3,45					1.300-1.400	0-125			ESTABLE
PDGEST-5b	22	3,42			730-1.000	0-55					ESTABLE
PDGEST-6b	23	0,74					6.500-9.300	0-45			RETROCEDE
						6.900-10.000	45-52				
						7.300-12.700	52-66				
PDGEST-6c	24	0,67	4.500-5.000	0-9							RETROCEDE
			6.000-6.500	9-12							
PDGEST-7a	26	1,05			3.500-5.500	0-62					RETROCEDE
					12.000-15.000	71-97					
PDGEST-7b	25	1,02	6.000-8.700	0-8							AVANZA
				9.150-13.450	8-26						

Tabla 3. Conductividades eléctricas y evolución de la salinidad en los tramos permeables del acuífero PPO  
 Table 3. Electrical conductivities and zone of transition evolution of the permeable stretches of PPO aquifer

y otra más al sur, en la franja costera situada entre el río Racons y la finca Oriol. En esta última zona no se alcanzan registros tan elevados, pero la superficie con valores superiores a 10.000 µS/cm es de más de 3 km², mientras que la que se encuentra por encima de los 4.000 µS/cm se prolonga unos 5 kilómetros tierra adentro.

En marzo de 2007 (fig. 7, inter. izqda) la situación es sensiblemente distinta, ya que los dos focos intrusivos costeros descritos se reducen de forma apreciable. Así, en el entorno de la desembocadura del río Bullent se aprecia un retroceso de la cuña salina, representada por la isolínea de 10.000 µS/cm, superior a 1,5 km y, en consecuencia, el área de baja salinidad se amplía sensiblemente, con registros que se acercan a los 2.000 µS/cm en algunos puntos del litoral. En este sector el importante desplazamiento de la interfase no puede ser atribuido a causas antrópicas debido a la ausencia de extracciones que pudieran provocarlo, por lo que refleja la hidrodinámica y la variación espacial natural de la salinidad del acuífero. En el sector sureste, sin embargo, el comportamiento no es unidireccional, ya que, si bien por una parte cerca de la costa se detecta un retroceso importante del frente salino de más de 1 km, por otra, se verifica un aumento de la salinidad en el entorno de la finca Oriol debido a la acción de drenaje forzado que en ella se practica, con registros de CE por encima de los

10.000 µS/cm, superiores a los obtenidos en la misma zona en diciembre de 2006 (fig. 7 inf. izqda.).

En cuanto al tramo MI, la evolución observada es similar a la del tramo suprayacente, con la diferencia de que al estar a mayor profundidad la salinidad es superior y no se producen alteraciones antrópicas significativas en ningún sector, dada la ausencia de explotaciones. Las medidas de CE, para la profundidad de referencia, permiten establecer en diciembre de 2006 (fig. 7 sup. dcha.) una franja paralela a la costa de entre 1,5 y 2 Km de ancho en la que su valor está siempre por encima de los 10.000 µS/cm, con amplios sectores que superan los 20.000 µS/cm, y un área en el entorno de la desembocadura del río Racons donde se llegan a estar por encima de los 50.000 µS/cm.

En marzo de 2007 (fig. 7 interm. dcha.), como respuesta a un ascenso progresivo de la piezometría del acuífero y del consiguiente empuje de las aguas continentales, menos saladas, el pie de la cuña intrusiva retrocede, y aunque se obtienen elevados registros de salinidad éstos se fijan a menor distancia de la línea de costa. El retroceso es importante y generalizado en todo el acuífero, y llega a ser también de hasta 1 km (fig. 7 inf. dcha.).

En general, la dinámica de la interfase descrita responde de forma coherente a las precipitaciones en la mayor parte del acuífero, con un ascenso progresivo

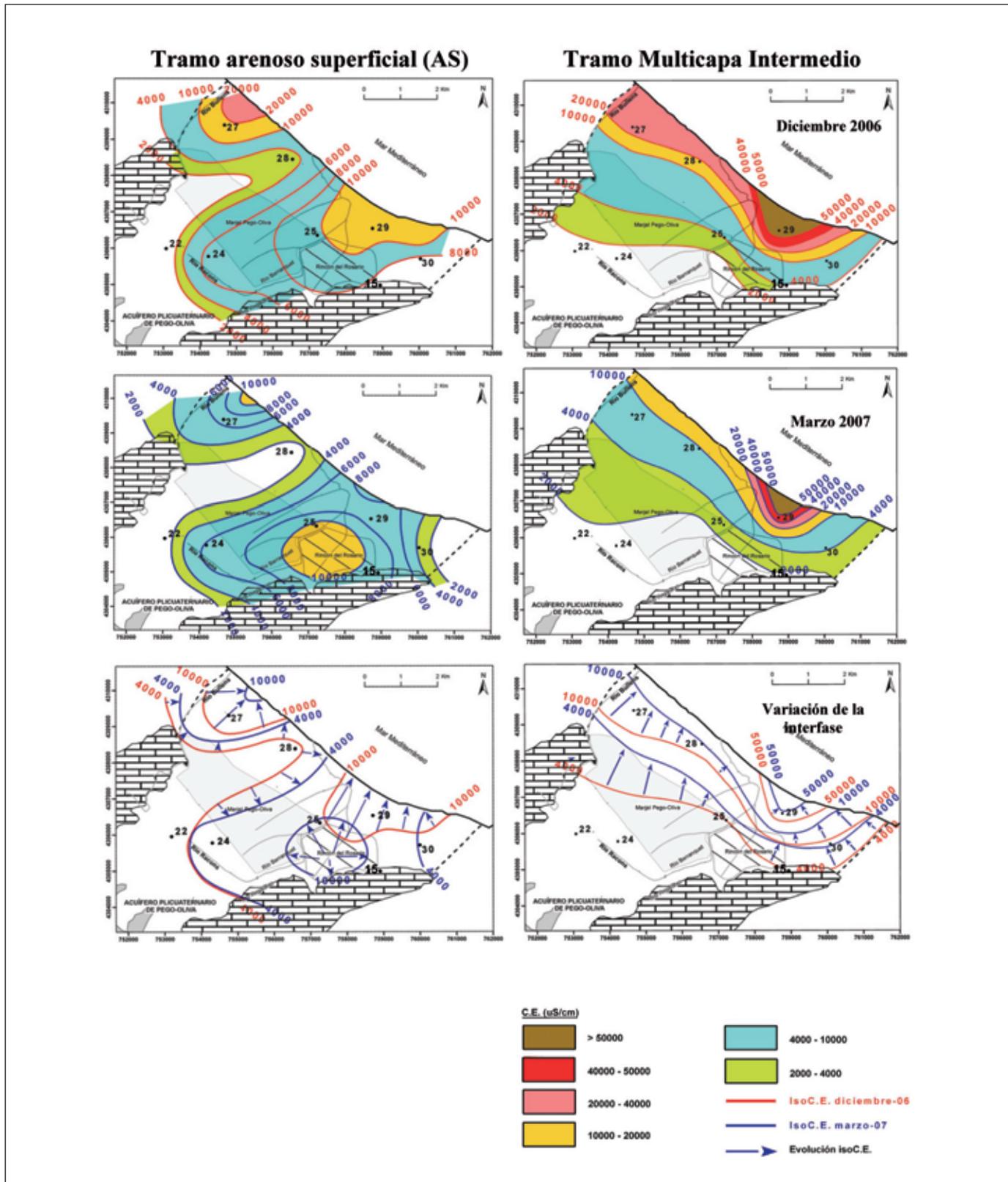


Figura 7. Evolución de la interfase entre diciembre de 2006 y marzo de 2007 en los tramos arenoso superficial (AS) y multicapa intermedio (MI)

Figure 7. Zone of transition evolution between December 2006 and March 2007 in superficial sandy stretch (AS) and multilayered intermediate one (MI)

de la piezometría que, a su vez, genera una presión creciente sobre la interfase y ésta, como respuesta, experimenta un retroceso. Sin embargo, esta subida piezométrica obliga a intensificar los bombeos en la finca Oriol para mantener la cota del nivel del agua en el tramo AS por debajo de la zona radicular de los cítricos (-2 m s.n.m), lo que hace que en su área de influencia la salinidad evolucione de manera contraria al resto del sistema, al generar un cierto fenómeno de "up-coning" en el tramo AS del Pliocuaternario de Pego-Oliva, así como un efecto de llamada sobre las aguas más salinas del acuífero carbonatado contiguo de la sierra de Segaria (AAS), con el que presenta relación hídrica, y que parece actuar también como canalizador preferencial de la intrusión.

### Hidroquímica de los acuíferos asociados a la zona húmeda

Para la caracterización hidroquímica de las aguas del sistema hidrogeológico relacionado con el humedal, se parte de las determinaciones analíticas de 31 puntos de agua (tabla 1 y fig. 1) obtenidas en cuatro campañas de muestreo (mayo, septiembre y diciembre de 2006 y febrero de 2007). Dichos puntos pertenecen tanto al acuífero asociado basal, PPO, como a los dos acuíferos asociados laterales AAS y AGM. La muestra 21 pertenece al acuífero Mesozoico de Pego (MP), y la 18 (finca Oriol) drena tanto al acuífero PPO como al AAS.

Los resultados reflejan un comportamiento diferenciado y característico de cada uno de estos acuíferos (fig. 8). Los puntos pertenecientes al acuífero AGM presentan la menor proporción de sulfatos y la mayor de bicarbonatos. En concreto, se identifican dos grupos extremos, uno de facies bicarbonatada cálcico-magnésica, que se ajusta a los puntos menos salinos y más interiores (puntos 1 y 2 de tabla y fig. 1), y otro, en el que se agrupa el resto, con facies que gradualmente pasan por la bicarbonatada mixta, clorurada-bicarbonatada mixta y clorurada sódica. Un aspecto a resaltar es que la relación entre sulfatos y bicarbonatos/cloruros permanece casi constante en este acuífero, lo que implica la inexistencia de aportes adicionales de sulfatos y orienta hacia la ausencia de procesos de lixiviación de yesos. En el acuífero AAS se distinguen también dos grupos de aguas, uno de facies bicarbonatada-sulfatada cálcico-magnésica, que en septiembre de 2006 es además clorurada, y otro de facies clorurada sódica y sódico-cálcica. El primero corresponde al punto 9 y el segundo engloba a todos los demás.

Por su parte, el acuífero PPO presenta una gran variedad de facies hidroquímicas que en ningún

momento alcanzan la alta relación de bicarbonatos del acuífero AGM. Las muestras se distribuyen entre la sulfatada-clorurada cálcico-sódica del punto 31, debida a los yesos atravesados en este sondeo, la bicarbonatada-sulfatada sódico-cálcica del 22 y la clorurada sódico-cálcica o clorurada sódica del resto.

### Comportamiento hidroquímico de los acuíferos asociados laterales

Como se ha comentado, las aguas del acuífero AGM varían entre facies bicarbonatadas cálcicas con cierto enriquecimiento en magnesio y cloruradas sódicas (fig. 9). El hecho guarda relación con la distancia a la línea de costa y se produce de forma gradual: el punto más alejado (2) presenta aguas bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnésicas, con CE entre 395-410  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (septiembre de 2006 y febrero de 2007, respectivamente) y una concentración de cloruros de 12 mg/l. En el extremo opuesto, la Font Salada (7) tiene aguas claramente cloruradas sódicas, con CE entre 9.012-26.925  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y una concentración de cloruros

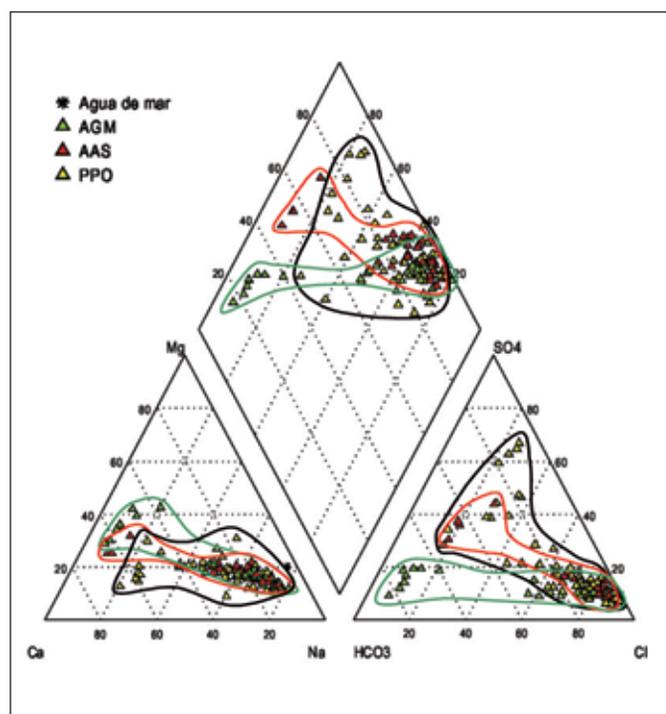


Figura 8. Facies hidroquímicas, en diagrama de Piper-Hill-Langelier, de muestras agrupadas por acuíferos. Campañas de mayo, septiembre y diciembre de 2006 y febrero de 2007  
 Figure 8. Hydrochemical facies, Piper-Hill-Langelier diagram, of samples clustered by aquifers. Tests of May, September and December of 2006 and February of 2007

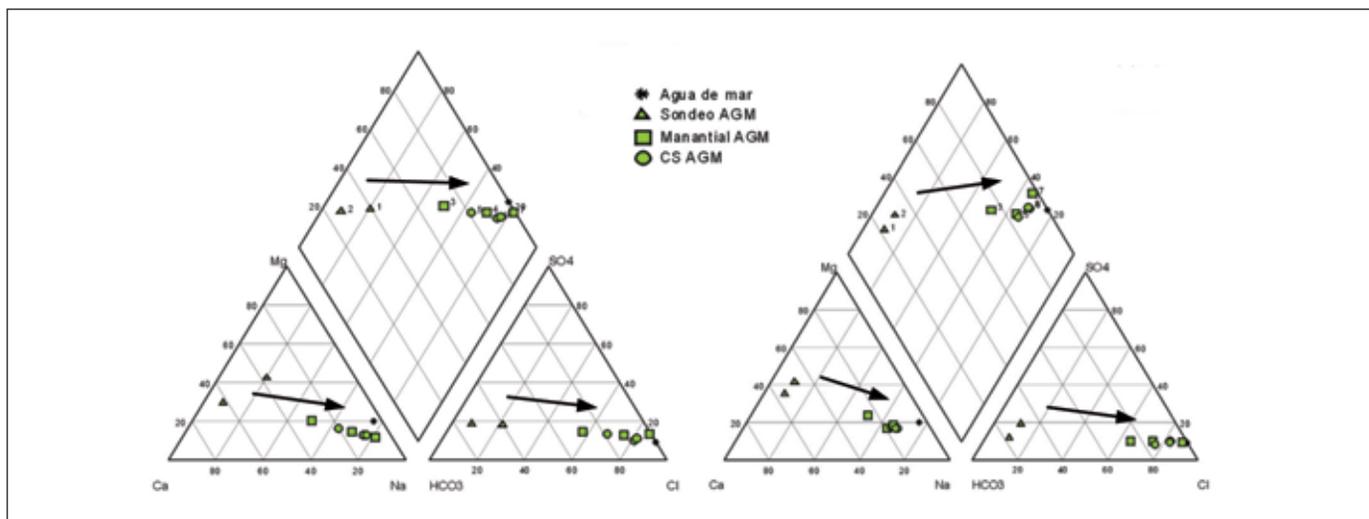


Figura 9. Facies hidroquímicas del acuífero Albuherca-Gallinera-Mustalla (AGM). Septiembre de 2006 (izda.) y febrero de 2007 (dcha.). Las flechas indican la proximidad de los puntos al mar. (\*) CS: curso superficial  
 Figure 9. Hydrochemical facies of Albuherca-Gallinera-Mustalla aquifer (AGM). On September 2006 (left) and February 2007 (right). The arrows are pointed seawards. (\*) CS: surface stream

entre 2.740-8.400 mg/l, en septiembre de 2006 y febrero de 2007 respectivamente (fig. 10). De igual forma, el comportamiento hidroquímico en épocas húmedas y secas es diferente entre el área más interior, representada por el sondeo 2, y la más cercana a la costa, en la que se sitúa el resto de los puntos controlados. En esta última, se observa un enriquecimiento salino en aguas altas (Domínguez y Ballesteros, 2008), más acusado para los cationes, sodio y magnesio, que para los aniones, cloruros y sulfatos (fig. 10).

Las causas del fenómeno han sido analizadas en los trabajos llevados a cabo por Ballesteros *et al.* (2006) a partir de mediciones isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$ , Deuterio, Tritio,  $\delta^{34}\text{S}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  en sulfatos) y del estudio de las relaciones iónicas (especialmente rCl/rBr). Dichos autores concluyen que la elevada y progresiva mineralización de estas aguas obedece a una intrusión marina de carácter natural, donde el desarrollo de importantes procesos de karstificación, junto con la existencia de una circulación preferencial a través de conductos de diferentes cargas hidráulicas, gene-

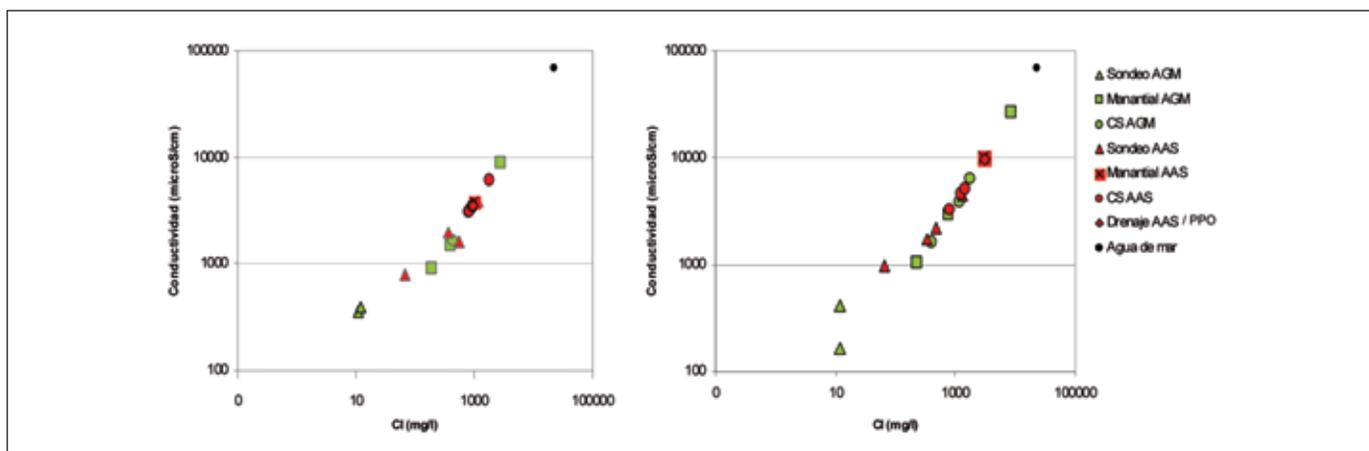


Figura 10. Gráfico de dispersión contenido en ion cloruro (mg/l) vs conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en los acuíferos Albuherca-Gallinera-Mustalla (AGM) y Almodaina-Alfaro-Segaria (AAS). Septiembre de 2006 (izqda.) y febrero de 2007 (dcha.). (\*) CS: curso superficial  
 Figure 10. Dispersion graphic chloride ion (mg/l) vs electrical conductivity (microS/cm) in Albuherca-Gallinera-Mustalla aquifer (AGM) and Almodaina-Alfaro-Segaria one (AAS). On september 2006 (left) and february 2007 (right). (\*) CS: surface stream

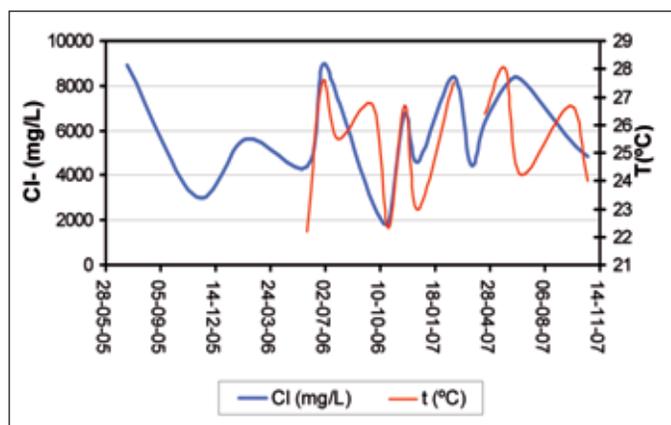


Figura 11. Evolución de la salinidad (ión Cl-) y temperatura (°C) en el manantial de Font Salada (7) (de Domínguez y Ballesteros, 2008)  
 Figure 11. Salinity (ion Cl-) and temperature evolution of Font Salada spring (7) (after Domínguez and Ballesteros, 2008)

existencia de una relación directa entre caudal y salinidad, de manera que cuando aumenta el primero se incrementa el contenido en ión cloruro, y viceversa. De forma equivalente responde la temperatura, es decir, las aguas más salinas son las que alcanzan temperaturas más elevadas. Incluso, en Font Salada (7), que es donde mejor se constata esta relación, se aprecia claramente la existencia de termalismo, con máximos de hasta 28 °C y mínimos no inferiores a los 22 °C (fig. 11).

Este comportamiento hidrogeológico es atribuido por dichos autores (op. cit.) a la modificación de la posición y morfología de la interfase agua dulce/agua salada a lo largo del año, de manera que las piezometías elevadas generan cargas hidráulicas mayores y dan lugar a una interfase con una importante componente vertical (fig. 12). Esto favorece la activación de flujos profundos y la removilización de las aguas también más profundas y más calientes localizadas al pie de la interfase y, en consecuencia, más influenciadas por las aguas de origen marino.

Por el contrario, en las épocas de aguas bajas la morfología de la interfase es más tendida, lo que potencia los flujos horizontales y minimiza la llegada de aguas profundas a las surgencias. En este último caso, la circulación subterránea evoluciona hacia un régimen de flujo más laminar que tiende también a minimizar la influencia de los procesos de mezcla. Este modelo de funcionamiento coincide con el propuesto por M. Pool *et al.* (2007).

Por su parte, el acuífero AAS presenta facies más sulfatadas y un mayor contenido salino, con CE entre 780-10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y concentraciones en ion cloruro entre 67-3.100 mg/l, ordenadas según dos

raría una elevada dispersión hidrodinámica y una amplia zona de mezcla agua dulce/agua salada. Esto implica que los acuíferos AGM y AAS estarían en contacto directo con el mar bajo los sedimentos detríticos cuaternarios.

Conviene recordar que los manantiales que dan origen al río Bullent, situados a una distancia del mar entre 1,5 y 4,4 km, y cotas entre 0,5 y 1,9 m s.n.m., presentan una salinidad y temperatura creciente hacia la costa (Pulido 1979; Ballesteros *et al.*, 2001). En trabajos anteriores, Domínguez y Ballesteros (2008) estudiaron la respuesta de estas surgencias ante las precipitaciones, y pusieron de manifiesto la

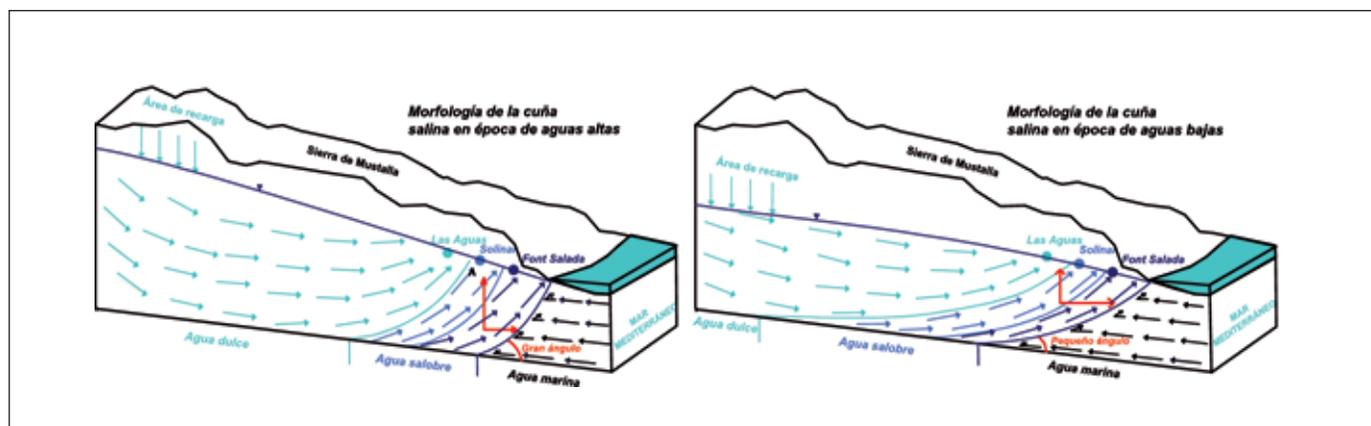


Figura 12. Morfología estacional de la cuña salina en el entorno de los manantiales que dan origen al río Bullent (Domínguez y Ballesteros, 2008)

Figure 12. Seasonal morphology of the saline wedge in the surroundings of the springs that originate Bullent river (Domínguez and Ballesteros, 2008)

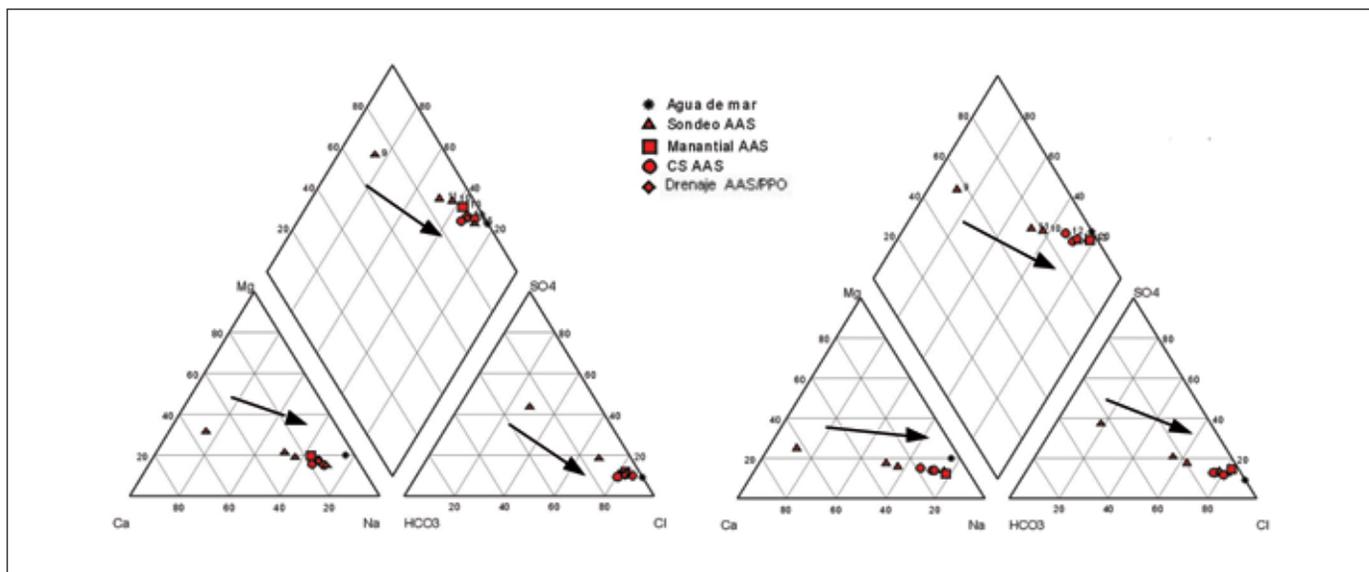


Figura 13. Facies hidroquímicas del acuífero Almadaina-Alfaro-Segaria (AAS). Septiembre de 2006 (izqda.) y febrero de 2007 (dcha.). Las flechas indican la proximidad de los puntos al mar. (\*) CS: Curso superficial  
 Figure 13. Hydrochemical facies of Almadaina-Alfaro-Segaria aquifer (AAS). On September 2006 (left) and February 2007 (right). The arrows are pointed seawards. (\*) CS: surface stream

grupos: aguas bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas (punto 9, localizado en el interior) y aguas cloruradas sódicas (resto de puntos). También en este acuífero parece existir un incremento salino en la época húmeda, así como diferente comportamiento hidro-

químico a lo largo del año en función de la distancia a la línea de costa (fig. 13), si bien sólo se ha podido constatar en el punto 15 (próximo al mar) donde entre septiembre de 2006 (1.150 mg/l) y febrero de 2007 (3.852 mg/l) su contenido en Cl<sup>-</sup> se incrementa

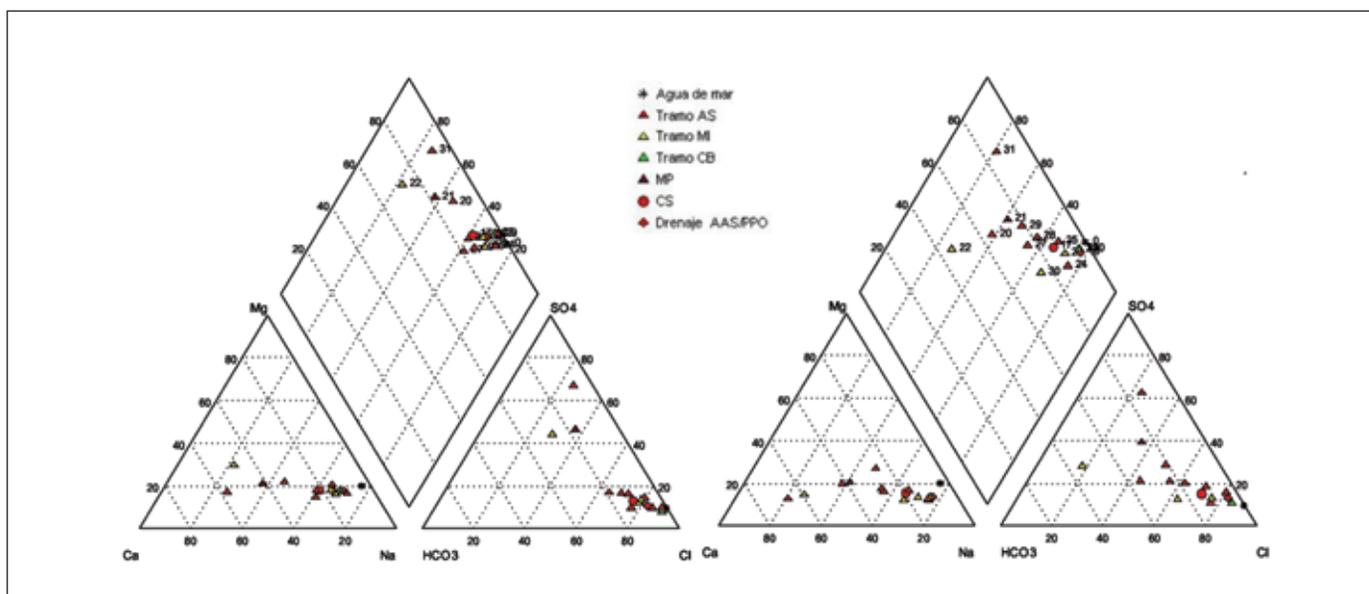


Figura 14. Facies hidroquímicas del acuífero Plioquaternario de Pego-Oliva (PPO): tramos AS, MI y CB, y al acuífero mesozoico infrayacente (MP). Septiembre de 2006 (izqda.) y febrero de 2007 (dcha.) (\*) CS: curso superficial  
 Figure 14. Hydrochemical facies of Plioquaternary aquifer of Pego-Oliva (PPO). Stretches AS, MI and CB, and underlayed Mesozoic of Pego (MP) On September 2006 (left) and February 2007 (right). (\*) CS: surface stream

en casi 3 g/l. Por el contrario, en los 9, 10 y 11 se observa un ligero enriquecimiento de bicarbonatos y calcio, y un descenso en cloruros, sodio y magnesio. El fenómeno puede ser interpretado por la existencia de un proceso de intrusión natural similar al del acuífero AGM, al que se superpondría la intrusión de carácter antrópico causada por el drenaje de la finca Oriol. Esta acción habría modificado la hidrodinámica del acuífero y enmascarado los procesos hidroquímicos originales.

### Comportamiento hidroquímico del Pliocuaternario de Pego-Oliva

Representados los resultados analíticos (puntos 17 a 31) de las campañas de aguas bajas y altas, respectivamente, para cada uno de los tramos permeables del acuífero detrítico PPO, además del perteneciente al acuífero carbonatado MP infrayacente (21), se observa una clara división en dos grupos en la época de estiaje (septiembre 2006) (fig. 14): uno que engloba la mayoría de los puntos y otro compuesto por sólo cuatro. Se obtiene una facies clorurada sódica para el conjunto mayoritario, siendo más sulfatada y más cálcica para el minoritario. Destacan, dentro de este último, el punto 31 por su mayor contenido en sulfatos (facies sulfatada-clorurada cálcico-sódica) y el 22 por su facies mixta, resultado de una mayor participación del anión bicarbonato en la composición química de sus aguas. Por su parte, el único punto del

mesozoico infrayacente (MP) muestra una posición intermedia entre los dos grupos comentados.

En la época de aguas altas (febrero 2007) se aprecia una cierta dispersión de facies hidroquímicas en todos los tramos permeables, que van desde la clorurada sódica a la clorurada-bicarbonatada sódico-cálcica. Por el contrario, en el estío la dispersión es menor, lo que supone una disminución de los procesos de mezcla. Paralelamente, en la representación entre el contenido en ion cloruro y la conductividad eléctrica (fig. 15), se establece una clara alineación de los puntos durante el periodo más seco, que se pierde en parte en la campaña de febrero. Otro de los procesos observados, es que durante los periodos húmedos el anión bicarbonato se incrementa en detrimento del sulfato, lo que supone una mayor influencia de las aguas procedentes de los acuíferos kársticos sobre el acuífero pliocuaternario.

Lo comentado, muestra *grosso modo* el comportamiento habitual de los acuíferos detríticos litorales, con una reducción general de la salinidad en los periodos húmedos y un incremento de la misma en los secos. Sin embargo, no en todos los puntos se corrobora esta circunstancia, como sucede en la finca Oriol, cuya salinidad es apreciablemente mayor en el periodo húmedo, tal y como se ha comentado al analizar el acuífero AAS. Aunque la interpretación de este hecho no es sencilla, es explicado por la influencia de aguas procedentes del sistema kárstico de la sierra de Segaria, que tendría en régimen natural un funcionamiento similar al descrito para el acuífero de AGM, y al efecto de *up-*

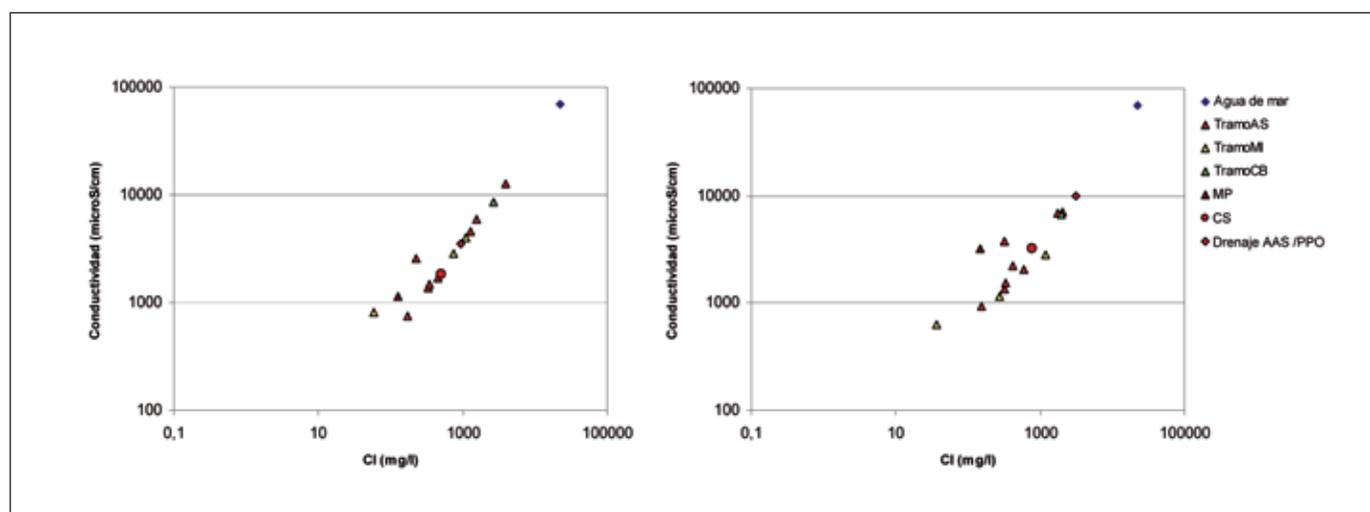


Figura 15. Gráfico de dispersión contenido en ion cloruro (mg/l) vs conductividad eléctrica ( $\mu$ S/cm) del acuífero PPO y del mesozoico infrayacente (MP). Septiembre de 2006 (izqda.) y febrero de 2007 (dcha.). (\*) CS: curso superficial

Figure 15. Dispersion graphic chloride ion (mg/l) vs electrical conductivity (microS/cm) in Pliocuaternary aquifer of Pego-Oliva (PPO) and underlayed Mesozoic of Pego (MP). On september 2006 (left) and february 2007 (right). (\*) CS: surface stream

coning de la cuña de intrusión marina provocado por los bombeos necesarios para drenar la finca Oriol, intensificados durante las épocas más húmedas.

### Conclusiones y consideraciones

Como la mayoría de las zonas húmedas litorales mediterráneas, el origen del marjal de Pego-Oliva se encuentra ligado a la presencia de aguas subterráneas procedentes de sus acuíferos asociados, sin los cuales no tendría ninguna posibilidad de existir. El interés de su estudio radica en la confluencia de diversos fenómenos y procesos hidrológicos de orden natural y artificial, cuyo análisis detallado permite mejorar la comprensión del funcionamiento de las zonas palustres litorales mediterráneas y contribuir al diseño de las políticas más adecuadas para su conservación y gestión. En consecuencia, los trabajos que dan lugar a este artículo se han abordado mediante la aplicación de una metodología en la que se parte del estudio integral del sistema hidrológico relacionado con el humedal, y donde se contemplan todos los elementos que interactúan con él, en este caso, constituidos básicamente por sus acuíferos asociados

Con respecto al acuífero basal del humedal, los resultados obtenidos muestran un esquema de funcionamiento hidrodinámico diferente para los sectores septentrional y suroriental. En el primero, la zona de mezcla agua continental/agua marina se encuentra sometida a amplias fluctuaciones estacionales de carácter natural, con importantes variaciones de la salinidad, y conductividades eléctricas en muchas ocasiones por encima de 20.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En el segundo, sector suroriental, se ha identificado un importante proceso de intrusión marina de carácter antrópico que afecta básicamente al tramo permeable superficial del acuífero pliocuaternario, consecuencia de la desecación artificial de una parte del humedal. Esto último, supone la existencia de un modelo hidrodinámico en el que se verifica una intrusión marina hacia el acuífero pliocuaternario mediante dos vías diferentes: una directa a través del tramo arenoso superficial, y en menor medida del multicapa intermedio, y otra indirecta a través del acuífero kárstico de Almudaina-Alfaro-Segaria, con el que existe conexión hidráulica en el sector de la finca Oriol. Por otro lado, los acuíferos kársticos laterales, que son los que aportan al humedal la mayor parte de sus recursos hídricos, presentan surgencias de agua progresivamente más salina en dirección a la costa, con una evolución desde facies netamente carbonatadas cálcicas hasta facies cloruradas sódicas, acompañada de

un suave incremento de la temperatura. A dicha evolución se le atribuye un carácter natural en el caso del acuífero de Albuerca-Gallinera-Mustalla y mixto, natural y antrópico, en el de Almudaina-Alfaro-Segaria.

Como consideración final, se puede establecer que el sistema hídrico del marjal de Pego-Oliva presenta un modelo funcionamiento hidrodinámico e hidroquímico complejo condicionado, por una parte, por la existencia de cargas hidráulicas y facies hidroquímicas diferentes para cada tramo permeable del acuífero detrítico basal y, por otra, por las particularidades hidrogeológicas de los acuíferos asociados laterales de naturaleza kárstica, cada uno de ellos sometido a su vez a unos determinados condicionantes naturales y antrópicos. Estos resultados refuerzan la afirmación de que para el adecuado estudio y toma de decisiones relacionadas con la conservación y gestión de las zonas húmedas en general, y de las del ámbito mediterráneo en particular, se requiera la realización de trabajos de investigación que abarquen todos los elementos que integran su sistema hídrico. Entre éstos, y de forma especial, se han de tener en cuenta a los acuíferos asociados, lo que implica que el ámbito territorial relacionado con el humedal es con frecuencia mucho mayor al habitualmente considerado.

### Referencias

- Ballesteros, B. J., Rodríguez-Hernández, L., Cobos J. R., García-Menéndez, O., Gómez-Gómez, J. D., Grima, J., López-Gutiérrez, J. y de la Orden, J. A. 2001. *Análisis y ordenación de recursos hídricos de la Marina Alta (Alicante). Alternativas y directrices (1ª fase)*. Instituto Geológico y Minero de España-Diputación Provincial de Alicante. Fondo documental del IGME.
- Ballesteros, B. J. 2003. Los humedales de la provincia de Castellón en el Catálogo de Zonas Húmedas (Comentario). Fornés, J.M. y Llamas, M.R. (Eds.). *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: litoral mediterráneo*. Fundación Marcelino Botín & Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. pp. 25-36.
- Ballesteros, B. J., Ocaña, L., López, J. C. y Rodríguez, L. 2006. *Contribución de las técnicas isotópicas y de las relaciones hidroquímicas al conocimiento de los mecanismos que rigen los procesos de salinización en un acuífero kárstico litoral de la provincia de Alicante, España*. Vila X., Cabrera M.C. y Valverde M. (Eds.). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas (21). Madrid, 185-192.
- Ballesteros B. J., Rodríguez Hernández, L., y Domínguez, J.A.; Díaz-Losada, E. 2007. *Determinación de la relación entre zonas húmedas y acuíferos asociados mediante modelos de flujo y transporte. Aplicación a la gestión*

- sostenible del acuífero de Pego-Denia (Alicante). IGME-DPA. Instituto Geológico y Minero de España. Fondo documental
- Ballesteros, B. J. y Domínguez, J. A. 2007. Identificación y caracterización de las formaciones acuíferas que configuran el substrato de la zona húmeda de Pego-Oliva (Alicante-Valencia). Pulido A., López-Geta J.A. y Ramos G. (Eds.) *Los acuíferos costeros: retos y soluciones*. Serie: Hidrogeología y Recursos Hidráulicos (23), vol. I. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. pp. 23-32.
- Holman, I. P. and Hiscock, K. M. 1998. Land drainage and saline intrusion in the coastal marshes of northeast Norfolk. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*; v. 31; issue.1, 47-62.
- DPA 2005. *Prospección geofísica mediante tomografía eléctrica y sondeos electromagnéticos en el término municipal de Pego (Provincia de Alicante)*. Diputación Provincial de Alicante. Fondo documental.
- DPA 2007. *Los manantiales provinciales*. Segunda parte. Diputación Provincial de Alicante. Fondo documental. Manantiales de la marjal de Pego-Oliva. pp. 31-60.
- Domenech, V. 2003. Los humedales de la provincia de Castellón en el Catálogo de Zonas Húmedas. Fornés, J.M. y Llamas, M.R. (Eds.). *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: litoral mediterráneo*. Fundación Marcelino Botín & Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. pp. 3-23.
- Domínguez J. A. y Ballesteros B. J. 2008. *Análisis hidrogeológico de manantiales salinos asociados al acuífero carbonatado de Albuera-Gallinera-Mustalla en el entorno de la zona húmeda de Pego-Oliva (Valencia-Alicante)*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Vol. XXVIII. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, pp. 209-222.
- Fornés, J.M., de la Hera, A., Ballesteros, B.J. y Aragón, R. 2008. Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales del litoral mediterráneo. *Boletín Geológico y Minero*, 119 (2), pp. 233-246.
- Ley 11/1994, de 27 de diciembre, de la Generalitat Valenciana, de Espacios Naturales Protegidos de la Comunidad Valenciana (DOGV nº 2.423, de 9 de enero de 1995).
- Ley Cambó de 24 de julio de 1918, de desecación de lagunas, marismas y terrenos pantanosos.
- MOPTMA 1995. *Sobre los sondeos, medidas piezométricas y aforos realizados en la marjalera de Oliva-Pego (Alicante)*. Inédito.
- Obartí, J. 2003. Plan de protección hídrica del Parque Natural del Marjal de Pego-Oliva. Fornés, J.M. y Llamas, M.R. (Eds.). *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: litoral mediterráneo*. Fundación Marcelino Botín & Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. pp.127-158.
- Pool, M., Abarca, E., Hidalgo, J. y Carrera, J. 2007. *Simulación bidimensional en planta de la intrusión marina: integración vertical*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas (23), Madrid. pp. 459-470.
- Pulido, A. 1979. *Contribución al conocimiento de la Hidrogeología del Prebético Nororiental (Provincias de Alicante y Valencia)*. Tesis Doctoral. Memoria del Instituto Geológico y Minero de España, Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía, Madrid.
- SGOP 1985. *Sobre los sondeos de investigación realizados en la unidad Alfaro-Mediodía (Alicante)*. Servicio Geológico de Obras Públicas. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Inédito.
- Universidad de Granada (1986). *Grupo de Trabajo de Hidrogeología. Hidrogeología de la marjalera de Pego y su entorno*. Universidad de Granada. Inédito.
- Viñals, M. J. 1996. *El marjal de Oliva-Pego (Valencia). Geomorfología y evolución de un humedal costero mediterráneo*. Tesis doctoral. Generalitat Valenciana-Consellería de Agricultura y Medio Ambiente. 352 pp.

Recibido: diciembre 2008

Revisado: junio 2009

Aceptado: julio 2009

Publicado: octubre 2009