



# LAS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN LOS MODELOS DE USO CONJUNTO DE LAS CUENCAS MEDITERRÁNEAS

Bruno J. Ballesteros Navarro

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA

## AGUAS SUBTERRÁNEAS

- Las generadas en los acuíferos como cuerpo de agua o que discurren a través de ellos
- En **gestión hidrológica**: Las que pueden ser **moduladas/reguladas** de forma natural por los acuíferos

## AGUAS SUPERFICIALES

- Las generadas en las superficies de las cuencas hidrológicas y discurren a través de los ríos



**Aguas superficiales:** Observación y evaluación normalmente directa

**Aguas subterráneas:** Evaluación normalmente indirecta (visibles sólo cuando afloran)

## EL USO CONJUNTO AGUAS SUPERFICIALES/SUBTERRÁNEAS

Mayor proporción de aguas subterráneas = mayor regulación natural



Mayor capacidad para aplicar técnicas de uso conjunto

Los ríos son sistemas poco inerciales

Velocidad del agua en ríos: 0,5-2 m/s (86,4 km/día para  $V=1$  m/s)

Los acuíferos son sistemas muy inerciales

Velocidad del agua en acuíferos: 0,5 m/día- 20 m/día (Kársticos>)



3

## PRESENCIA AGUAS SUPERFICIALES/SUBTERRÁNEAS

Depende de:

- Precipitación y régimen de lluvias
- Presencia/ausencia de formaciones permeables: Acuíferos
- Dimensión y morfología de las cuencas hidrológicas y de los acuíferos



Cuencas mediterráneas: elevado porcentaje de los recursos hídricos corresponden a RECURSOS SUBTERRÁNEOS

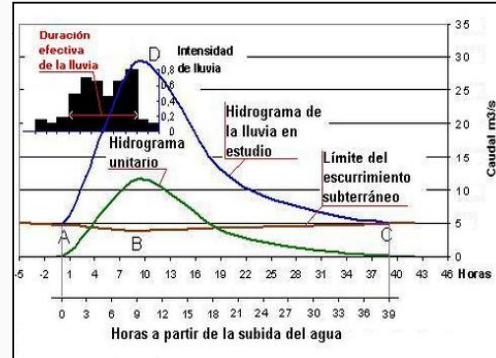
4

## LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS. Interés medioambiental

Constituyen el caudal base de ríos y zonas húmedas

### Cuencas mediterráneas

Mantienen ecosistemas acuáticos  
continentales en estiaje (> % A. sub.)

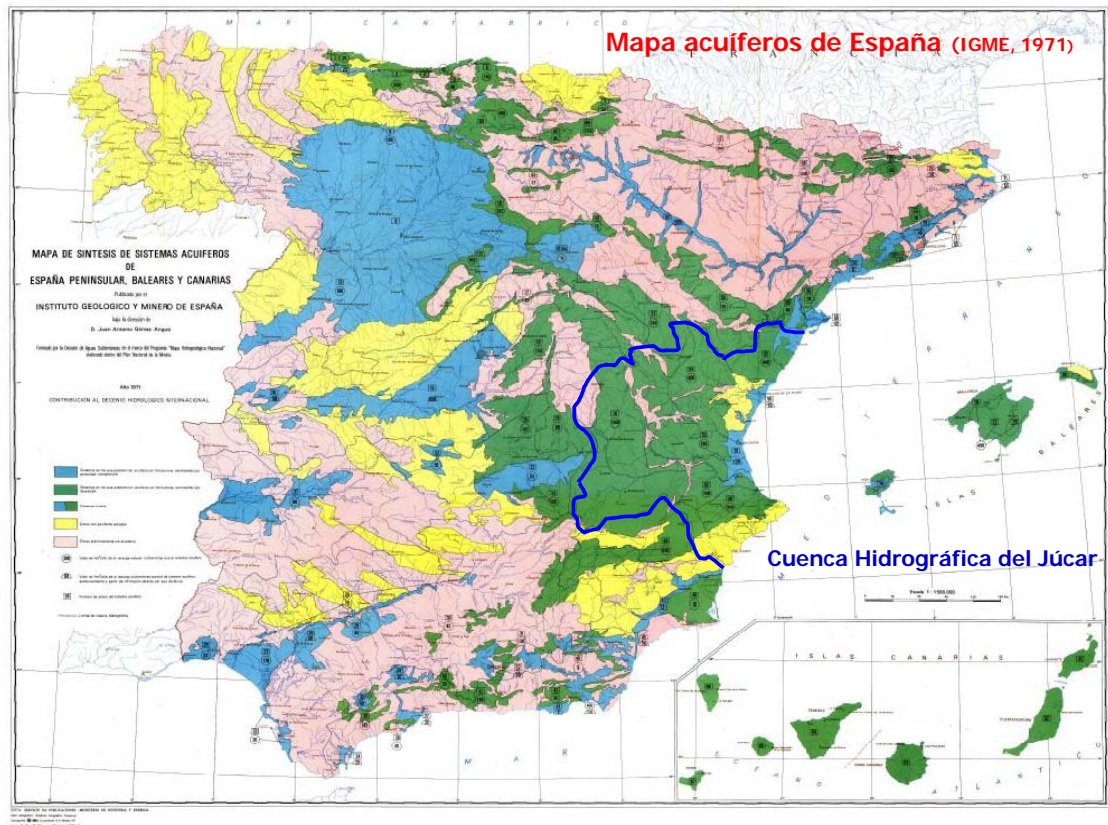


**Cuencas mediterráneas**  
**Son idóneas para aplicar USO CONJUNTO. Con limitaciones ambientales**

## LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CUENCAS MEDITERRÁNEAS

- Diferencias entre cuencas del norte de Europa y cuencas mediterráneas
  - Cuencas hidrográficas mediterráneas en España: entre **38-80%** (según cuencas) del total de recursos hídricos es de origen subterráneo
- Cuenca Júcar: 77 %** de 4.142 hm<sup>3</sup>/a (RD 1664/1998)





**INCORPORACIÓN DE LOS ACUÍFEROS A LOS MODELOS DE USO CONJUNTO. REQUERIMIENTOS BÁSICOS**

**Códigos matemáticos adecuados: Robustez, flexibilidad, capaces de introducir condicionantes en los sistemas acuíferos**

**Modelo conceptual de funcionamiento de la cuenca fiable (esquema topológico): Modelos que reproduzcan la realidad**

**Calidad de datos aceptable**



## LOS ACUÍFEROS EN LOS MODELOS DE USO CONJUNTO. ASPECTOS A CONSIDERAR

**NECESIDAD DE MODELAR ADECUADAMENTE LOS SISTEMAS ACUÍFEROS**  
(objetivo: optimización en el aprovechamiento de los recursos hídricos)

Volumen agua en acuíferos >>> volumen aguas superficiales

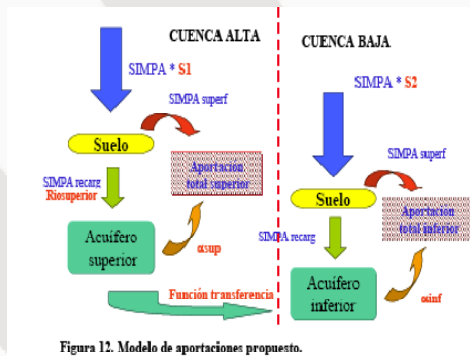
**REQUIERE MODELOS NUMERICOS DE ELEVADA EXIGENCIA COMPUTACIONAL**  
(modelos distribuidos de parámetros distribuidos)

## LOS ACUÍFEROS EN LOS MODELOS DE USO CONJUNTO. ASPECTOS A CONSIDERAR

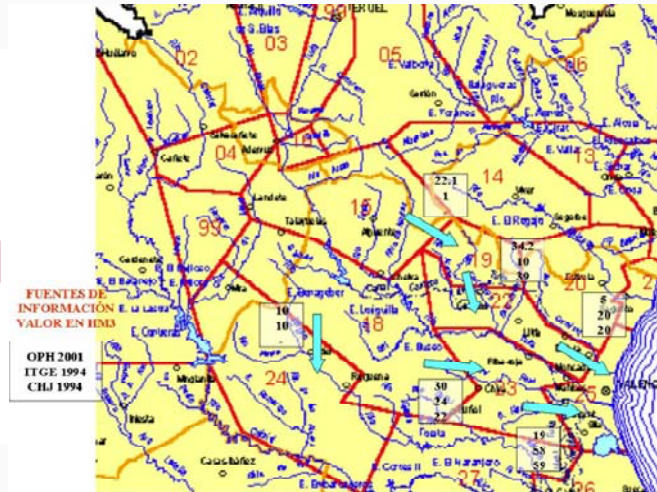
- Dificultad de conocer su funcionamiento
- Las reservas hídricas subterráneas. Curvas de llenado
- Descensos piezométricos (bombeos): Modificación del líneas de flujo
- Sobreexplotación: compartimentación
- Recarga inducida
- El problema de los límites abiertos:
  - acuíferos litorales (la intrusión marina)
  - salidas/entradas entre acuíferos. Conexiones concatenadas. Recirculaciones y bucles hídricos (retornos ...). Pérdidas embalses
- Condicionantes de calidad y requerimientos ambientales (usos, zonas húmedas, caudales ecológicos,). Limitaciones de la DMA (2000/60/CE)

## LOS ACUÍFEROS EN LOS MODELOS DE USO CONJUNTO. ASPECTOS A CONSIDERAR

- Comportamiento de los acuíferos en situaciones extremas (sequías)
- Desconocimiento de los mecanismos que controlan la relación río-acuífero. Tipologías



Thormann de Cistac



Fuente: CHJ

11

## LAS RESERVAS SUBTERRÁNEAS

### TIPOS DE RESERVAS DE UN ACUÍFERO (Ballesteros *et al*, 2009)

**Reservas Totales (RT):** Volumen de agua existente entre su base y la superficie piezométrica en un instante determinado

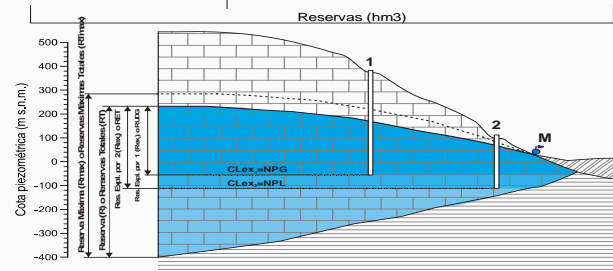
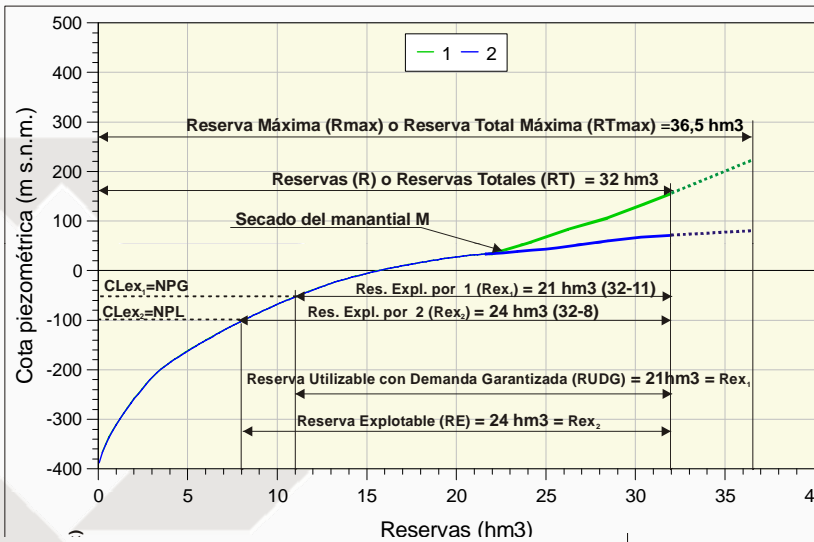
**Reservas Explotables por una captación (Rexca):** Limitadas por la profundidad de la captación

**Reservas Utilizables con Demanda Garantizada (RUDG):** Dada por la piezometría a partir de la cual alguna de las captaciones de un acuífero presenta fallos y no puede satisfacer totalmente la demanda

**Reservas Utilizables Totales (RUT):** Volumen de agua almacenado en un acuífero entre una superficie piezométrica definida para un momento dado y una cota, denominada Nivel Piezométrico Límite (NPL), a partir de la cual ninguna de las captaciones existentes puede extraer agua.

Pueden estar limitadas también por factores de calidad (uso) y ambientales.

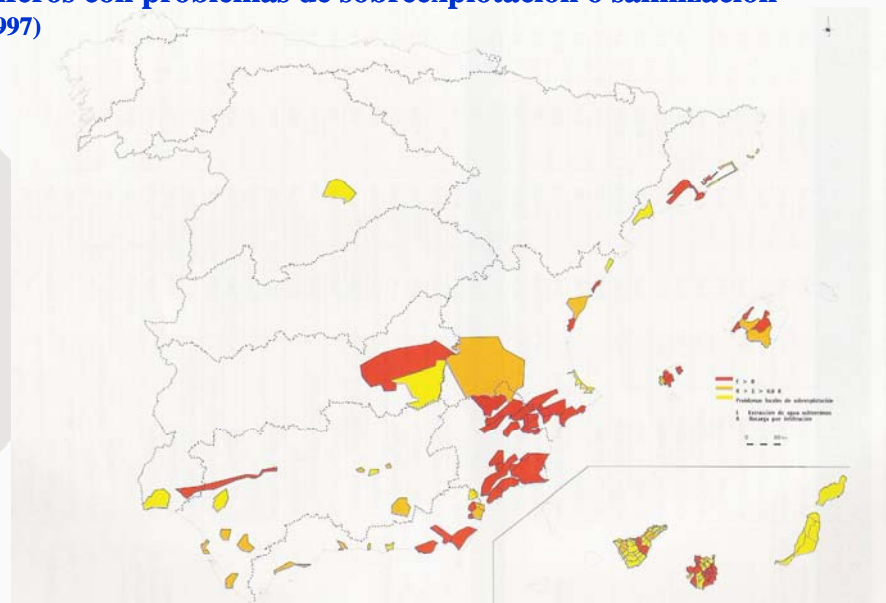
12



**CURVA DE LLENADO/VACIADO DE UN ACUÍFERO. TIPOS DE RESERVAS**

## LA SOBREEXPLORACIÓN

### Catálogo de acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización (DGOHCA-ITGE, 1997)

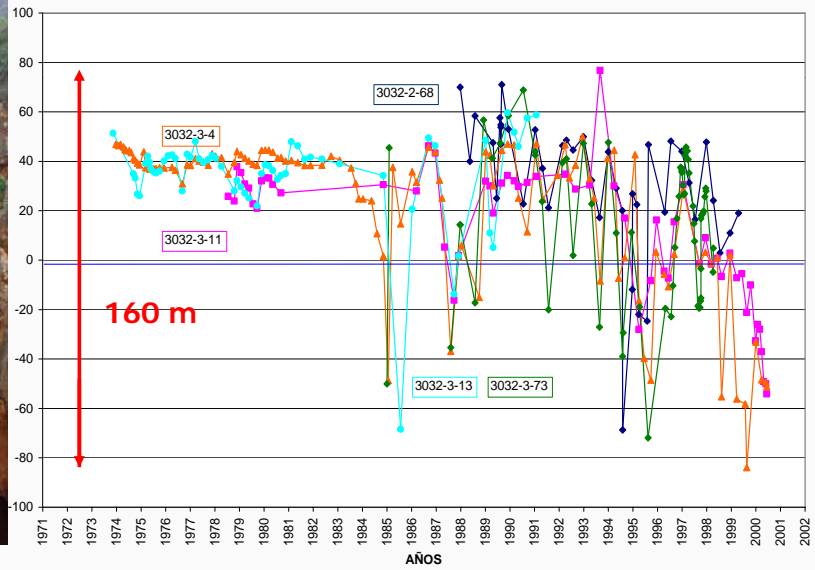


- ⇒ 77 acuíferos con problemas. Casi todos en el tercio suroriental peninsular e islas
- ⇒ 24 acuíferos pertenecen a las cuencas del Júcar y Segura.

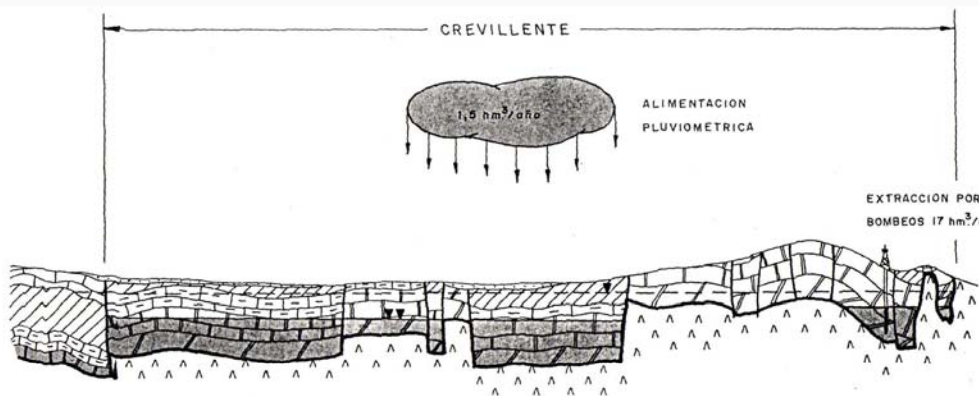
## LA SOBREEXPLOTACIÓN



EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO SOLANA DE LA LLOSA



## LA SOBREEXPLOTACIÓN. COMPARTIMENTACIÓN

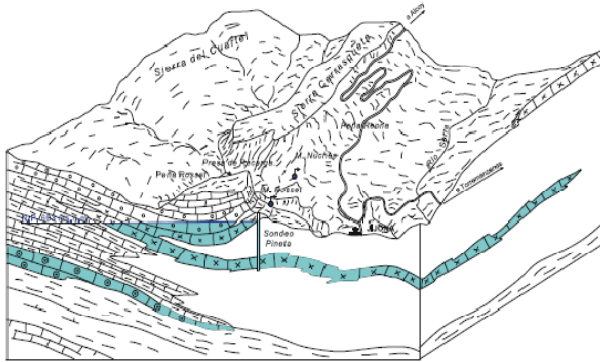


▼ N. P. 166 m.s.n.m. (1975)  
▼▼ N. P. 60-88 m.s.n.m. (1983)

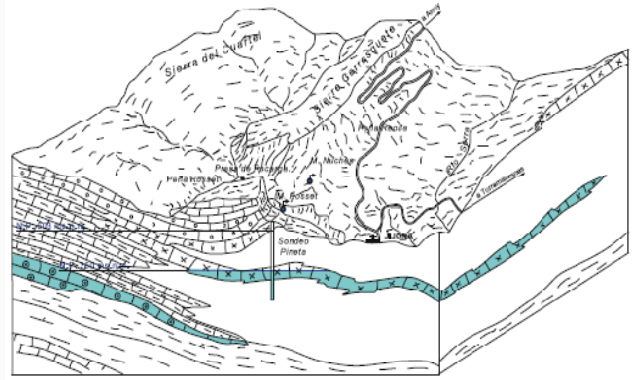


## LA SOBREEXPLOTACIÓN. CAMBIOS EN LA GEOMETRÍA

ACUÍFERO DE JIJONA

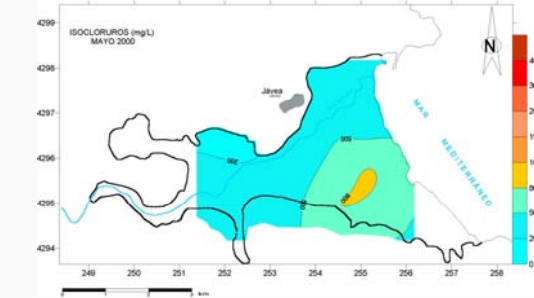
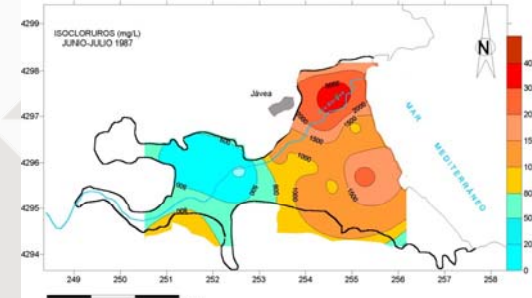
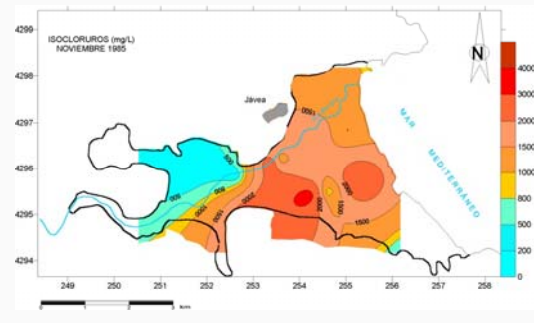
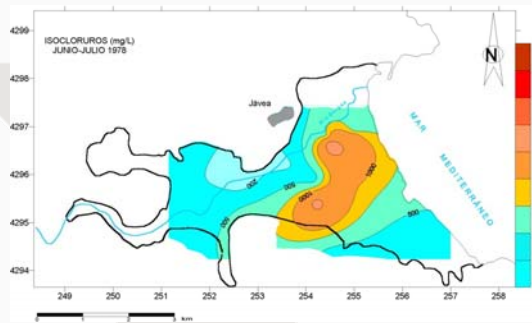


SITUACIÓN INICIAL



SITUACIÓN ACTUAL

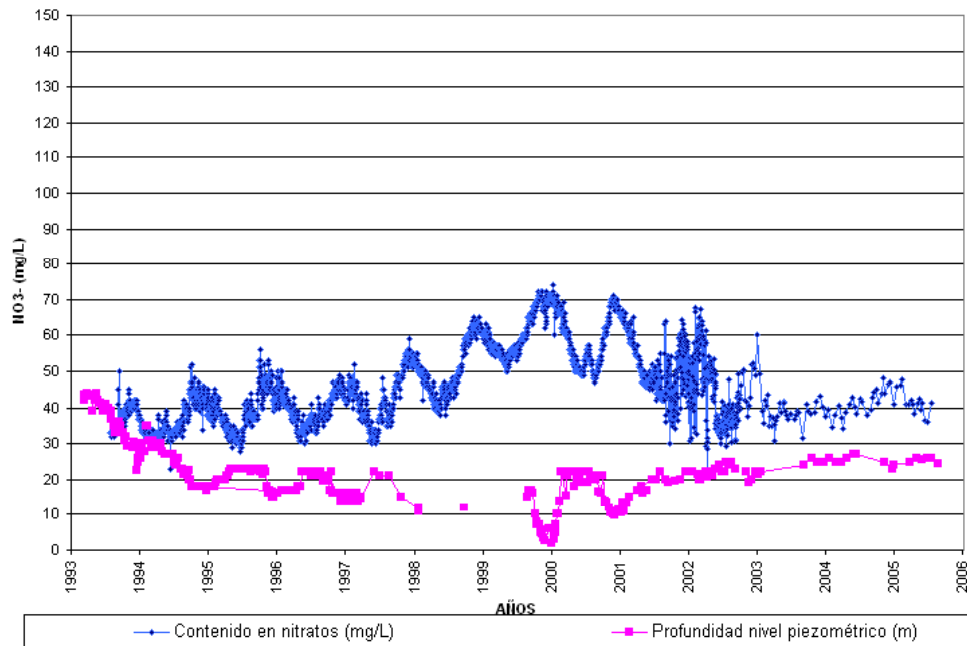
## LA INTRUSIÓN MARINA



ACUÍFERO PLANA DE JÁVEA

## CONDICIONANTES DE LA CALIDAD DEL RECURSO

RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO EN NITRATOS Y NIVELES PIEZOMÉTRICOS  
SONDEOS DE BARRANCO HONDO



19

## LOS ACUÍFEROS EN LOS MODELOS DE USO CONJUNTO

### ALGUNAS LÍNEAS DE ACTUACIÓN: POR DONDE ESTAMOS AVANZANDO

- Mejora conocimiento del funcionamiento de los acuíferos. Modelos determinísticos
- Mejora conocimiento del intercambio hídrico entre aguas superficiales y subterráneas en las cuencas hidrológicas
- Conceptualización de diferentes tipologías de relación río-acuífero

20



## FORMAS DE RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO

- Existe **intercambio hídrico** entre las aguas subterráneas y los cursos de agua superficial que discurren sobre formaciones permeables o se encuentran próximos a ellas
- Fenómeno **poco conceptualizado**, a pesar de su importancia. Literatura escasa
- Interacciones difíciles de observar y de medir: en muchos casos soslayadas o **minusvaloradas** en la gestión de los recursos
- **Clasificación simple** basada exclusivamente en el **sentido de la transferencia hídrica**: ríos ganadores o efluentes, cuando drenan recursos hídricos de un acuífero, y perdedores o influentes, cuando ceden al flujo subterráneo parte su caudal (Winter TC, et al. 1998)
- **U.S. Geological Survey (Winter TC, et al. 1998)** recopila la información básica de los diferentes ámbitos donde tiene lugar, tanto desde el punto de vista del medio físico y climático como hidroquímico



## FORMAS DE RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO

### Factores condicionantes de la relación río-acuífero

- **Geológicos**: naturaleza y disposición tecto-estratigráfica de las formaciones geológicas
- **Geomorfológicos**: geometría cauce (anchura-profundidad), sinuosidad, pendiente (tiempo de residencia), sistema deposicional.

- **Hidrológicos**: régimen fluvial

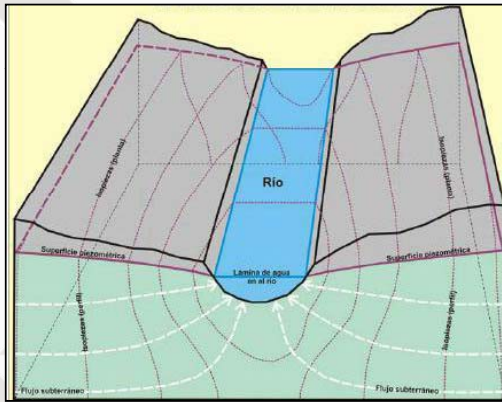
- **Hidráulicos**: conductividad hidráulica, conductancia hidráulica, potenciales hidráulicos

### Criterios tipológicos de la relación río-acuífero

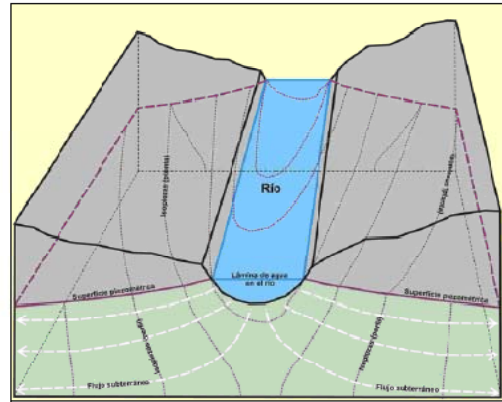
- A) Sentido de la relación hídrica
- B) Existencia de continuidad/discontinuidad hidráulica
- C) Características espaciales de la relación
- D) Temporalidad

**CRITERIOS TIPOLOGICOS DE LA RELACION RÍO-ACUÍFERO**

**A) Sentido de la relación hídrica**



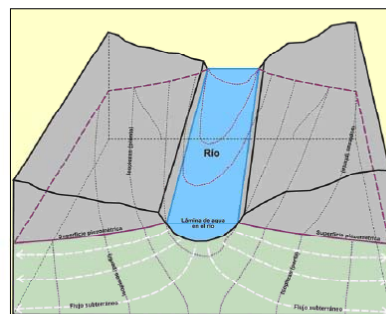
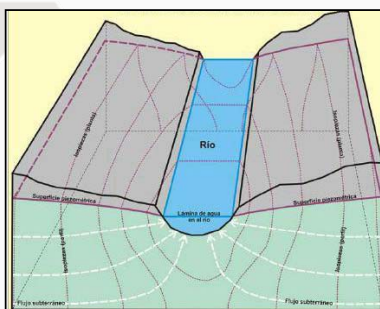
**Efluente (río ganador)**



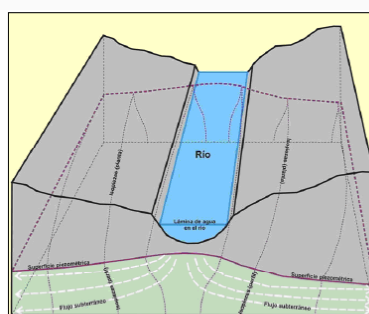
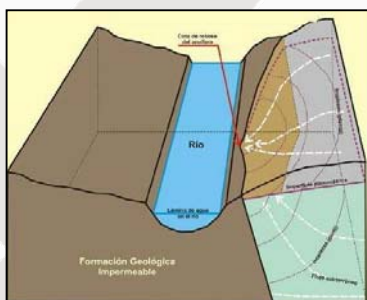
**Influente (río perdedor)**

**TIPOLOGÍAS DE LA RELACION RÍO-ACUÍFERO**

**B) Continuidad/discontinuidad hidráulica**



**Continuidad hidráulica**



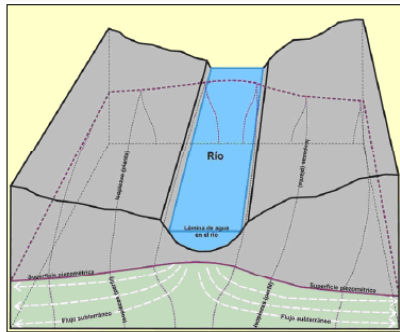
**Discontinuidad hidráulica**



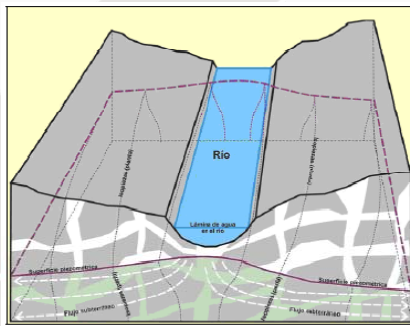
**TIPOLOGÍAS DE LA RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO**

**C) Característica espacial de la relación**

- puntual
- grupal
- difusa
- múltiple



Transferencia difusa. Acuíferos con permeabilidad por porosidad

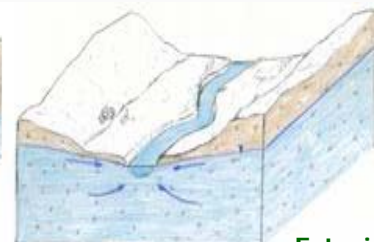


Transferencia puntual (grupal). Acuíferos por permeabilidad por fisuración/karstificación

**TIPOLOGÍAS DE LA RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO**

**D) Temporalidad: Permanente, estacional, ocasional**

Lluvias estacionales



Estacional

PERIODO SECO

PERIODO HÚMEDO

Episodio torrencial

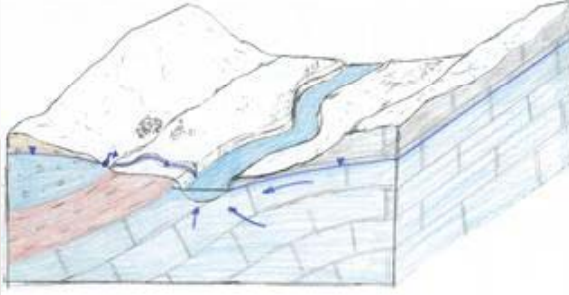
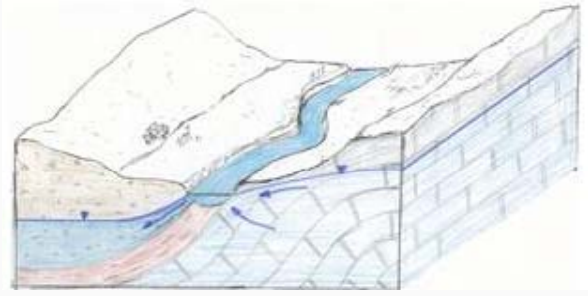
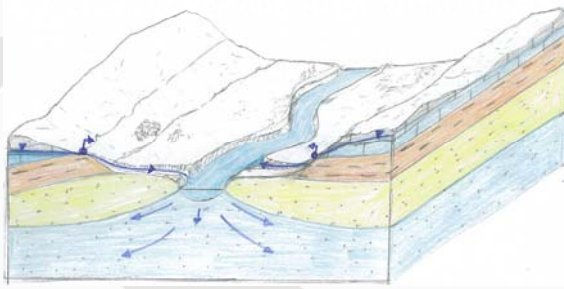


Ocasional

(Ballesteros et al, en elaboración)

t

## TIPOLOGÍAS DE LA RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO



Relaciones río-acuífero de tipo mixto

(Ballesteros *et al*, en elaboración)

27

## MEJORA DEL CONOCIMIENTO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS. MODELACIÓN NUMÉRICA DE ACUÍFEROS

- **Comportamiento de los sistemas acuíferos:** modelado de forma precisa mediante modelos determinísticos detallados, especialmente en condiciones extremas.
- **Integración en modelos de uso conjunto:** mediante modelos simplificados que reproduzcan el comportamiento y los condicionantes operativos obtenidos en el modelo de detalle. (Causa: elevados requerimientos computacionales)

28

**MEJORA DEL CONOCIMIENTO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS. MODELACIÓN NUMÉRICA DE ACUÍFEROS**

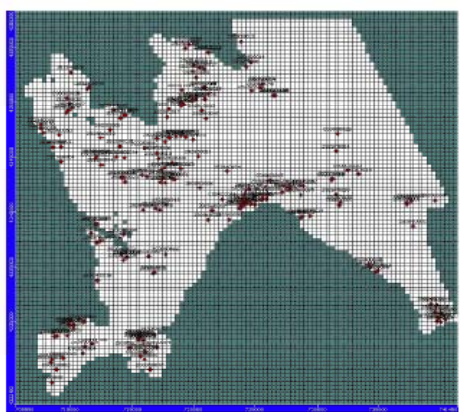
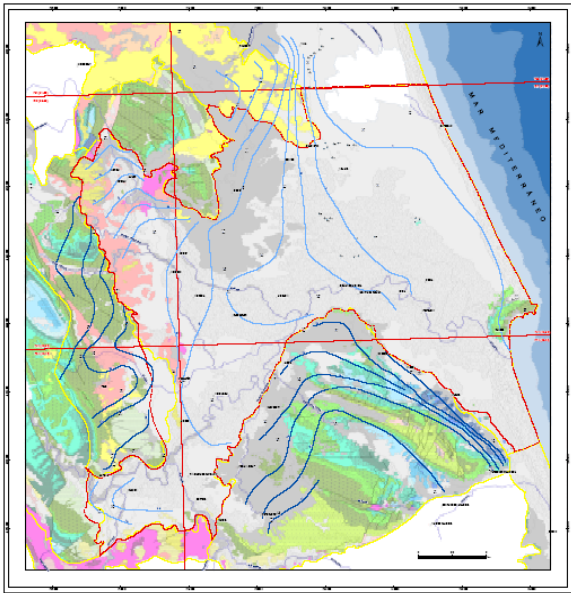


Figura 17.- Ubicación de los bombeos tratados en el modelo numérico

Celdas 100x100 (359 m x359 m)  
1.289 km<sup>2</sup>

MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA PLANA VALENCIA SUR

IGME en colaboración con la CHJ

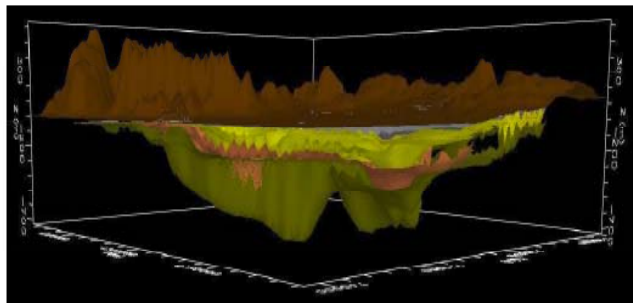
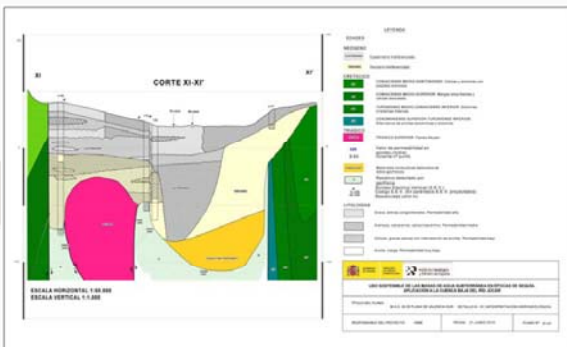
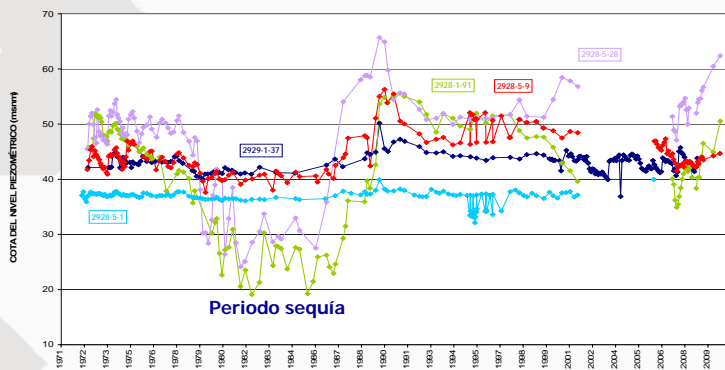
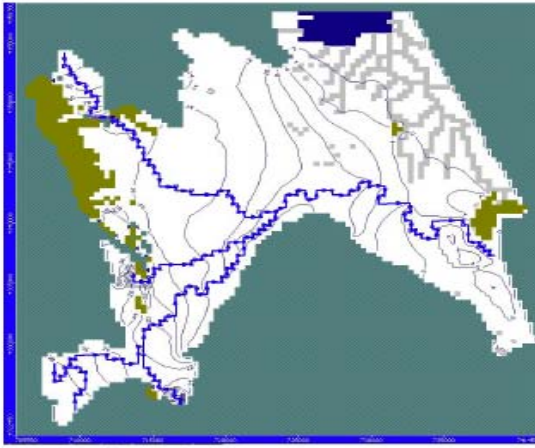


Figura 6.- Estructura resultante tras procesar MODFLOW los datos de entrada. Imagen obtenida por medio de ArcView

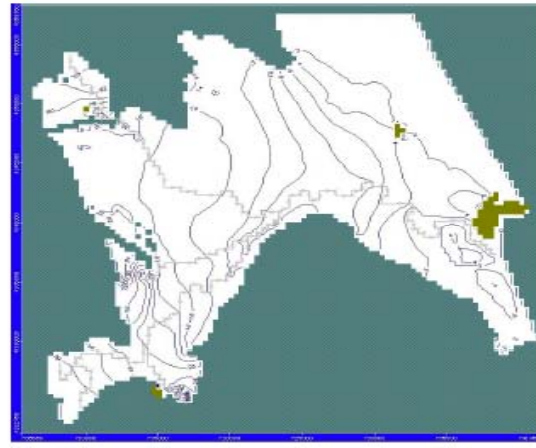


**Integración de datos geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos**

**MEJORA CONOCIMIENTO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS.  
MODELACIÓN NUMÉRICA DE ACUÍFEROS**



Superficie piezométrica  
capa 1



capa 2

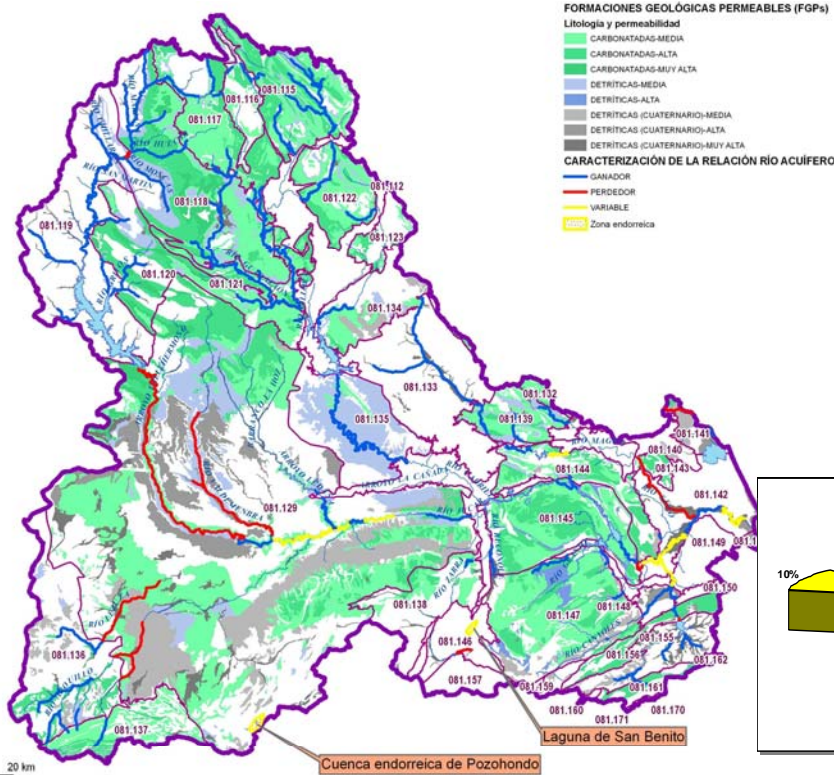
**MEJORA CONOCIMIENTO DEL INTERCAMBIO HÍDRICO EN LAS CUENCAS  
HIDROLÓGICAS. TRABAJOS PREVIOS**

“Identificación y caracterización de la interrelación entre aguas subterráneas cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés”.

Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua (2010)

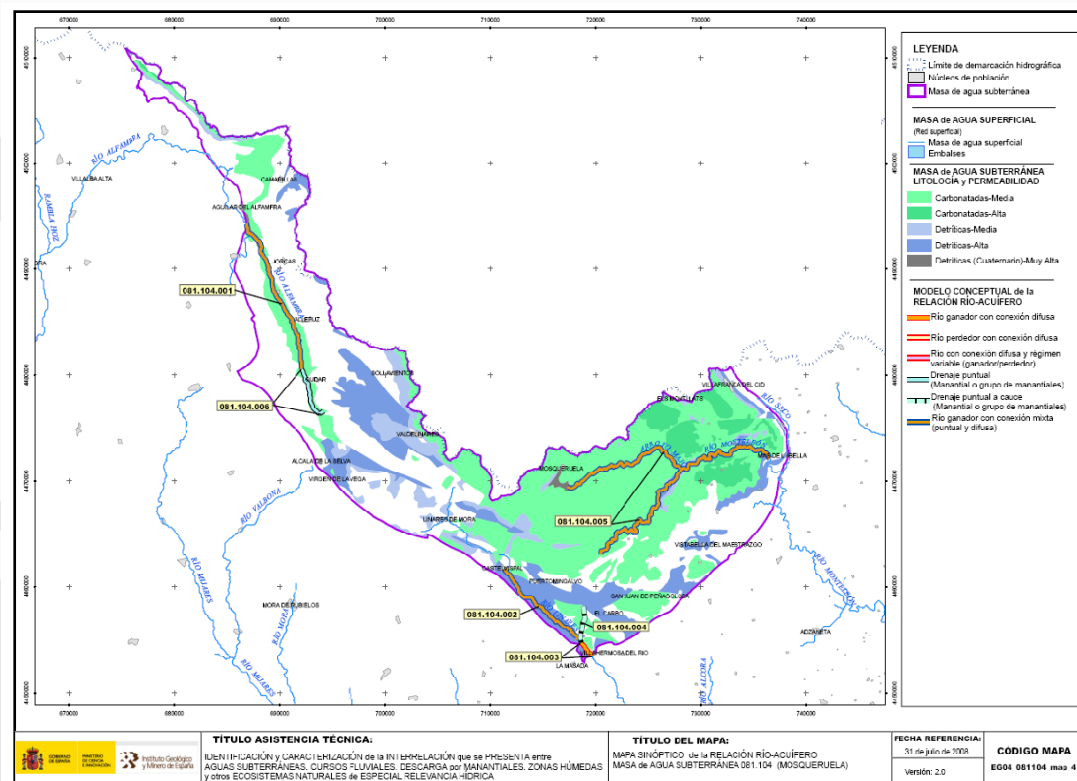


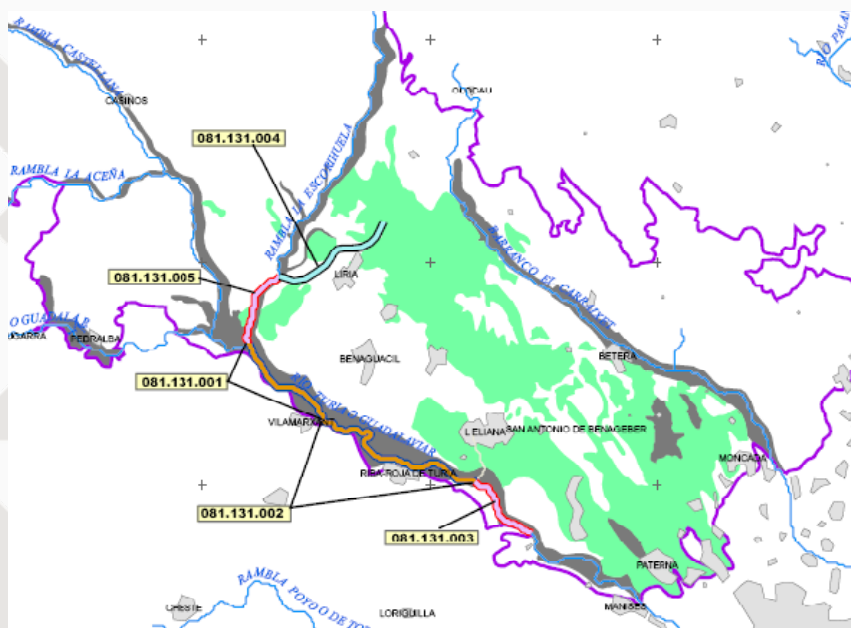
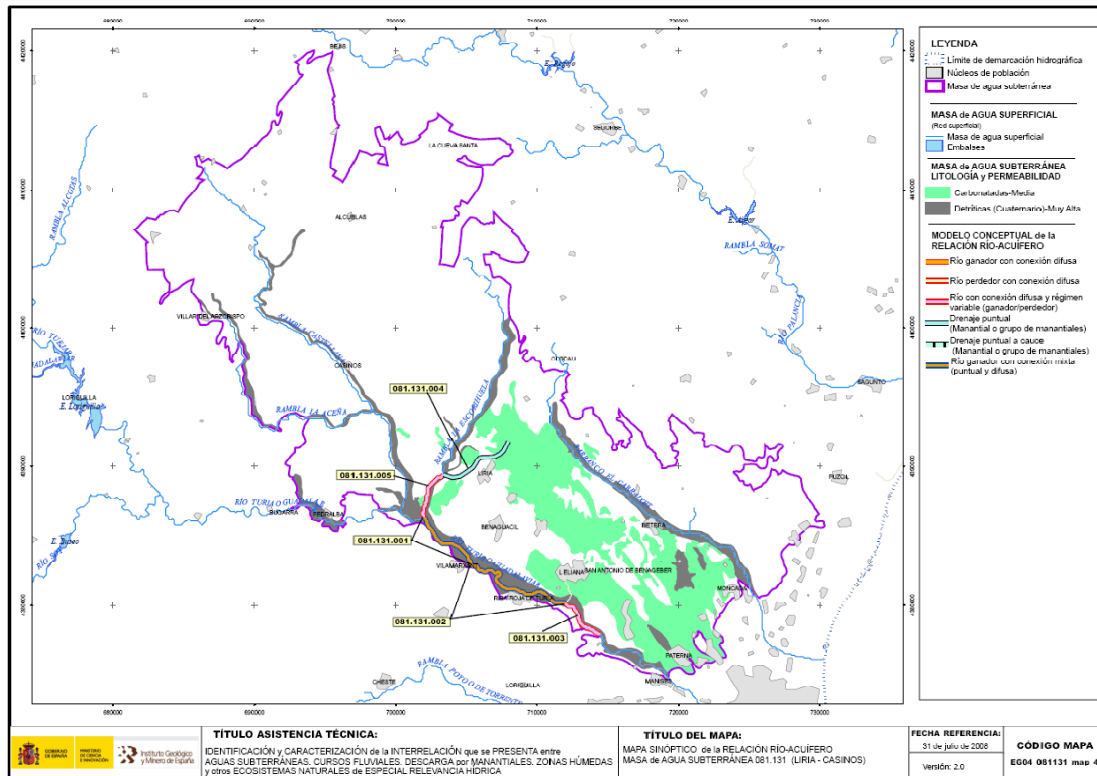




Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua (2010)

Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua (2010)





Cauce	Tramo	Relación río-acuífero en el cauce	Cuantificación de la relación	Referencia para la cuantificación
Río Júcar	Nacimiento – río Huécar, incluyendo sus afluentes	Ganador por cauce y manantiales	51,2 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
	Río Huécar – Río Moscas	Perdedor	No cuantificado	
	Río Moscas – Embalse de Alarcón, incluyendo sus afluentes	Ganador por cauce y manantiales	19,6 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
	Embalse de Alarcón – El Picazo	Perdedor	No cuantificado	
	El Picazo – Los Yesares, incluyendo el río Valdemembra aguas abajo de Villanueva de la Jara	Perdedor	50,7 hm <sup>3</sup> /año por cauce	Aforos diferenciales en situación actual
	Los Yesares – Valdeganga	Ganador por manantiales	5,0 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
	Valdeganga – La Recueja	Variable	No cuantificado	
	La Recueja – Las Eras, incluyendo el arroyo Ledaña aguas abajo de Fuentealbilla	Ganador por manantiales	1,8 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
	Las Eras – Embalse del Molinar	Variable	No cuantificado	
	Embalse del Molinar - Jalance	Ganador por cauce	No cuantificado	
	El Naranjero – Tous	Ganador por cauce	No cuantificado	
	Dos Aguas – Embalse de Tous	Ganador por manantiales	0,5 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
	Embalse de Tous - Antella	Ganador por cauce y manantiales	0,6 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
	Antella – Río Sellent	Perdedor	No cuantificado	
	Río Sellent – Alcira	Variable	No cuantificado	
Alcira – Sueca	Ganador por cauce	No cuantificado		
Sueca – Cullera	Variable	No cuantificado		
Río Cabriel	Nacimiento – Pajaroncillo	Ganador por cauce y manantiales	15,5 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
	Pajaroncillo – Embalse de Contreras	Ganador por cauce y manantiales	5,6 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
	Afluentes del Cabriel, aguas arriba de Contreras	Ganador por cauce y manantiales	110,5 hm <sup>3</sup> /año por cauce	Aforos diferenciales
	Embalse de Contreras – Villatoya	Ganador por cauce y manantiales	46,7 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
Río Magro	Embalse de Forata – Macastre	Ganador por cauce y manantiales	5,1 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ
	Real de Montroy – Río Júcar	Perdedor	16,5 hm <sup>3</sup> /año por manantiales	Inventarios de IGME y CHJ

Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua (2010)

**MEJORA CONOCIMIENTO DEL INTERCAMBIO HÍDRICO EN LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS. TRABAJOS PREVIOS**

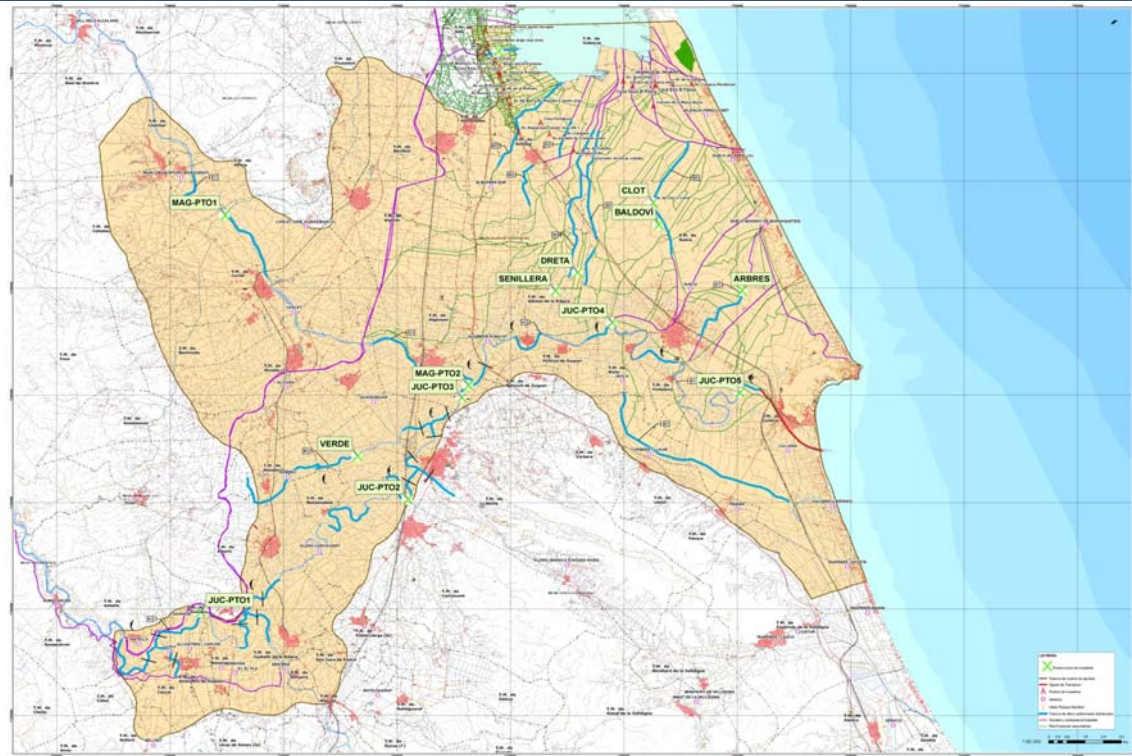
“Determinación de la relación hídrica de la MASub Plana Valencia Sur con La Albufera de Valencia y el río Júcar”



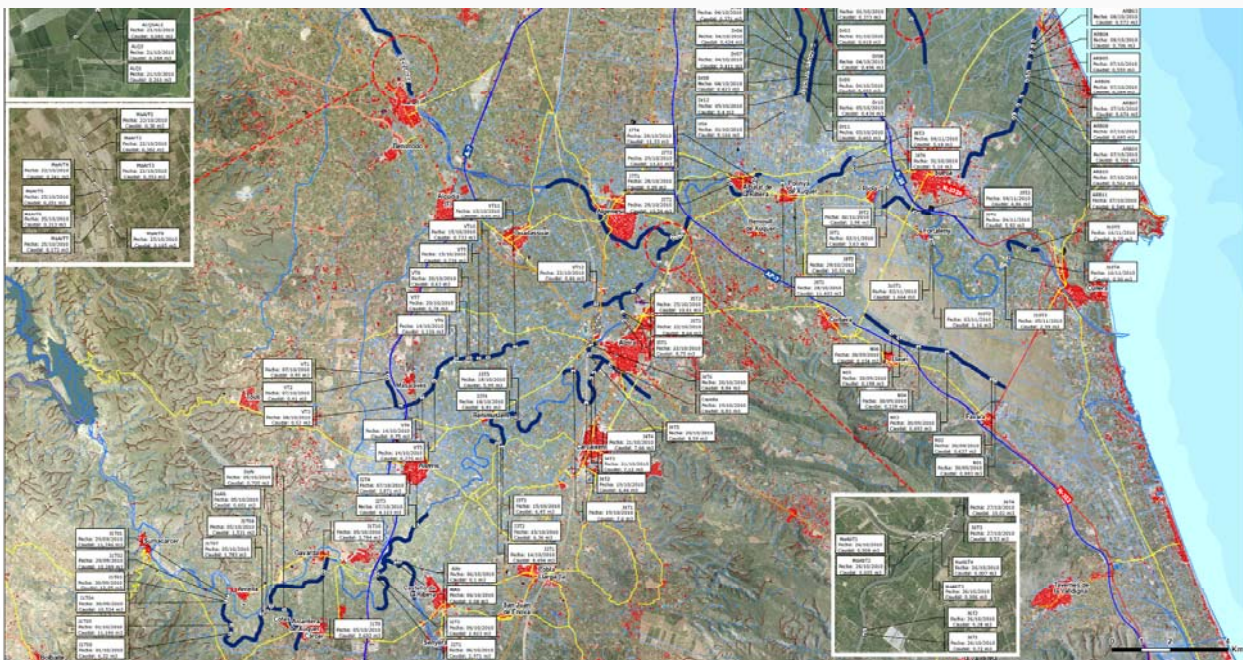
Figura 2. Los riegos tradicionales de la Ribera del Júcar

Instituto Geológico y Minero de España y Confederación Hidrográfica del Júcar (2011)





“Determinación de la relación hídrica de la MASub Plana Valencia Sur con la Albufera de Valencia y el río Júcar” IGME-CHJ (2011)



“Determinación de la relación hídrica de la MASub Plana Valencia Sur con la Albufera de Valencia y el río Júcar” IGME-CHJ (2011)



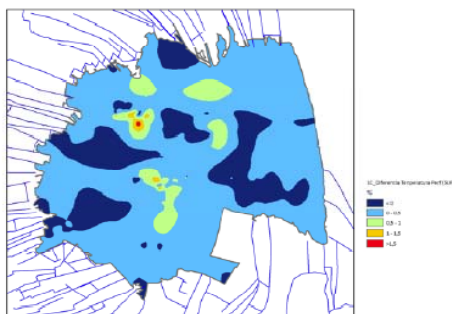


Figura 14. Plano del lago de la Albufera, diferencia entre temperatura superficial y temperatura en el mes de abril de 2011.

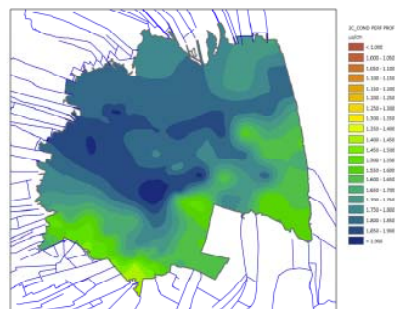


Figura 18. Plano de conductividad específica (µS/cm) en profundidad en lago de la Albufera en el mes de septiembre, elaborado a partir de perfiles en la columna de agua.

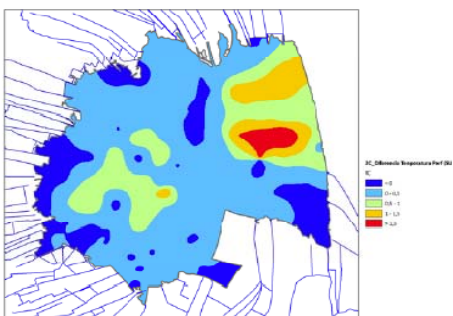


Figura 15. Plano del lago de la Albufera, diferencia entre temperatura superficial y temperatura en el mes de septiembre de 2011.

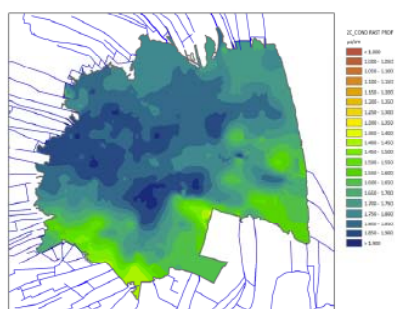
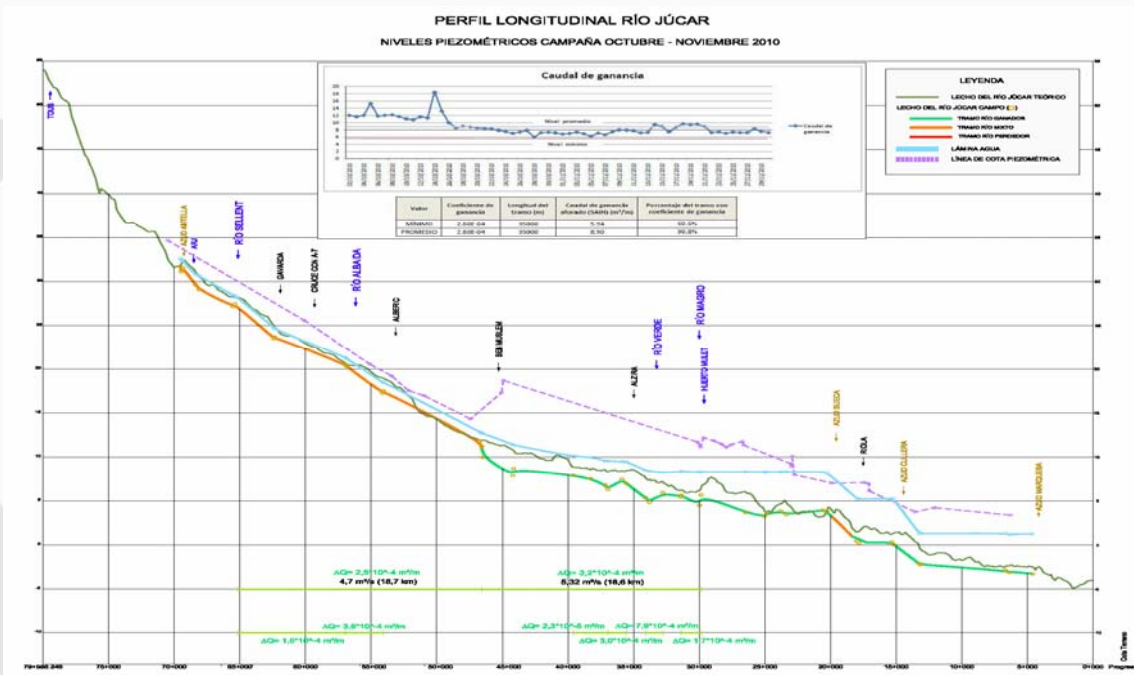


Figura 19. Plano de conductividad específica (µS/cm) en lago de la Albufera en el mes de septiembre, elaborado a partir de los rastreos en medición continua realizados mediante el CT ubicado a 90 cm. de superficie.

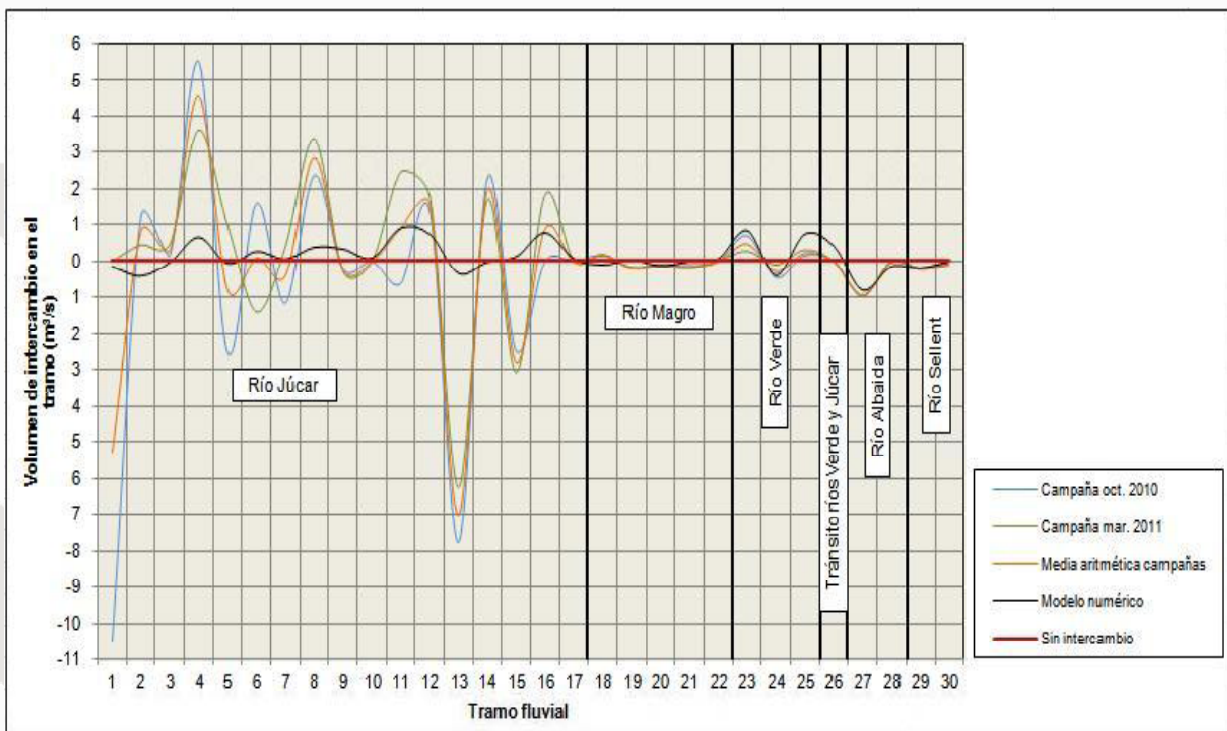
“Determinación de la relación hídrica de la MASub Plana Valencia Sur con La Albufera de Valencia y el río Júcar” IGME-CHJ (2011)



“Determinación de la relación hídrica de la MASub Plana Valencia Sur con La Albufera de Valencia y el río Júcar” IGME-CHJ (2011)



“Determinación de la relación hídrica de la MASub Plana Valencia Sur con La Albufera de Valencia y el río Júcar” IGME-CHJ (2011)



“Determinación de la relación hídrica de la MASub Plana Valencia Sur con La Albufera de Valencia y el río Júcar” IGME-CHJ (2011)

## CONSIDERACIONES SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS MODELOS DE USO CONJUNTO

### LO QUE SE ESPERA OBTENER

- Modelos conceptuales fiables sobre el funcionamiento de las cuencas hidrológicas que reproduzcan adecuadamente la realidad, incluidas las situaciones extremas
- Datos de base correctamente interpretados y optimizados. Datos representativos
- Resultados que permitan ser integrados en modelos de uso conjunto robustos, flexibles, capaces de introducir las limitaciones y condicionantes relacionados con los sistemas acuíferos



*Una buena base científica es la mejor garantía para la toma de decisiones y para el diseño de las políticas de gestión hidrológica más adecuadas*