



Ingeniería Servicios de Consultoría

Estudio e investigación de la importancia de la interrelación de ecosistemas protegidos y masas de agua superficiales con masas de agua subterráneas. El caso de la Albufera de Valencia y bajo Júcar

Abril - 2024

Contexto del estudio

- Muchos de los acuíferos costeros localizados en la cuenca mediterránea albergan ecosistemas acuáticos de gran interés medioambiental sobre los que resulta de capital importancia el análisis de las relaciones de las aguas subterráneas con estos ecosistemas (ríos, manantiales y zonas húmedas) así como con los sistemas de drenaje también presentes en algunas llanuras litorales ocupadas por actividades antrópicas.
- La presente exposición aborda esta cuestión mediante la modelización numérica de flujo subterráneo del 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 el lago de La Albufera de Valencia, humedal de importancia internacional incluido en la lista del Convenio de Ramsar. En este ámbito territorial, antrópico y complejo, la existencia de una relación entre las aguas subterráneas y superficiales es conocida desde tiempos históricos, aunque su cuantificación constituía una labor pendiente de un desarrollo más detallado.
- La 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 sondeos de sequía construidos en su mayor parte entre los años 1995 y 1996 con el fin de cubrir la demanda agrícola.
- El modelo numérico de flujo del acuífero de la Plana de Valencia Sur fue realizado por el IGME-TYPSA con el software MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) desarrollado por el U.S. Geological Survey el cual se encuentra en constante desarrollo y evolución.
- El contenido de esta ponencia se ha extraído en gran medida del artículo: *Ballesteros, B.J. y Navarro, J.O. (2022). 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). Boletín Geológico y Minero. Vol. 133 (1), 155-179. ISSN: 0366-0176. Madrid.*

Objetivos del modelo numérico

- Mejora del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico existente de la zona de estudio.
- Obtener el balance hídrico medio anual,
- 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.
- Afecciones ocasionadas a los ecosistemas acuáticos con él relacionados, especialmente al río Júcar, manantiales, y a La Albufera de Valencia, sin olvidar los sistemas de drenaje del Parque Natural.



Zona de estudio y condiciones de borde

Superficie

El área modelada (561,5 km²), coincide prácticamente con la delimitación oficial de la MASub 080.142 Plana de Valencia Sur de la CHJ (566,19 km²).

Límites

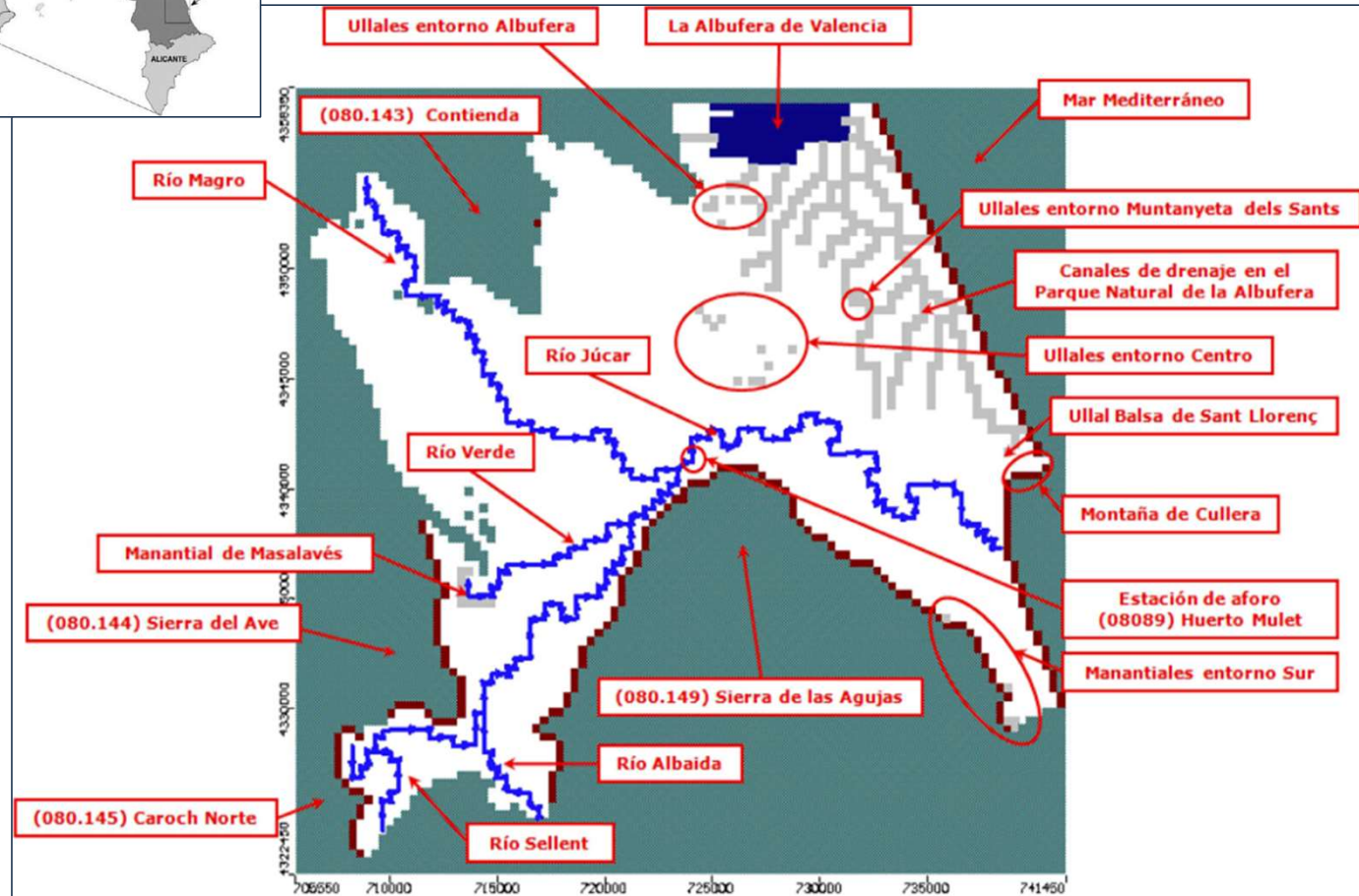
Límite norte: el lago de La Albufera de Valencia y los relieves calizos de La Contienda. Límites oeste y sur: la sierra del Ave, el macizo del Caroch y la sierra de Las Agujas, también mayoritariamente carbonatados. Límite este: el mar Mediterráneo.

Geología

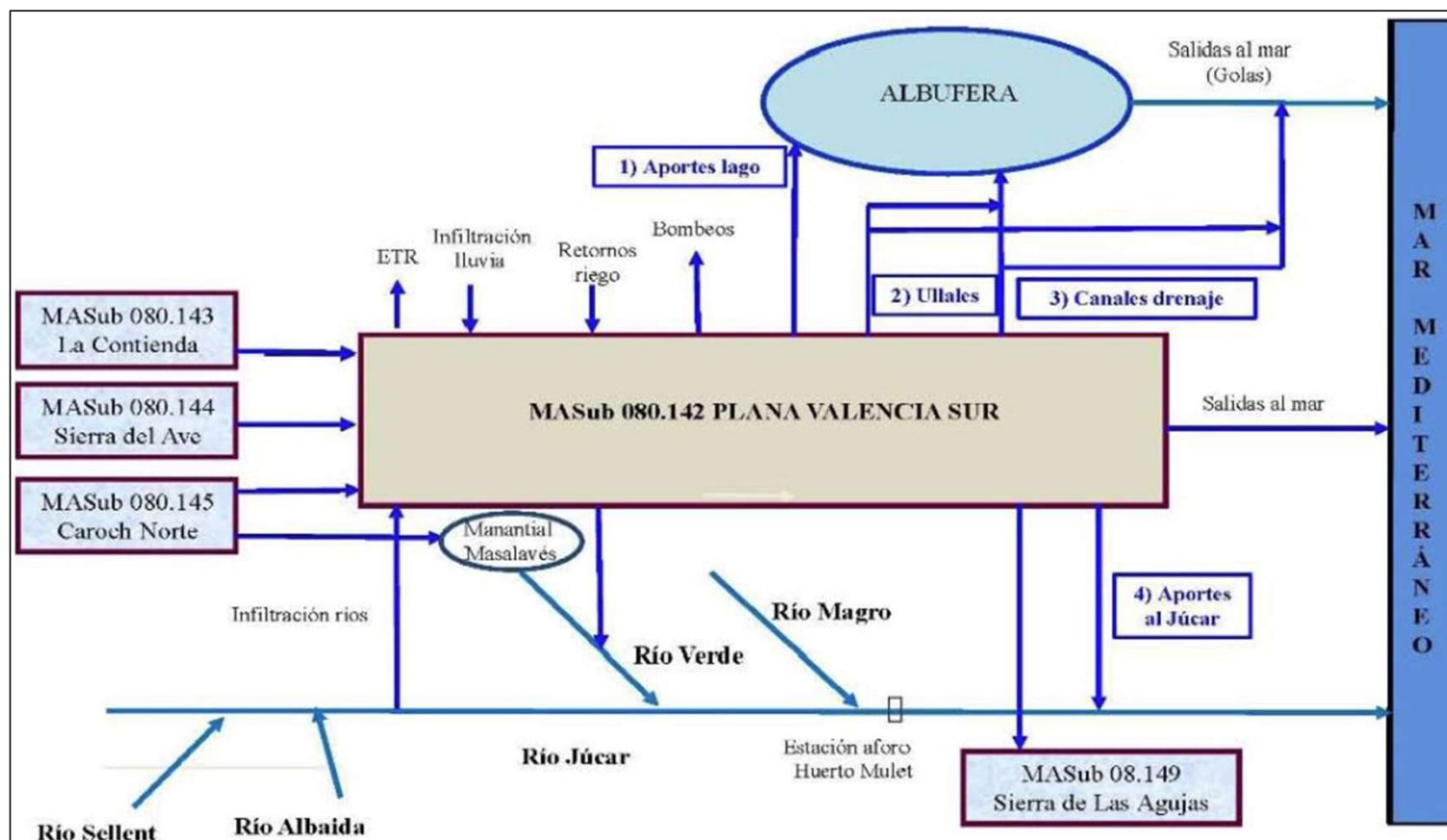
El área se sitúa en la zona de contacto entre la Cordillera Ibérica, con directriz NO-SE, y la Cordillera Bética, con directriz SO-NE. En este ámbito territorial, asociada a la etapa de distensión oligoceno-neógena, se originó una importante cuenca sedimentaria con una geometría de horst y grabens que fue progresivamente rellenada por depósitos continentales y lacustres durante el final del Cenozoico y el Cuaternario.

Relieve

La morfología del territorio es la de una planicie con una pendiente que desciende 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, y la Muntanyeta dels Sants.



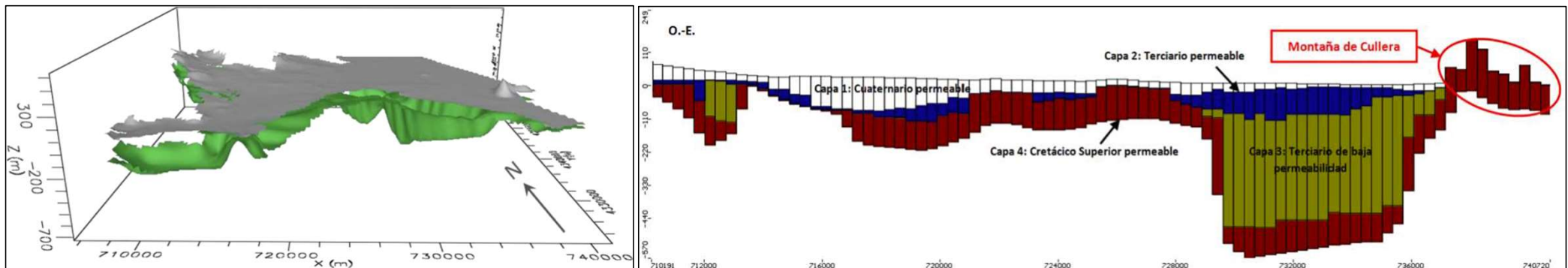
Esquema de funcionamiento hidráulico, componentes del balance hídrico y ecosistemas asociados



Estructura del modelo numérico

Capa	Litología	Espesor (m)	Edad
1	Gravas, arenas y conglomerados	0-120	Cuaternario - Permeable
2	Areniscas y conglomerados. Calizas	0-300	Plioceno - Mioceno terminal (Pontiense). Terciario permeable
3	Margas	0-400	Mioceno - Terciario de baja permeabilidad
4	Calizas y dolomías	>200	Cretácico - Cretácico Superior permeable

El muro impermeable del acuífero viene dado por los tramos margosos del propio Cretácico y/o por las arcillas con yesos del Trías (Keuper)

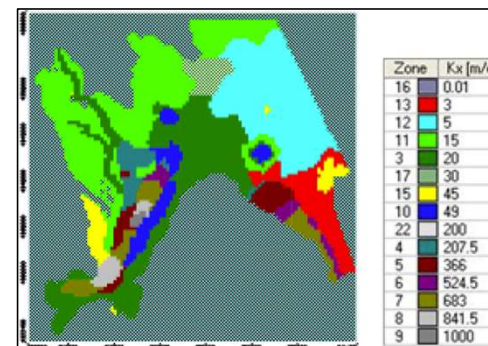


El Cuaternario y Plioceno presentan conexión hidráulica vertical, así como con el Cretácico Superior (mitad occidental) donde las margas miocenas se disponen de forma discontinua.

Características del modelo

- 4.357 celdas activas de dimensiones 360 x 360 m.
- Distribución de la permeabilidad:

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)



- Valores de coeficiente de almacenamiento

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

- En régimen permanente, modelo calibrado a partir de datos tomados durante 18 años (entre 1/10/1990 y 30/09/2008).
- En régimen transitorio se ha simulado el periodo seco comprendido entre el 15/04/2006 y el 30/09/2008 considerando cinco periodos de paso, 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).

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

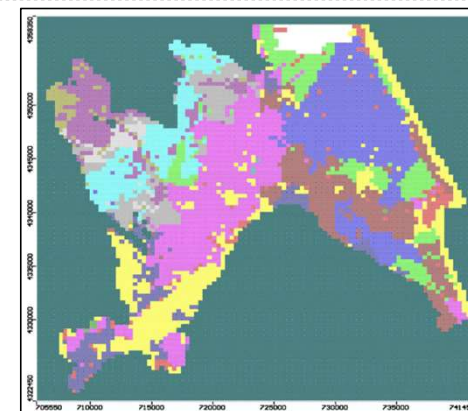
Recarga

- Se procedió a la estimación y distribución de la recarga (infiltración de agua procedente de lluvia y retornos de regadío).
- Valores de recarga: En régimen permanente 283,8 hm³/año mientras que, en régimen transitorio, es variable entre 86,5 y 188,4 hm³ dependiendo del periodo de paso y de su duración.

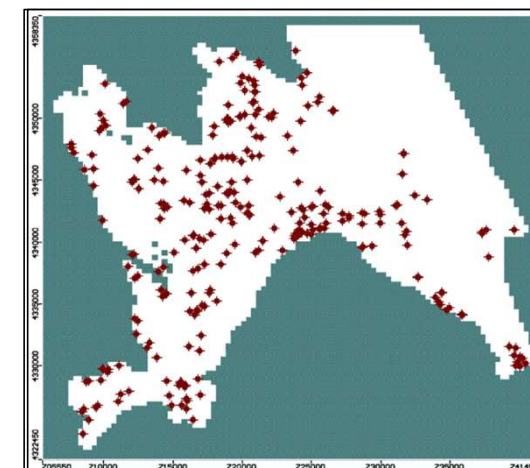
Bombeos

- Identificados 217 explotaciones de las que, en conjunto y hasta el año 2005, se extraía un volumen anual algo superior a los 56 hm³. En el modelo numérico sólo se incorporaron aquellas captaciones que igualaban o superaban los 10 m³/día.
- Las captaciones de aguas subterráneas abundan en las tres cuartas partes occidentales del dominio del modelo, siendo prácticamente inexistentes en la franja oriental-litoral.
- Los 68,8 hm³ extraídos desde los pozos de sequía de forma adicional durante esta sequía (2006, 2007 y 2008) supusieron una explotación intensiva y coyuntural del acuífero, con un incremento del 87%, 96% y 56% respecto a los bombeos practicados habitualmente en el sistema.

Periodo paso	Inicio periodo	Final periodo	Bombeos (hm ³)		
			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

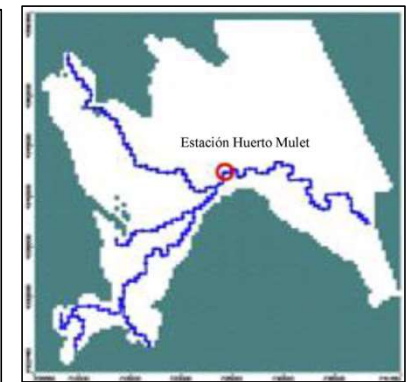
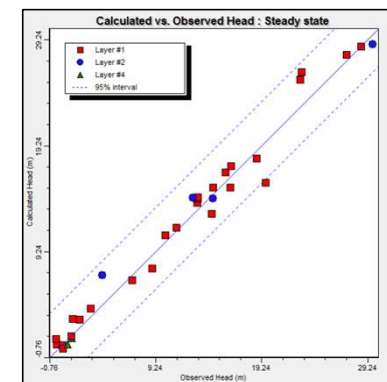
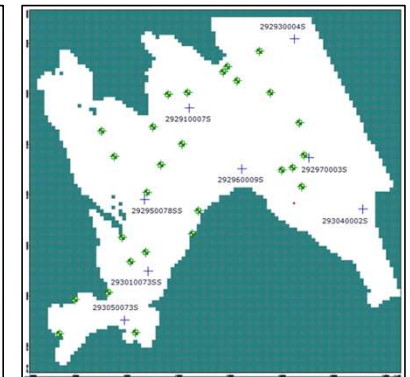
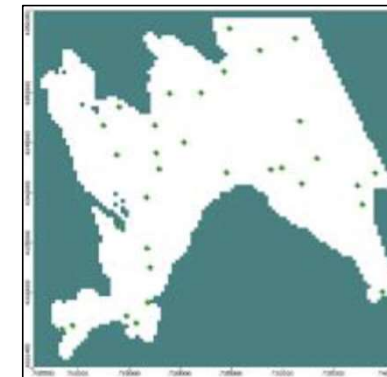
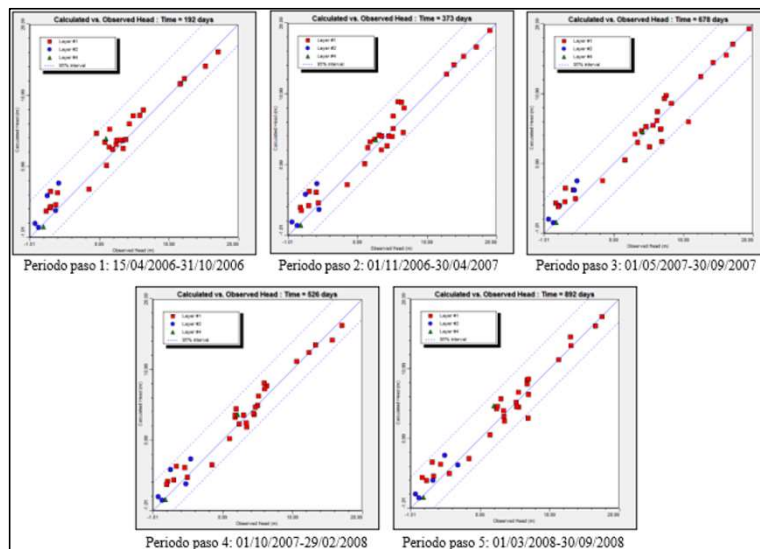


Distribución de la recarga por infiltración (mm/día) en régimen permanente): Azul oscuro:2,00, marrón:1,71, rosa:1,47, azul claro:1,45, gris claro:1,24, verde:1,17, amarillo:0,75, morado:0,64 y gris oscuro: 0,21.



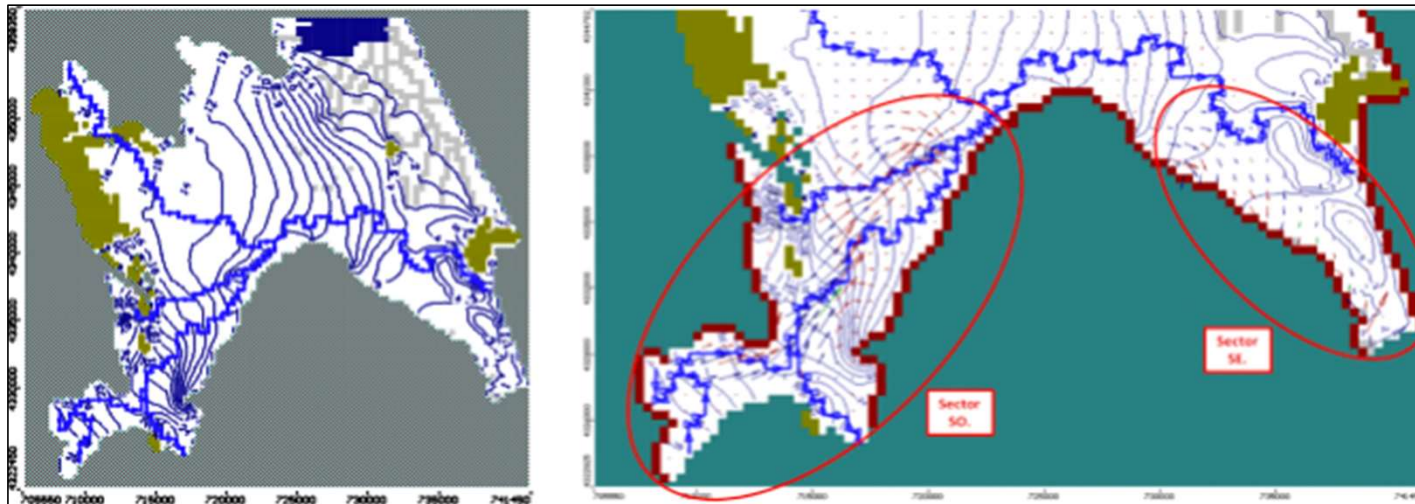
Calibración del modelo numérico

- Se consideraron 32 puntos de control piezométrico en régimen permanente y 35 en régimen transitorio, además de la estación de aforos 08089 de Huerto Mulet en el río Júcar y de los aforos de los principales 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 m³/s (606,8 hm³/año), mientras que para el periodo 15/04/2006-30/09/2008 (régimen transitorio) es notablemente inferior, 12,32 m³/s (388,5 hm³/año).
- Valores error Normalized RMS: En régimen permanente 4,63% hm³/año mientras que, en régimen transitorio resulta variable entre 5,48 y 7,29 %.
- Los mayores problemas de calibración se presentaron en: a.-) los puntos de control más próximos al impermeable de base y b.-) primer periodo de paso en régimen transitorio (posible efecto de calentamiento del modelo).



Discusión (en régimen permanente I-II)

- 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. flujo procedente de las transferencias laterales de acuíferos colindantes 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.



- Los ríos Júcar y Verde, que constituyen sendos ejes de drenaje en la mayor parte de su recorrido, especialmente en sus tramos finales.
- 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.
- La superficie piezométrica presenta 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. La piezometría cerca de la costa y en los alrededores de La Albufera ronda la cota cero.

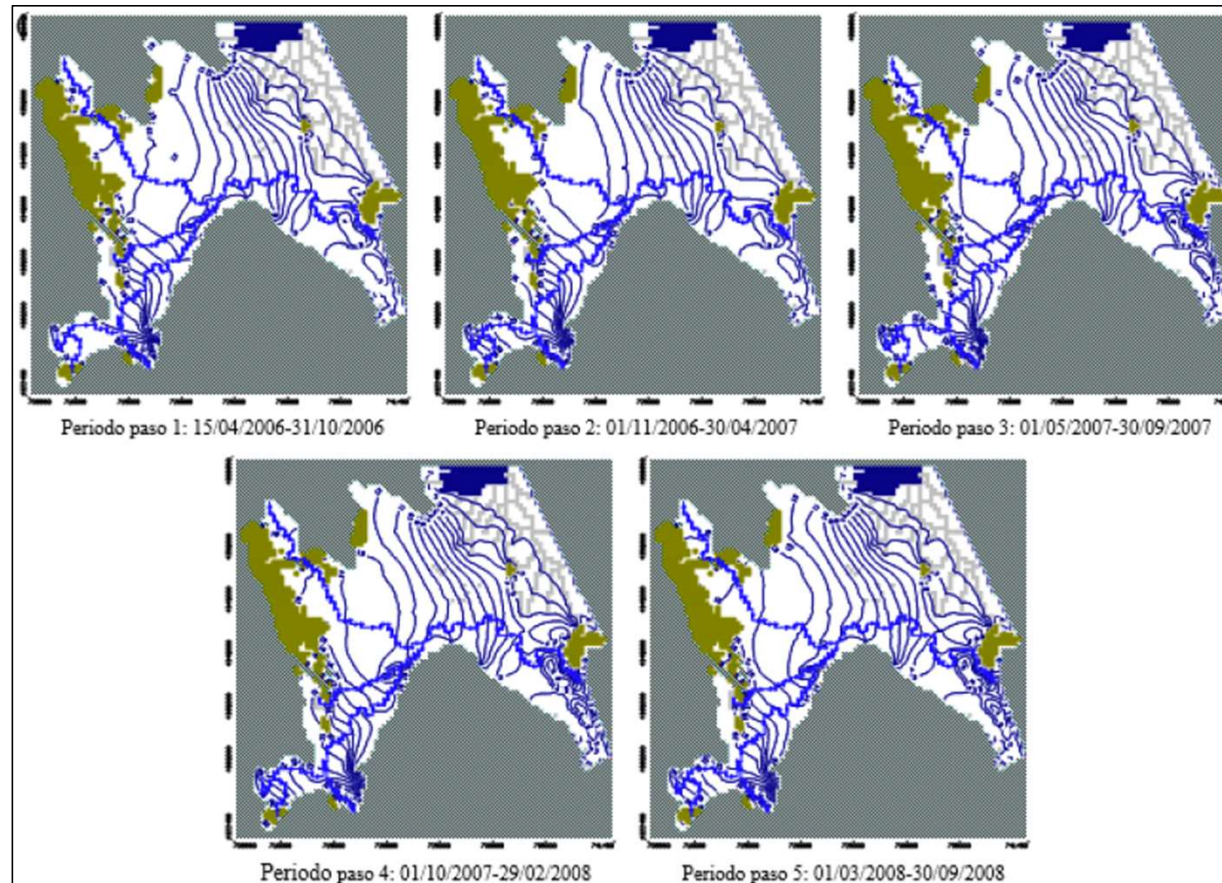
Discusión (en régimen permanente II-II)

Balance hídrico MASub 08.141 Plana de Valencia Sur (Periodo 1990/2008)		
Entradas		hm³/año
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	
Aportaciones totales		361,8
Salidas		hm³/año
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) ^(*)
Ullales Marjal		26,3
Canales de drenaje		96,6
Albufera		13,0
Mar		22,2
Bombeos		56,1
Salidas totales		361,8

Discusión (en régimen transitorio o situación de estrés hídrico, SEH) (I-II)

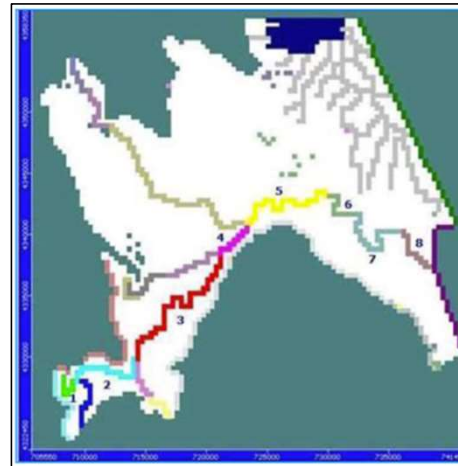
Balance hídrico	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Total
MASub 08.141 Plana Valencia Sur	15/04/2006 31/10/2006	01/11/2006 30/04/2007	01/05/2007 30/09/2007	01/10/2007 29/02/2008	01/03/2008 30/09/2008	periodo
Periodo: 15/04/2006-30/09/2008						
Entradas (hm³)						
Infiltración (lluvia+retornos riego)	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 ⁽¹⁾
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)	
Aportaciones totales	137,3	131,5	149,8	172,2	227,1	778,4
Salidas (hm³)						
Transferencias laterales hacia MASub	10,7	20,7	15,9	20,5	30,4	58,4 ⁽²⁾
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
Salidas totales	162,4	140,2	148,3	153,5	224,7	789,1
Variación almacenamiento (hm³)	- 25,1	- 8,6	+ 1,5	+ 18,9	+ 2,6	- 10,7

Discusión (en régimen transitorio o situación de estrés hídrico, SEH) (II-II)

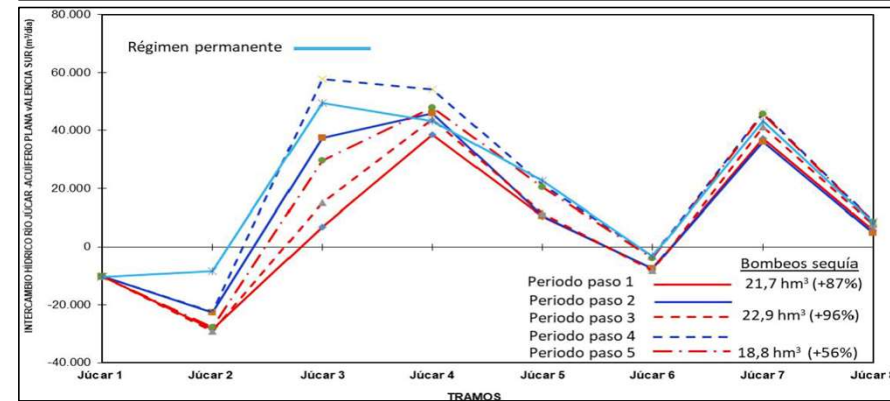
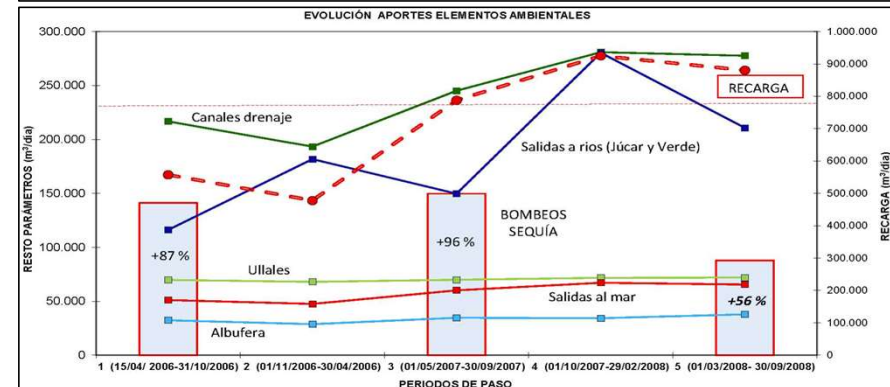


Afecciones ambientales en SEH (I-II)

- El sistema está fuertemente controlado por la recarga (infiltración lluvia+retornos riego) y por el volumen de las extracciones. Los elementos más vulnerables son las salidas a los ríos y a los canales de drenaje. 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.
- 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.
- Los aportes hídricos 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.
- 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. Se establecieron 8 tramos de control. 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 (tanto en régimen permanente como transitorio).

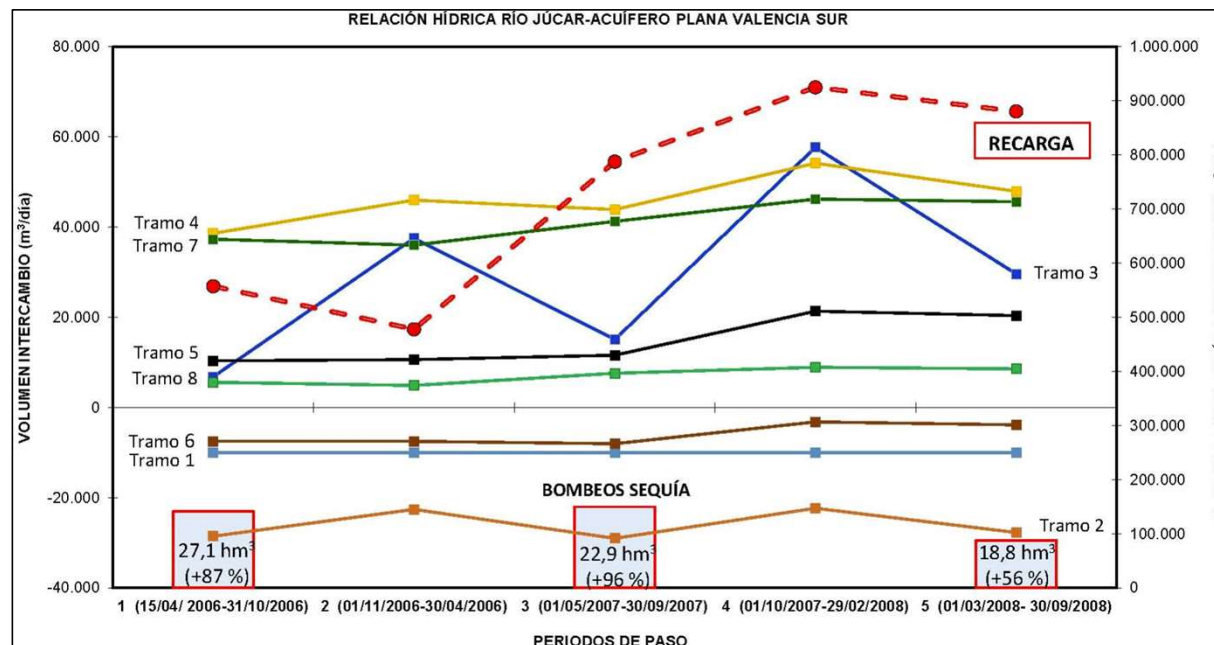
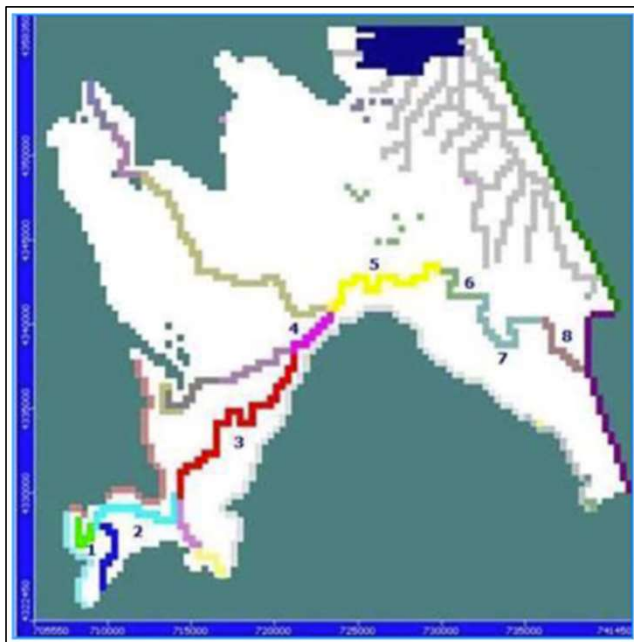


Régimen transitorio 15/04/2006-30/09/2008 (m ³ /día)	Paso 1 15/04/2006 31/10/2006	Paso 2 01/11/2006 30/04/2007	Paso 3 01/05/2007 30/09/2007	Paso 4 01/10/2007 29/02/2008	Paso 5 01/03/2008 30/09/2008	Media total periodo
Recarga (lluvia+retornos riego)	557.396	477.901	787.582	925.000	880.374	720.874
Salidas ríos Júcar y Verde	116.146	181.768	149.673	280.263	210.748	190.247
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
Bombeos sequía	141.146	-	149.673	-	87.850	123.077
Var. almacenamiento (m³/día)	-130.729	-47.512	9.804	124.342	12.150	-11.996



Afecciones ambientales en SEH (II-II)

- Análizado 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% (309,7 m³/día), mientras que, por el contrario, los aportes al río se reducen en más de la mitad, en concreto en un 60% (22,5 m³/día). Lo mismo sucede en el último periodo de paso, aunque de forma más atenuada.



Resumen

- Durante la SEH, los volúmenes excepcional y ocasionalmente extraídos por sequía correspondieron al 7,5% de los recursos renovables del acuífero, lo que supuso incrementar del 15,5% al 23% su explotación. Sólo en los dos primeros periodos de paso simulados de la SEH, coincidentes con la menor precipitación, se generó un consumo de reservas del sistema (33,7 hm³). En los siguientes periodos se apreció una sensible mejora, aunque no total, traducida en un incremento del almacenamiento en 23 hm³, con una clara tendencia a la recuperación, por lo que finalmente sólo se redujo en 10,7 hm³, equivalente al 2,8% de sus recursos renovables.
- 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.

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

- Los ríos son los elementos ambientales más afectados, 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.
- En el Parque Natural de La Albufera de Valencia, los aportes disminuyen en los 3 primeros periodos, 14%, 22% y 6%, respectivamente. Acusado descenso en el segundo periodo de paso, sin incremento de las extracciones, pero con una tasa de recarga muy baja. 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 pone de manifiesto la escasa repercusión que sobre él tuvieron las explotaciones de sequía.
- Las salidas al mar 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.
- 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, todavía acusan el efecto de los bombeos de sequía.
- En consecuencia, desde punto de vista de la planificación hidrológica y de la gestión de los recursos hídricos, es oportuno decir que la MASub 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.

Conclusiones

- El estudio expuesto en la presente ponencia considera una metodología de trabajo perfectamente extrapolable a la caracterización de otras masas de agua subterránea con problemáticas similares, como es la identificación y cuantificación de las relaciones aguas subterráneas-aguas superficiales.
- El estudio de la interrelación de las aguas superficiales y subterráneas constituye una poderosa herramienta para asegurar la sostenibilidad de ecosistemas dependientes y en especial de Espacios Naturales Protegidos relacionados con el medio acuático (Delta del Ebro, Parque Nacional de Doñana, etc.), pues permite estimar balances hídricos y la afección sobre estos de cualquier acción humana o proceso natural (cambio climático) que se plantee, así como establecer las medidas protectoras más eficientes en diferentes escenarios de gestión hídrica (de escasez de recursos y/o sequía) de forma que, en la medida de lo posible, se cubran las necesidades ambientales de dichos Espacios Naturales.
- La ejecución extendida de este tipo de estudios en el marco del PAAS, es decir el mejorar el conocimiento hidrogeológico sobre el funcionamiento hidrogeológico de cada ecosistema dependiente, ayudará a mejorar de forma significativa la resiliencia de estos.
- Así en el marco del Plan de Acción de Aguas Subterráneas se recomienda considerar como fundamental la recopilación de abundante nueva información hidrogeológica (sondeos de investigación, ensayos de bombeo, evoluciones piezométricas y de la calidad, hidroquímica, geofísica, teledetección, etc.), de lo contrario, la disponibilidad de softwares libres cada vez más avanzados, además de MODFLOW, como SUTRA (USGS-ModelMuse) o PHREEQC (USGS) entre otros, y de las nuevas tecnologías, como MLMapper, IA (Grupo de Investigación en Hidrogeología y Medio Ambiente de la (UCM) no permitirán por sí solos progresos significativos en el conocimiento y protección de las aguas subterráneas.