

ENCOMIENDA DE GESTIÓN  
PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-  
TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y  
PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Actividad 3:  
Seguimiento y asistencia técnica en el proceso de planificación  
hidrológica



TRABAJOS DE APOYO EN LA DEFINICIÓN DE LA  
TRANSFERENCIA SUBTERRÁNEA DE LA MASUB  
BOQUERÓN CON OTRAS MASAS DEFINIDAS EN LA  
DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

Septiembre 2010



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE  
Y MEDIO RURAL Y MARINO



Instituto Geológico  
y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL  
DEL AGUA

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	5
2.	ANTECEDENTES .....	6
3.	GEOLOGÍA .....	20
3.1.	ESTRATIGRAFÍA .....	20
3.1.1.	Triásico (Tg) .....	20
3.1.2.	Jurásico .....	20
3.1.2.1.	Lías (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> ) .....	20
3.1.2.2.	Dogger (J <sub>3</sub> ) .....	21
3.1.2.3.	Oxfordiense (J <sub>3</sub> ) .....	22
3.1.2.4.	Kimmeridgiense (J <sub>4</sub> ) .....	22
3.1.3.	Cretácico .....	22
3.1.3.1.	Cretácico inferior (C <sub>1</sub> ) .....	22
3.1.3.2.	Cretácico superior (C <sub>2</sub> ) .....	22
3.1.4.	Mioceno (M) .....	23
3.1.5.	Plio-Cuaternario (PQ) .....	23
3.2.	TECTÓNICA .....	23
4.	HIDROGEOLOGÍA .....	26
4.1.	FORMACIONES PERMEABLES E IMPERMEABLES .....	26
4.2.	DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS .....	27
4.2.1.	Acuífero Boquerón .....	27
4.2.2.	Acuífero Umbría .....	28
4.2.3.	Acuífero Búhos .....	28
4.3.	FLUJO SUBTERRÁNEO .....	33
4.3.1.1.	Régimen natural .....	34
4.3.1.2.	Régimen influenciado .....	35
	Acuífero Búhos .....	38
	Acuífero Mancha Oriental, sector Pozohondo-Pozo Cañada .....	39
4.4.	ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO Y COHERENCIA CON LA DELIMITACIÓN GEOMÉTRICA DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA BOQUERÓN .....	43
4.4.1.	Estimación de la recarga media aplicando Visual Balan .....	44
4.4.2.	Análisis y calibración de los resultados obtenidos en la MAS Boquerón .....	46
4.4.3.	Estimación de la superficie permeable en régimen natural .....	51

4.4.4.	Estimación de la recarga mediante balance de cloruros .....	53
5.	RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	55
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	57

## **ANEXOS**

### 1. NIVELACIÓN DE SONDEOS

1.	SISTEMA DE REFERENCIA .....	60
A.	MÉTODO VRS (L1 fijo).....	60
B.	MÉTODO CINEMÁTICO CON POST PROCESADO (PPK) .....	61
2.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	62

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1. Campaña piezométrica en la zona de estudio.....	33
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Esquema básico de una divisoria piezométrica (Grannemann 2000, en Reilly 2001) .....	30
Figura 4.2. Adaptación del esquema de Grannemann (2000) para explicar de un modo simplificado el funcionamiento del límite septentrional del acuífero Búhos en régimen natural.....	30
Figura 4.3. Esquema básico de variación de la posición de una divisoria piezométrica a consecuencia de la distribución de las extracciones (modificado de Grannemann 2000) .....	31
Figura 4.4 Superficie de los materiales permeables de los acuíferos. ....	32
Figura 4.5. Hidrometría de la fuente de Isso (acuífero Boquerón-Umbría) .....	34
Figura 4.6. Hidrometría de la fuentes Polope y Mercedes .....	35
Figura 4.7. Evolución piezométrica en los sondeos 2433-50051 y 2533-10022 .....	37
Figura 4.8. Evolución piezométrica en el sondeo 253310011 .....	37
Figura 4.9. Evolución piezométrica en el sondeo 2533-50003.....	38
Figura 4.10. Evolución piezométrica en el sondeo 2532-70063.....	39
Figura 4.11. Evolución piezométrica en el sondeo 2532-20042.....	39
Figura 4.12. Evolución piezométrica en el sondeo 08.09.005 .....	40
Figura 4.13. Evolución piezométrica en el sondeo 08.09.036 .....	40
Figura 4.14. Evolución piezométrica en el sondeo 08.09.040 .....	40
Figura 4.15. Evolución piezométrica en el sondeo 08.09.074 .....	41
Figura 4.16. Distribución temporal de la precipitación y la recarga en la MAS Boquerón a partir de los datos extrapolados de la MAS Alcadozo. ....	47
Figura 4.17. Evolución histórica de los niveles piezométricos y su relación con las cotas de salida de los principales manantiales en la MAS Boquerón. ....	48
Figura 4.18. Evolución histórica de las descargas por manantial en la MAS Boquerón .....	49
Figura 4.19. Distribución espacial histórica de puntos de agua en la MAS Boquerón (en negro: puntos procedentes de la base de datos IGME; en azul: puntos procedentes del informe de sobreexplotación de la CHS en 2006). ....	50

## **INDICE DE PLANOS**

1. MAPA HIDROGEOLÓGICO
2. CORTES HIDROGEOLÓGICOS
3. MAPA DE FLUJO SUBTERRÁNEO
4. DIFERENCIAS ENTRE LÍMITES DE ACUÍFEROS PROPUESTOS Y LÍMITES DE ACUÍFEROS EXISTENTES

## 1. INTRODUCCIÓN

Con fecha 29 de septiembre de 2007 se estableció entre el actualmente denominado Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua), y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), del Ministerio de Ciencia e Innovación, la Encomienda de Gestión titulada **Realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas**, que viene a dar continuidad a anteriores convenios de colaboración con el fin de compartir con el IGME su conocimiento territorial y experto. Entre las actividades previstas en dicha encomienda, se encuentra la número, 3, denominada **Seguimiento y asistencia técnica en el proceso de planificación hidrológica**, en la cual se enmarca el presente Estudio.

En el año 2008, se ha abierto un nuevo periodo de Planificación hidrológica de las diferentes cuencas intercomunitarias e intracomunitarias, correspondiendo al Estado Central la elaboración de las primeras. Para ello se ha previsto un programa que, iniciado en el año 2008, debe finalizar en 2010, según establece la Directiva Marco del Agua. En este nuevo proceso de planificación está previsto incorporar las aguas subterráneas teniendo en cuenta el papel estratégico que estas pueden jugar tanto en periodos de sequía como en emergencia, así como en el suministro de agua potables a muchos núcleos urbanos y a los regadíos, además de su relevancia para el sostenimiento y conservación del medio ambiente hídrico.

Siguiendo los planteamientos recogidos en la Encomienda, se plantea como objetivo principal el de ofrecer apoyo técnico a la actualización de los Planes hidrológicos de cuenca en materia de aguas subterráneas

Es precisamente en este sentido en el que se formula el presente Estudio, como asesoramiento experto solicitado por la Oficina de Planificación de la Demarcación Hidrográfica del Segura, en el sector norte de la masa de agua subterránea Boquerón, con los objetivos siguientes:

- Definición y caracterización geométrica de los acuíferos en el límite entre las cuencas del Segura y Júcar.
- Establecimiento del funcionamiento hidrogeológico en esta zona (acuífero Boquerón).
- Evaluación de la recarga y coherencia con la delimitación geométrica.
- Estimación del posible intercambio de flujo subterráneo entre las cuencas.
- Incertidumbres no resueltas y propuestas de investigación futura.

Este Estudio ha sido realizado por el Instituto Geológico y Minero de España, a través de su Oficina de Murcia, con la colaboración en las cuestiones infraestructurales de la empresa Intecsa-Inarsa, S.A.

El equipo de trabajo es el siguiente:

Ramón Aragón Rueda (IGME). Director del Estudio  
Jorge Enrique Hornero Díaz (IGME)  
Clemente Trujillo Toro (IGME)  
Luis Solís García-Barbón (Intecsa-Inarsa)  
José Antonio Bernedo Garrido, José Antonio García Fernández (Intecsa-Inarsa)

## 2. ANTECEDENTES

La zona comprendida en la actualmente denominada masa de agua subterránea Boquerón (070.004) dispone de un conocimiento hidrogeológico precario, pues su investigación se remonta a la década de los años 70 y principios de los 80, dentro de las actividades llevadas a cabo por el IGME en el marco del Programa Nacional de Investigación de las Aguas Subterráneas de España (PIAS) y comienzos del siguiente Programa de Gestión y Conservación de Acuíferos (PGCA). Entre las referencias más significativas cabe mencionar las siguientes:

### **- IGME (1979): Investigación hidrogeológica de la cuenca alta de los ríos Júcar y Segura.**

Se basa en las investigaciones iniciadas en 1969 por el IGME con el Estudio hidrogeológico Cazorla-Hellín-Yecla y constituye una segunda fase del mismo, ahora dentro del programa PIAS. Se trata de un estudio de hidrogeología regional en el que la actual masa de agua subterránea queda englobada dentro de lo que denomina "Unidad de Albacete" o "Unidad Norte: Sistema hidrogeológico de Albacete" (figura 2.1). Dicha unidad se extiende ampliamente por la provincia de Albacete y comprende incluso el extremo meridional de la de Cuenca, abarcando una superficie de 8500 km<sup>2</sup> (figura 2.2). Ya en este informe se señalaba la importante extracción de aguas subterráneas de que era objeto y las expectativas de su incremento.

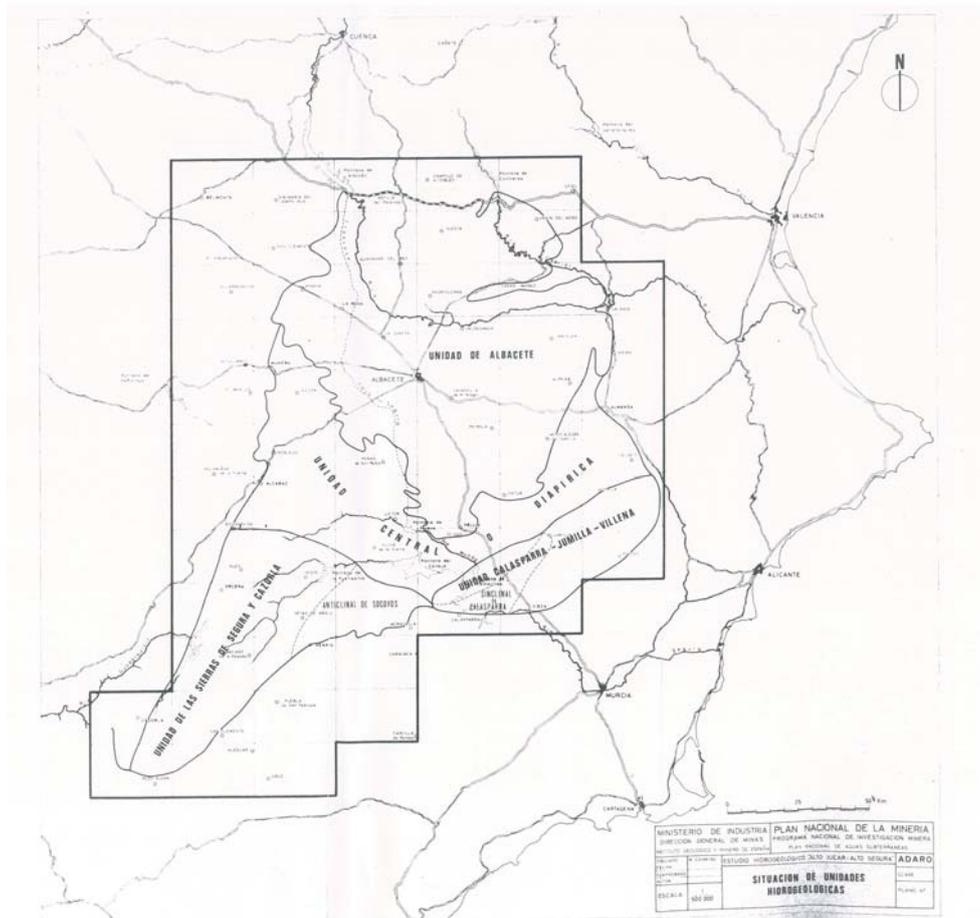


Figura 2.1 Localización de unidades hidrogeológicas (IGME, 1979)



Figura 2.2. Localización de la unidad hidrogeológica de Albacete (IGME, 1979)

Se definieron tres acuíferos principales constituidos por dolomías del Dogger (formación Chorro), calizas y dolomías del Cretácico superior (formación Benejama) y materiales calizos y detríticos del Terciario-Cuaternario. El primero de ellos es el de mayor importancia, mientras que el último presenta un interés reducido y variable espacialmente (figura 2.3).

En la Llanura de Albacete estos acuíferos se encuentran superpuestos e hidráulicamente conectados vertical o lateralmente según los sectores, constituyendo un único acuífero multicapa que es drenado por el río Júcar. En el extremo meridional del sistema sólo está presente el acuífero Chorro, en conexión hidrogeológica con la zona de la Llanura de Albacete y drenado en parte por el límite sur del sistema (manantiales de la zona de Hellín-Toborra, evaluados entonces en unos 15 hm<sup>3</sup>/año) Este esquema global es más complicado a escala local por la existencia de numerosas discontinuidades estratigráficas y tectónicas (cambios de facies, fallas, etc.).

# COLUMNA LITOLÓGICA SINTÉTICA

## SISTEMA HIDROGEOLOGICO DE ALBACETE

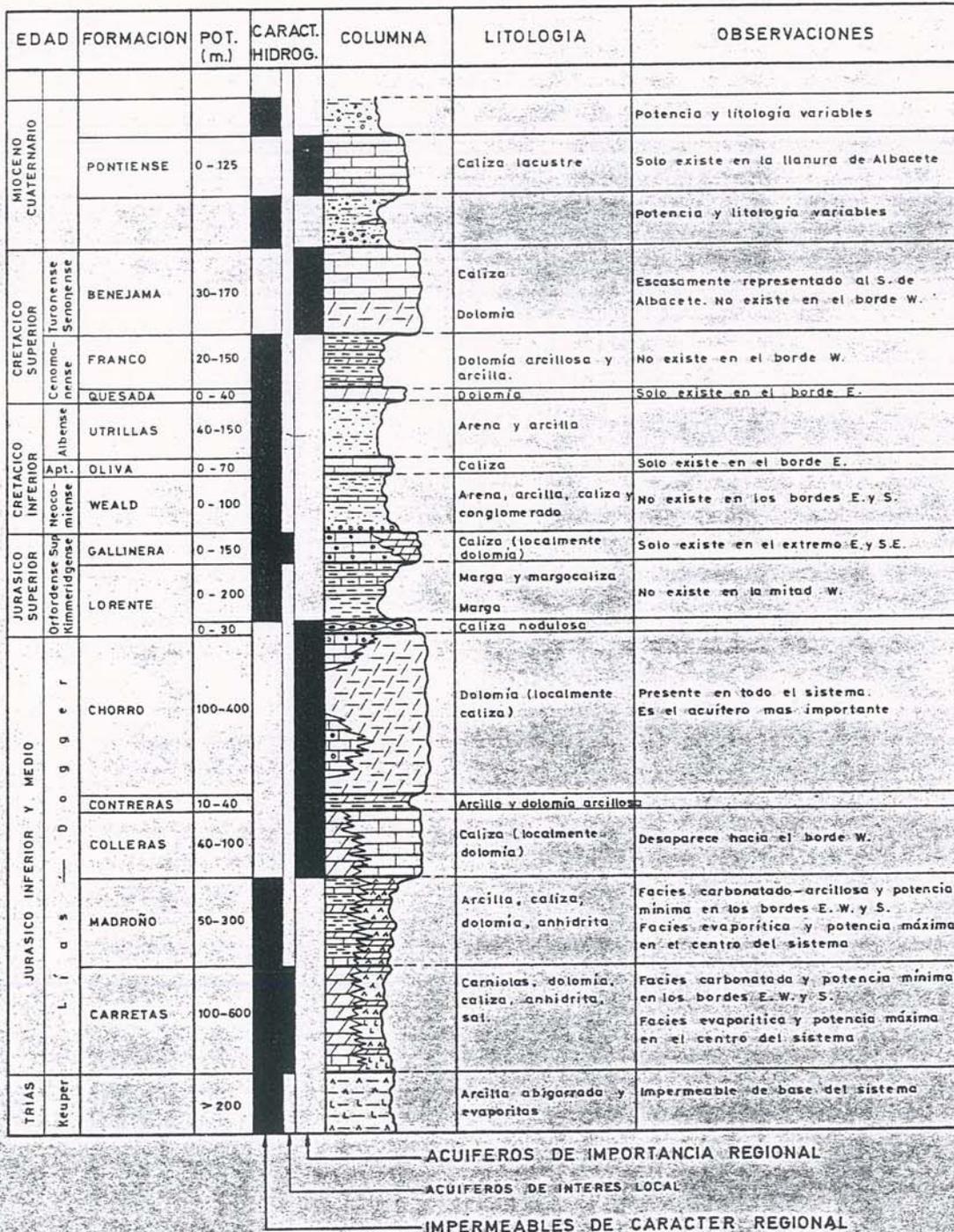
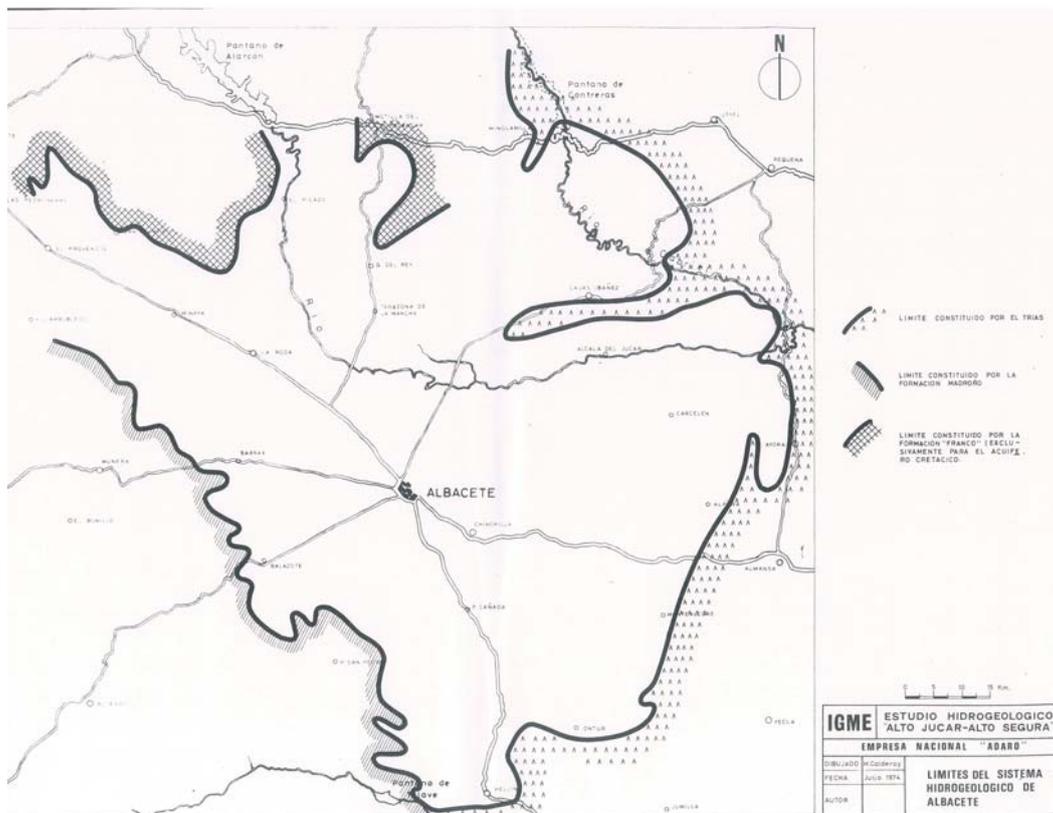


Figura. 2.3. Columna litológica sintética de la U.H. de Albacete (IGME, 1979)

A grandes rasgos, se distinguieron hidrogeológicamente dos zonas que, aunque conectadas hidráulicamente, presentan características diferentes: zona de la Llanura de Albacete y zona de tectónica en teclas de piano. La primera incluye los sectores central y septentrional del sistema y en ella están representados los tres acuíferos importantes antes mencionados, conectados en el sector central, y con el flujo subterráneo condicionado por el río Júcar hacia el que se produce el drenaje. La segunda zona ocupa el extremo meridional del sistema, está constituida por una serie de alineaciones montañosas correspondientes a los afloramientos de las dolomías del Dogger (único acuífero de interés aquí representado) y se encuentra compartimentada en subsistemas relacionados entre sí y limitados en la mayoría de los casos por barreras de transmisividad. En esta zona, a través de las fallas o de los núcleos de los anticlinales existentes, puede darse localmente una interrupción hidráulica en el acuífero, pero este hecho no es general, siendo frecuente, sin embargo, que se produzca una importante disminución de potencia saturada del acuífero en esos lugares, lo que crea una serie de "barreras de transmisividad" que generan diferencias bruscas de la piezometría entre ambos lados de los mismos. De esta manera se definieron bloques con diferentes piezometrías, pero hidráulicamente comunicados. La circulación subterránea muestra por una parte un gradiente hacia el norte comunicándose hidráulicamente con la Llanura de Albacete y, por otra, en el sector meridional, con gradiente general hacia el sur produciéndose la descarga a través del límite meridional (manantiales de Hellín-Tobarra).

En la figura 2.4 se observa la naturaleza de los límites del sistema y en la figura 2.5 la referida sectorización. Es de resaltar el carácter abierto del borde septentrional, entre los embalses de Alarcón y Contreras, por donde el sistema recibe una alimentación subterránea importante, en especial en lo que se refiere al acuífero Jurásico.



## 2.1.

Figura 2.4. Límites de la U.H. de Albacete (IGME, 1979)

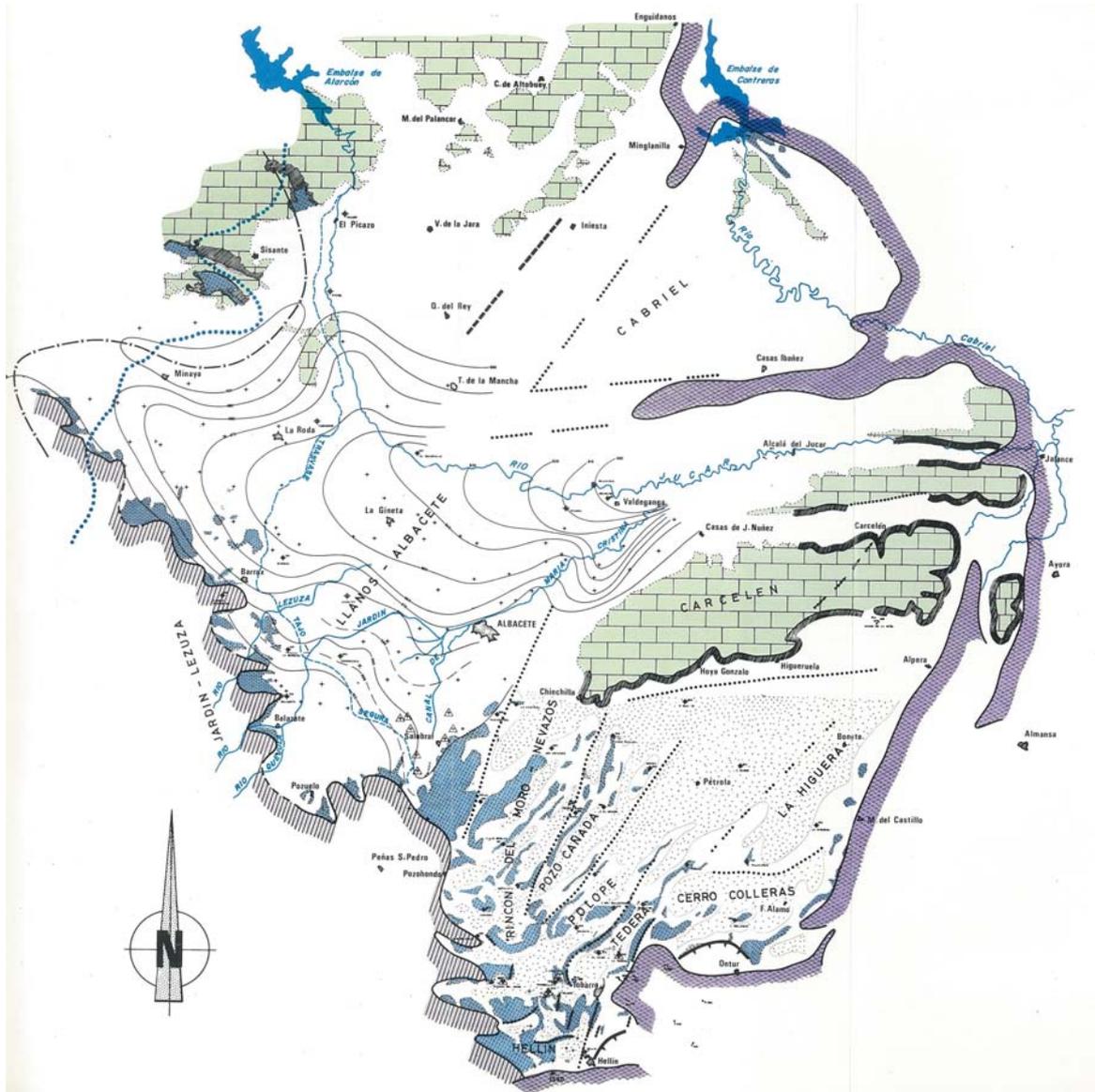


Figura 2.5. Sectorización de la U.H. de Albacete (IGME, 1979)

*Piezometría y circulación del agua en la zona de “tectónica en teclas de piano”*

Ya se ha puesto de manifiesto anteriormente la existencia en esa zona de barreras hidrogeológicas o de transmisividad que delimitan una serie de compartimentos. Las características de los mismos en lo que se refiere a su piezometría son las siguientes:

- Rincón del Moro – Nevazos. Su piezometría se sitúa sobre los 680 m s.n.m. con gradientes muy suaves, alrededor de 0,2 por mil, que indican la fuerte transmisividad del acuífero. Puede distinguirse asimismo un pequeño umbral (sondeos de: Ontalafia, Nava de Abajo y Judarra) que coincide aproximadamente con la divisoria hidrográfica Júcar-Segura. La piezometría de este compartimento se sitúa sobre cotas del mismo orden que la de los Llanos de Albacete.

- Pozo Cañada. La cota de la superficie piezométrica se sitúa sobre los 710 m s.n.m., existiendo una clara conexión con el resto del Sistema, especialmente en el sur.
- Polope. Con piezometría del oren de los 670 m s.n.m. y un claro sentido de circulación hacia el sur.
- Tedera. Con niveles piezométricos comprendidos entre los 655 y 692 m s.n.m. y un claro sentido de circulación hacia el suroeste.
- Cerro Colleras. Con un sólo control piezométrico (sondeo del mismo nombre) y cota del orden de 680 m s.n.m. No queda clara su posible relación con el resto de la Unidad. Sin embargo, es posible su conexión con la Tedera.
- La Higuera. Estructura sinclinal con niveles piezométricos en los sondeos de Villacañas y La Higuera de 769 m s.n.m.
- Boquerón o Hellín. En clara conexión con los compartimentos más septentrionales por su borde norte. La piezometría indica un sentido de circulación hacia el límite sur en el que está drenado por el manantial de Isso.

#### Características hidrodinámicas

El acuífero Jurásico es sin duda el que, en conjunto, presenta las mejores características hidráulicas del Sistema. La mayor parte de los bombeos de ensayo realizados han sido sobre este acuífero.

Los valores de transmisividad obtenidos de los bombeos de ensayo realizados presentan sensibles variaciones condicionadas en muchos casos, como es lógico, por la potencia del acuífero cortado en el sondeo correspondiente, pero otras veces se obtienen valores excesivamente altos, en sondeos que han cortado el acuífero en una zona karstificada o muy fisurada localmente, lo que impide darle un valor representativo. En ocasiones, aunque en menor número, ocurre lo contrario: sondeos que cortan en su totalidad el acuífero dan valores muy pequeños que tampoco son representativos. La justificación de este fenómeno hay que buscarla, y así se ha comprobado en algún caso, en una incorrecta ejecución del sondeo y, otras veces, puede ser debido a fenómenos geológicos locales poco conocidos.

Hechas estas consideraciones se puede hablar de valores de transmisividad medios representativos del conjunto del acuífero de 100-200 m<sup>2</sup>/h y de igual modo los valores medios de permeabilidad están comprendidos entre 1 y 2 m/h, siendo más frecuente el primer valor en la zona meridional del Sistema y el segundo en el sector de la Llanura de Albacete.

#### **- IGME (1980): “El Sistema Hidrogeológico de Albacete (Mancha Oriental). Sus recursos en aguas subterráneas, utilización actual y posibilidades futuras”.**

Se trata de una publicación de la “Colección Informe”, enfocada fundamentalmente a contribuir a una mejor planificación de la explotación de los recursos hídricos subterráneos, que recoge los resultados de las investigaciones hidrogeológicas anteriores, por lo que no aporta un mayor conocimiento de la zona.

Con objeto de simplificar la investigación y la gestión de un área tan extensa, se llevó a cabo la división del Sistema en 11 zonas hidrogeológicas (figura 2.6), una de las cuales, la denominada Zona 4 (Petrola-Hellín) está incluida casi en su totalidad en la cuenca del Segura, y corresponde aproximadamente a las actualmente denominadas masas de agua subterránea 070.004 Boquerón, 070.005 Tobarra-Tedera-Pinilla, 070.008 Ontur, 070.007 Conejeros-Albatana (parcial), 070.001 Corral Rubio y 070.002 Sinclinal de la Higuera. Además incluye los reducidos sectores pertenecientes a la cuenca del Júcar de Nava de Abajo y este de Pozo Cañada.

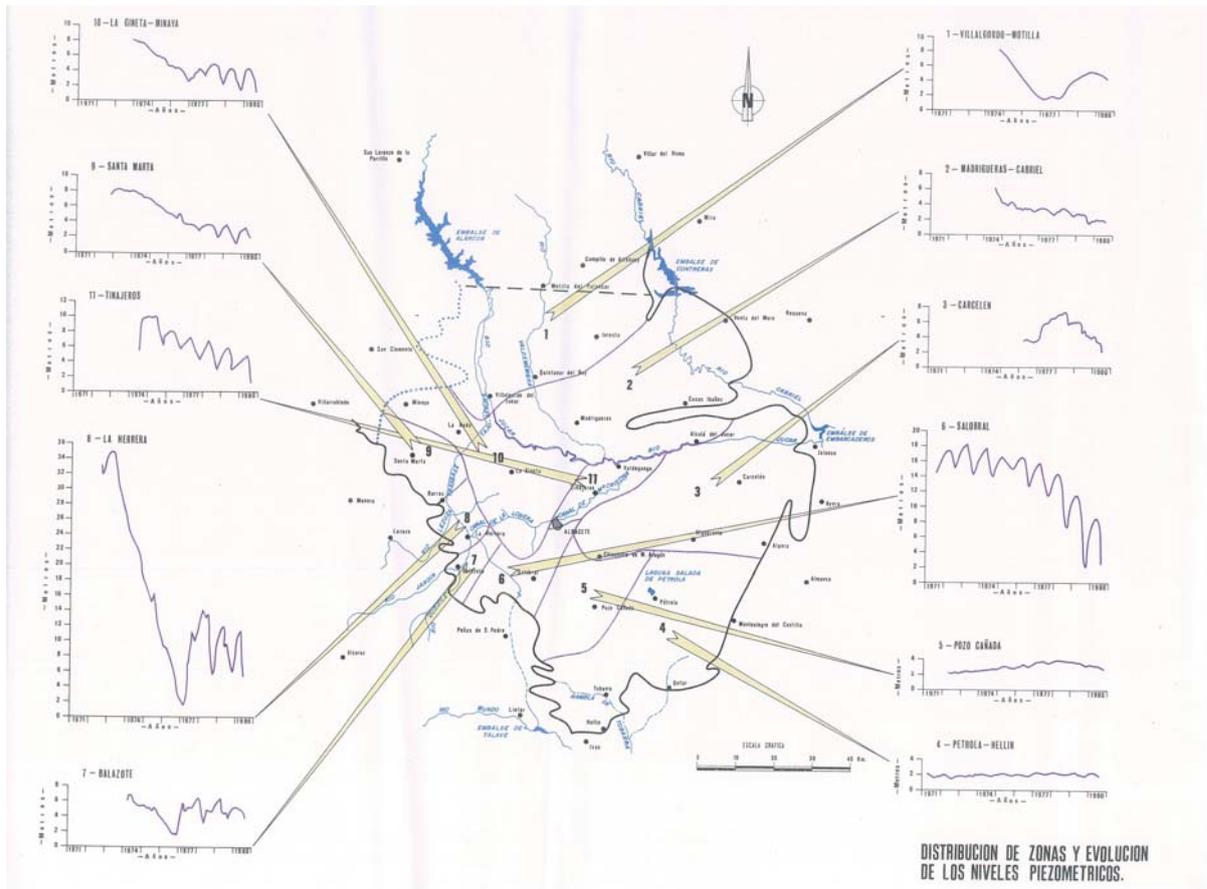


Figura 2.6. Distribución de zonas y evolución de los niveles piezométricos en la U.H. de Albacete (IGME, 1980)

En esta publicación se establece que la alimentación de esta zona se produce exclusivamente por infiltración de lluvia y la descarga por explotación, evaporación en las lagunas y, en mucha menor proporción, por los manantiales del límite sur. Se considera que esta zona está en equilibrio, sin transferencias laterales subterráneas con las zonas limítrofes, con las que se estima que aproximadamente coinciden la divisoria de cuencas hidrográficas Júcar y Segura con una divisoria de aguas subterráneas. La circulación del flujo en el acuífero es de sentido norte-sur y se estima que en el caso de que aumenten las extracciones de aguas subterráneas la divisoria piezométrica se trasladaría hacia el norte, con lo que podría establecerse flujo subterráneo desde la cuenca del Júcar hacia la del Segura.

**- IGME (1981): “Evolución y estado actual de los acuíferos en las cuencas altas del Júcar y Segura”.**

Las consideraciones hidrogeológicas no verían con respecto a la referencia anterior y se insiste en la subdivisión en las 11 zonas hidrogeológicas anteriormente mencionadas. Se especifica que en la zona 4 el sentido de flujo subterráneo, incluso en la pequeña parte que corresponde a la cuenca del Júcar, es hacia el sur.

En este informe se realizan una serie de consideraciones respecto a la zona 4 que merece la pena resumir a continuación.

**Sistema hidrogeológico de Albacete. Zona hidrogeológica 4 Petrola-Hellín.**

Es la única zona del Sistema Hidrogeológico de Albacete incluida en la cuenca del Segura a todos los efectos aunque una pequeña parte de su superficie pertenece a la cuenca del Júcar. Ocupa una extensión territorial de 1.313 km<sup>2</sup> situada en su mayor parte sobre la provincia de Albacete; sólo una pequeña área de unos 10 km<sup>2</sup> corresponde a la provincia de Murcia.

De los acuíferos que forman el Sistema de Albacete, el único presente en toda la zona es el Chorro, que alcanza potencias máximas próximas a los 300 m. En el tercio norte se encuentran el Utrillas (Cretácico inferior) y Gallinera (Jurásico superior), pero el primero por sus deficientes características hidrogeológicas y el segundo por encontrarse generalmente con escaso espesor saturado tiene poco interés para su captación, salvo en áreas muy localizadas. En el extremo sur existe un tramo calcáreo del Mioceno de reducida continuidad lateral, pero que por estar directamente comunicado con el Chorro tiene interés aunque sólo a nivel local.

La principal característica del acuífero Chorro es que ha sido afectado por una tectónica de bloques que ha provocado su división en una serie de compartimentos, entre los que existe una deficiente conexión hidrogeológica puesta de manifiesto por los diferentes niveles piezométricos. Estos compartimentos, que en algunos casos constituyen pequeños sistemas hidrogeológicos independientes, son: Rincón del Moro, Polope, Tecera, Preciados, La Loma, El Boquerón, Hellín, Cerro Colleras y Bonete-La Higuera-Villacañas.

Como término medio, el nivel piezométrico oscila entre profundidades superiores a los 100 m en el sector norte e inferiores a los 50 m en el sector meridional.

El flujo del agua subterránea tiene sentido hacia el sur, aunque la presencia de barreras de transmisividad condiciona la circulación en el acuífero y da lugar a una serie de manantiales, todos en el sector sur, que constituyen el drenaje natural de la Zona Hidrogeológica.

El único curso superficial digno de mención es el Arroyo de Tobarra, que actúa como colector de los excedentes de los caudales de las surgencias subterráneas de la zona, que salen del Sistema de Albacete a través de él. Su escorrentía superficial es muy pequeña salvo en los períodos de lluvias intensas.

La alimentación de los acuíferos procede exclusivamente de la infiltración por lluvia y la descarga se realiza por los manantiales y una pequeña parte por evaporación en las lagunas de las cuencas cerradas de Pétrola y La Higuera.

Los recursos subterráneos son 35 hm<sup>3</sup>/año, sobre los que se realiza una explotación neta de 12 hm<sup>3</sup>/año. En la actualidad la situación es claramente excedentaria, pero posiblemente la situación cambie en un futuro no muy lejano.

Es evidente que la perspectiva a largo plazo es alarmante ya que las explotaciones potenciales son 4 veces superiores a los recursos totales de la zona por lo que la puesta en explotación deberá hacerse de una forma paulatina y controlada para evitar las situaciones límite. De todas formas los problemas que causará la explotación se pondrán de manifiesto incluso antes de alcanzar el equilibrio entre recursos y demandas, por causa de la estructura del acuífero que al estar tan compartimentado hará que se produzcan sobreexplotaciones locales que provoquen la aparición de umbrales hidrogeológicos, independizando zonas dentro de un mismo compartimento, e inevitablemente los manantiales resultarán afectados.

La evolución de los niveles piezométricos sólo registra pequeñas oscilaciones periódicas debidas a las variaciones de la lluvia, sin que se aprecien diferencias de unos compartimentos a otros.

Durante la época de riegos las depresiones medias en toda la zona rondan los 0,5 m/año mientras que las depresiones residuales alcanzan e incluso superan 1 m/año. Esta aparente incongruencia es achacable a un retardo en el tiempo de las influencias de los bombeos a causa de la gran compartimentación que afecta a toda la zona.

**- IGME (1985). El Sistema acuífero del Sinclinal de la Higuera (Albacete); IGME (1988): Estudio hidrogeológico de los sistemas acuíferos situados al NE de Hellín (Albacete), dentro de la cuenca del Segura.**

En estos estudios se desagregan del sistema hidrogeológico de Albacete las actualmente denominadas masas de agua subterránea 070.001 Corral Rubio, 070.002 Sinclinal de la Higuera y 070.005 Tobarra-Tedera-Pinilla. El sector de Corral Rubio no se estudió y se siguió considerando como parte del sistema hidrogeológico mencionado. El resto de los sectores se subdividió en diferentes bloques o compartimentos denominados, de norte a sur, Sinclinal de la Higuera, Pinilla, Tedera y Tobarra. La formación acuífera principal está constituida por dolomías del Dogger, siendo el sentido del flujo subterráneo hacia el sur, con circulación en forma de "cascada" como consecuencia del escalonamiento hidrodinámico originado por la tectónica de bloques que afecta al acuífero, que da lugar a fuertes saltos o escalones en la superficie piezométrica y a la diferenciación en los compartimentos citados, intercomunicados entre sí por conexiones laterales a través de las zonas de fractura. Los límites laterales con el resto del sistema hidrogeológico de Albacete se estiman como impermeables, con algunas posibles excepciones locales en el caso de Tedera.

En conclusión, la actualmente denominada masa de agua subterránea Boquerón comprende los anteriormente denominados por el IGME compartimentos de Boquerón, Preciados y parte de Polope (excepto el sector noreste de este último, que abarca la hoy denominada masa de agua subterránea Corral Rubio y zona colindante de la cuenca del Júcar). El sector de Nava de Abajo, actualmente excluido de la masa de agua subterránea Boquerón por hacerse coincidir su límite con la divisoria hidrográfica entre las cuencas del Júcar y Segura, formaba parte del compartimento de Polope. Es precisamente en esta zona donde se contempla el principal objetivo del presente informe, que es el de dilucidar la dirección y sentido de la circulación del agua subterránea y la ubicación del límite real de los acuíferos en estudio.

**- DGOH-IGME (1988). Delimitación de las UU HH del territorio peninsular e Islas Baleares, y síntesis de sus características.**

En este informe se adopta oficialmente la denominación de U.H. 08.29 Mancha Oriental y se modifica el límite sur que se hace coincidir con la divisoria entre las cuencas hidrográficas del Júcar y Segura. Este es el límite que se ha considerado posteriormente por CHS, con la matización de que la cuenca endorreica de Pozohondo se asigna actualmente a la CHJ, por lo que quedaría incluido en la Mancha Oriental, mientras que en este informe se incluye en Boquerón. De este modo, el sector de Nava de Abajo resultó posteriormente excluido de la masa 070.004 Boquerón a pesar de que, según documentos recientes de CHS, incluiría parcialmente los acuíferos de Buhos y Umbria.

**- Informes y estudios posteriores.**

- En el “**Informe de colaboración en el desarrollo de un modelo matemático distribuido de flujo subterráneo de la U.H. 08.29 (Mancha Oriental)**”, de E. Font Vicent, no se aporta nada nuevo en relación con nuestra zona de estudio. En los mapas piezométricos que se realizan se toma como límite sur la divisoria hidrográfica de las cuencas del Júcar y Segura y, por extrapolación, se trazan las isopiezas desde ese límite, aunque no existen puntos de apoyo para el trazado de las mismas, más que a gran distancia del borde. No obstante, se indica un flujo de dirección norte-sur, que en 2001 (régimen influido) tendría sentido sur-norte, desde una cota próxima a 700 m s.n.m. en el límite, mientras que en régimen natural (año 1974) el sentido sería, en nuestra zona de trabajo, hacia el sur hasta una cota mínima de 670 m s.n.m. en el borde sur de Nava de Abajo, mientras que se dirigiría hacia el norte, desde una cota algo superior a 700 m s.n.m. en las inmediaciones de la Laguna de Ontalafía. Pero es evidente que se trata de interpolaciones con muy pocos o ningún punto de apoyo. La fiabilidad de tanto detalle es, pues, baja.
- En el informe final (IGME, 1999) del “**Convenio para actuaciones de apoyo a la gestión hídrica en la U.H. 08.29 Mancha Oriental**” se referencia el “Estudio de la explotación de aguas subterráneas en el acuífero de la Mancha Oriental y su influencia sobre los caudales del río Júcar” (DGOH, 1988), de gran importancia para el esquema del flujo subterráneo, pues se trazan isopiezas para varias épocas con numerosos puntos de observación, que incluyen en su totalidad la masa de agua subterránea Boquerón. También se referencia el “Estudio de seguimiento del impacto de las extracciones de aguas subterráneas en los acuíferos de la Mancha Oriental y los caudales del río Júcar” (DGOH, 1993), que es una actualización de DGOH (1988).

En IGME (1999) se efectúa una completa revisión de los antecedentes bibliográficos y se propone una nueva delimitación de la unidad, que no afecta a nuestra zona de estudio, donde se sigue adoptando como límite sur la divisoria de cuencas Júcar-Segura, manteniendo la cuenca endorreica de Pozohondo (sector de Nava de Abajo) incluida en la Mancha Oriental. No obstante, es importante resaltar que este documento menciona que el hacer coincidir los límites hidrogeológicos con los hidrográficos es una cuestión administrativa (por motivos exclusivos de mayor facilidad y eficacia en la gestión hídrica), pero la realidad física es diferente, por lo que existe un flujo subterráneo que, según dicho informe, tiene sentido norte-sur, es decir, desde la cuenca del Júcar a la del Segura.

Se realiza una propuesta de sectorización de la unidad en 6 zonas hidrogeológicas de características y comportamientos diferentes (figura 2.7). La denominada como zona 4 Pozo Cañada-Pétrola es similar a la definida en IGME (1980), en la que se estima en  $5 \text{ hm}^3/\text{año}$  las salidas subterráneas hacia la cuenca del Segura.

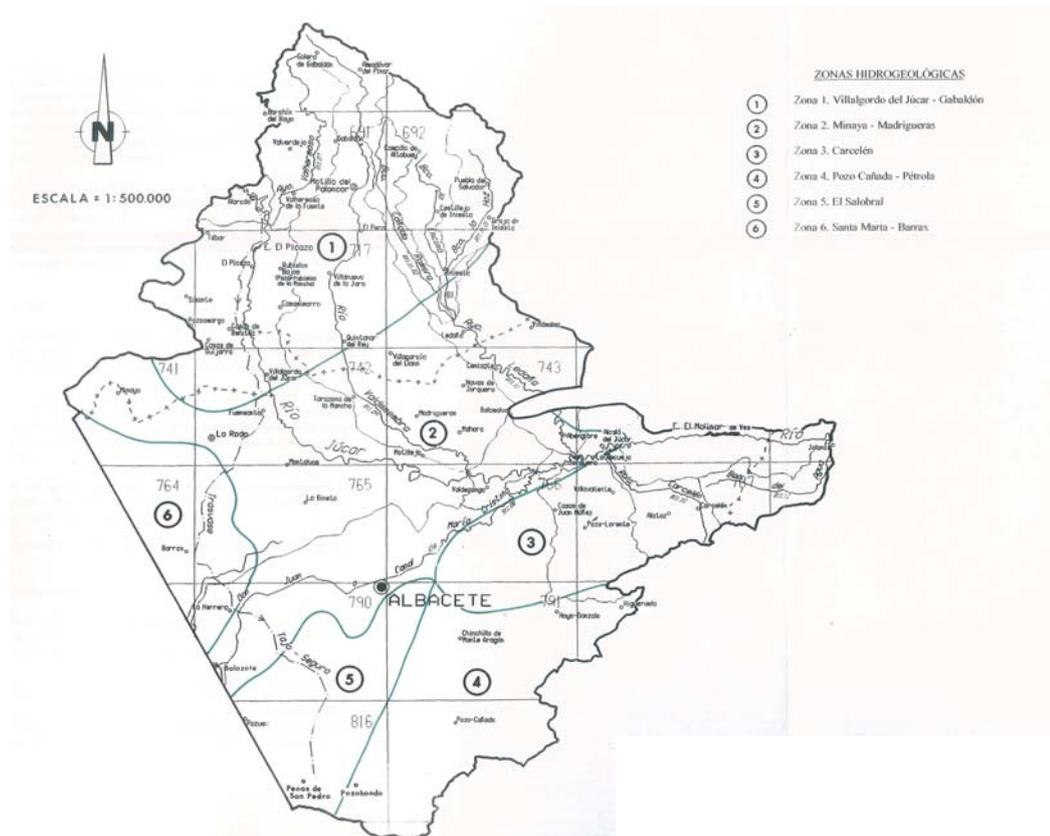


Figura 2.7. Propuesta de sectorización en la U.H. de Albacete (IGME, 1999)

- En la “**Caracterización geológica de la U.H. 08.29 Mancha Oriental (Convenio UCM-CHJ)**”, al tratar del límite sur de esta unidad, que adopta el contorno de IGME (1999), que es el mismo de los planes hidrológicos del Júcar y Segura, se afirma que la divisoria hidrográfica Júcar-Segura no coincide con el límite real entre la Mancha Oriental y el Boquerón, por lo que existe flujo subterráneo entre ambas unidades.

Se efectúa un completo análisis de las características hidrogeológicas de las formaciones permeables, estando comprendidos los valores de transmisividad de los materiales jurásicos en nuestra zona de estudio entre  $1.000 \text{ m}^2/\text{día}$  y  $10.000 \text{ m}^2/\text{día}$ , excepto en el sector septentrional que serían inferiores, entre  $500 \text{ m}^2/\text{día}$  y  $1.000 \text{ m}^2/\text{día}$  e incluso algo menores localmente, del orden de  $100 \text{ m}^2/\text{día}$  a  $500 \text{ m}^2/\text{día}$ .

- En 1988 se realiza la “**Documentación básica para la realización del Plan Hidrológico de la cuenca del Segura**”, en la que se considera el sistema acuífero Boquerón desagregado del Sistema hidrogeológico de Albacete, con los límites actuales, excepto la zona endorreica de Pozohondo que se

consideró dentro de Boquerón. El límite norte se consideró abierto, de tal modo que se estimó la alimentación del acuífero en  $4 \text{ hm}^3/\text{año}$  procedentes de infiltración de lluvia y entradas subterráneas por dicho límite, de manera que quedaba justificada la surgencia de Isso.

En el Plan Hidrológico de la cuenca del Segura (CHS, 1997) se codifica y establecen los límites de la U.H. 07.03 Boquerón, que coinciden con los definidos anteriormente (la cuenca endorreica de Pozohondo se incluye en la unidad), y se subdivide en 3 acuíferos interconectados: Búhos, Umbría y Boquerón, aunque no se aporta ningún estudio que justifique dicha diferenciación. Se considera esta unidad como compartida con la cuenca del Júcar.

- En el “**Estudio de cuantificación del volumen anual de sobreexplotación de los acuíferos de las UU HH 07.02 Sinclinal de la Higuera, 07.03 Boquerón, 07.16 Tobarra-Tedera-Pinilla; 07.18 Pino, 07.49 Conejeros-Albatana y 07.55 Corral Rubio (CHS, 2007)**” se expone que la unidad de Boquerón, cuyos límites son los del Plan Hidrológico del Segura (CHS, 1997), tiene un funcionamiento muy complejo, compartimentado, con límites difíciles de establecer, teniendo comunicación con la cuenca del Júcar por el norte y con la unidad de Tobarra por el este (figura 2.8).

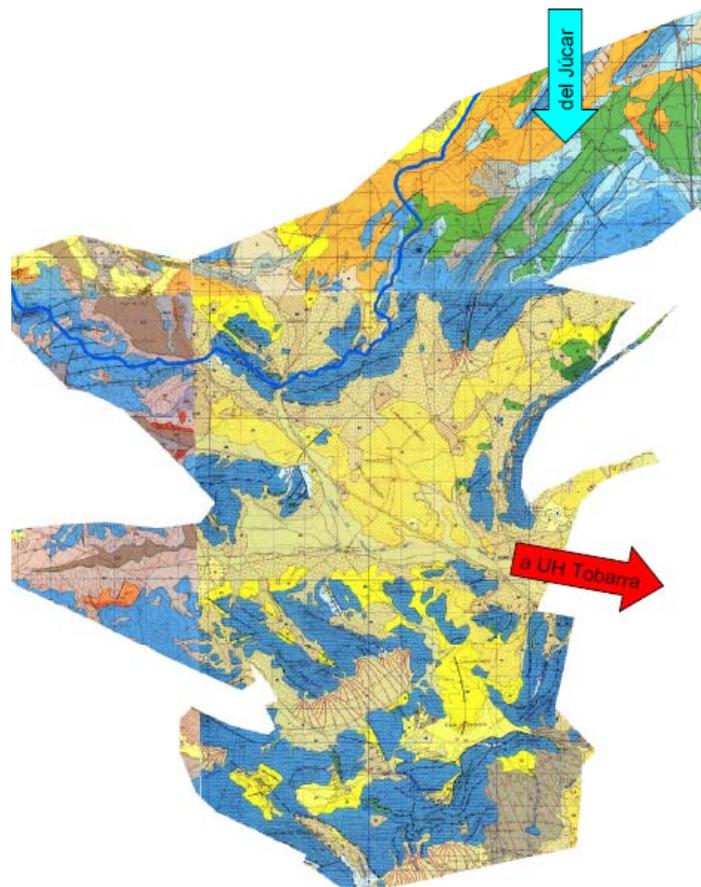


Figura 2.8. Delimitación de la unidad de Boquerón y relaciones laterales (CHS, 2007)

Es interesante el análisis piezométrico que se efectúa y las consideraciones respecto al intercambio de flujos subterráneos entre las cuencas del Segura y Júcar (figura 2.9), cuya cuantificación no se realiza, sino que se admiten las establecidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Segura, es decir: entradas laterales a Boquerón, desde Mancha Oriental, 10,27 hm<sup>3</sup>/año; salidas laterales desde Boquerón, sin especificar claramente si es hacia la Mancha Oriental o hacia Tobarra-Tedera-Pinilla: 2,2 hm<sup>3</sup>/año. A continuación se transcriben unas observaciones importantes contenidas en este Estudio.

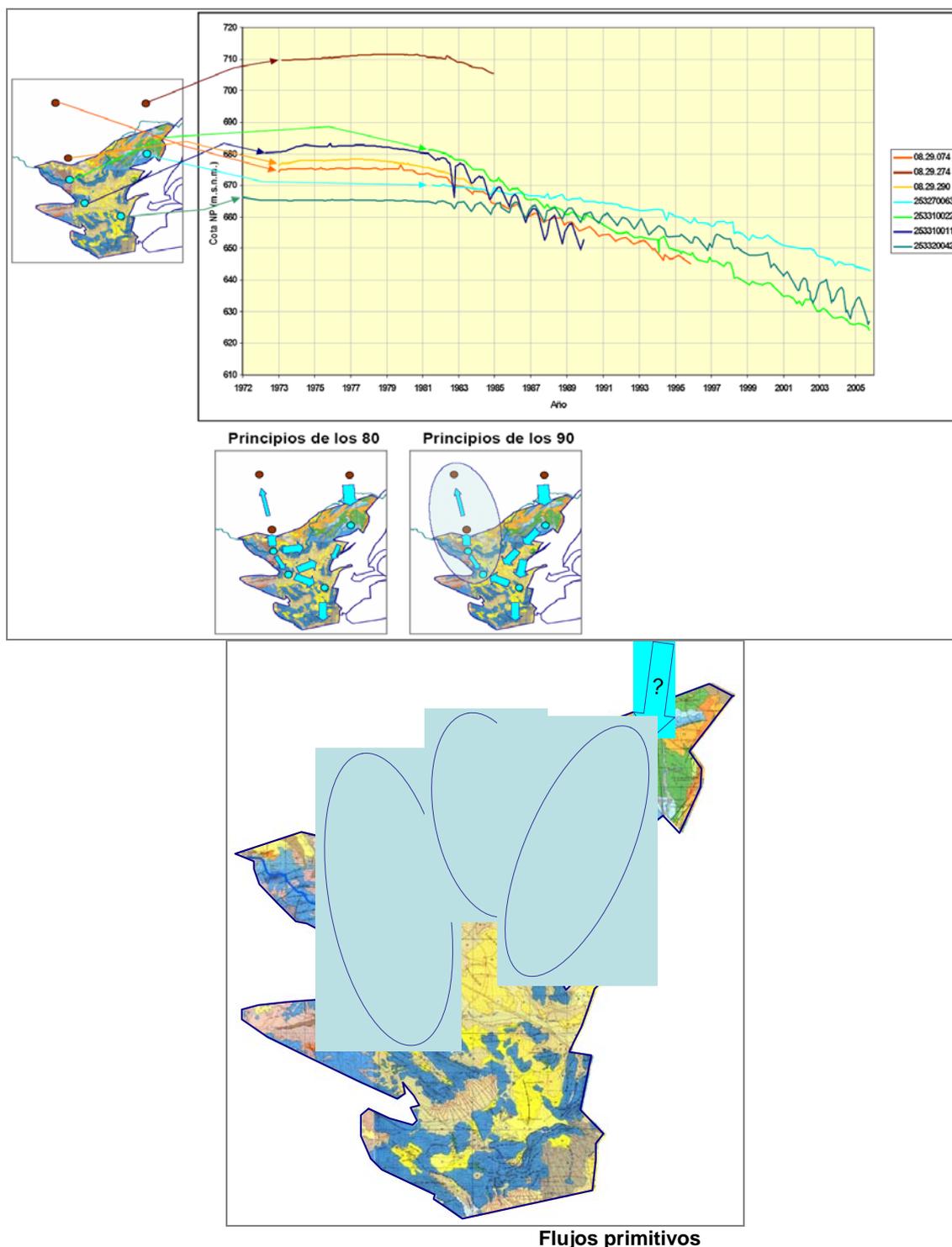


Figura 2.9. Evolución del intercambio de flujos subterráneos entre las cuencas del Segura y Júcar (CHS, 2007)

Existe una importante similitud en el funcionamiento de los piezómetros a ambos lados de la unidad del Boquerón, tanto en la cuenca del Júcar como en la del Segura. Algunos aspectos destacables de las evoluciones son:

- Existe una zona de recarga muy importante en la cuenca del Júcar, entre las unidades de Corral Rubio, Tobarra-Tedera-Pinilla y Boquerón.
- La piezometría refleja comunicación entre la vertiente del Júcar y la de Boquerón, aunque no es igual en todos los sectores. En el sector noreste y central de la unidad parecen existir unas entradas importantes, mientras que en el sector noroeste la piezometría muestra un flujo débil en los años 80 hacia la cuenca del Júcar, el cual se ha acentuado de manera importante en los años 90. En la actualidad, en la vertiente del Júcar y en todo el sector oeste de la unidad de Boquerón, los niveles se hallan por debajo de los de la Rambla de Tobarra.

Se está produciendo un descenso generalizado de niveles piezométricos, más acusado en el sector occidental y vertiente del Júcar. Este descenso está provocando un “arrastre” hacia el Júcar (salidas laterales), mientras que todo el sector oriental mantiene sus flujos primigenios con una sobrealimentación, que en principio se origina al noreste de la Unidad de Boquerón, en la cuenca del Júcar.

De acuerdo con el análisis de evoluciones piezométricas y flujos entre la cuenca del Júcar y del Segura en el ámbito de la Unidad de Boquerón, existen flujos de entrada y salida, los cuales solo pueden ser cuantificados mediante el establecimiento de balances de las unidades implicadas en el Júcar (Mancha Oriental) y/o modelizaciones.

Según el Plan Hidrológico de Cuenca, las entradas laterales alcanzan los 10,27 hm<sup>3</sup>/año, y las salidas 2,2 hm<sup>3</sup>/año. Es evidente que la unidad requiere de unas entradas laterales importantes, puesto que solo con la infiltración de agua de lluvia no se pueden justificar las extracciones realizadas (4,4 hm<sup>3</sup>/año / 26,99 hm<sup>3</sup>/año).

Se podría pensar que el desequilibrio entre la infiltración de agua de lluvia y los bombeos es suficiente para justificar la variación de almacenamiento que se observa en los gráficos de evolución piezométrica, pero las evoluciones indican ascensos muy importantes, los cuales, comparados con los descensos provocados por los bombeos, no pueden ser justificables únicamente con la infiltración de agua de lluvia. Dado que la recarga por lluvia es muy inferior a los bombeos, la única forma de justificar los ascensos por recarga es mediante aportes laterales. La situación de desequilibrio se inició en el año 1980, aunque los descensos de niveles no comenzaron a producirse hasta el año 1983.

Si se observan los flujos actuales, se aprecia una inversión en la piezometría en el entorno de la Rambla de Polope o Tobarra, cerca del límite con la Unidad de Tobarra-Tedera-Pinilla. Se trata de un límite abierto y es probable que una parte de las entradas laterales se estén produciendo en la actualidad a través de este límite.

En la actualidad, los niveles han descendido por debajo de la cota de descarga, y por lo tanto la fuente de Iseo está seca (llegó a descargar 150 l/s). Todos los manantiales inventariados están secos actualmente.

### **3. GEOLOGÍA**

El área de estudio se localiza en el extremo oriental de la zona Prebética, al borde Sureste de los Llanos de Albacete, y en la parte más meridional de la Cordillera Ibérica.

#### **3.1. ESTRATIGRAFÍA**

Los materiales más antiguos que aparecen en la región estudiada corresponden al Triásico, mientras que los más modernos se atribuyen al Cuaternario, siendo los más abundantes los pertenecientes al Jurásico. Durante este periodo de tiempo la sedimentación no ha sido ni continua ni homogénea, y se presentan diversas lagunas estratigráficas, discordancias y variaciones de facies a lo largo y ancho de la zona estudiada.

##### **3.1.1. Triásico (Tq)**

Está presente en el sur de Hellín, Santiago de Mora, y al Este de Tobarra. En la zona de estudio tiene poca entidad cartográfica.

Sus afloramientos corresponden a manifestaciones diapíricas aisladas o alineaciones tectónicas, por lo que resulta difícil establecer las características estratigráficas del sistema. No obstante su litología está constituida generalmente por arcillas abigarradas y yesos en facies Keuper y, en ocasiones, por carbonatos de facies Muschelkalk o incluso más detríticas del Buntsandstein.

##### **3.1.2. Jurásico**

Aparece ampliamente en toda la zona. A grandes rasgos se diferencia un conjunto inferior dolomítico (Lías-Dogger), y otro superior calizo-margoso (Malm).

###### **3.1.2.1. Lías (J<sub>1</sub>, J<sub>2</sub>)**

Los afloramientos de la serie estratigráfica del Lías son muy poco abundantes, y en ninguno de ellos aparece el muro, por lo que no es posible determinar el espesor de esta formación. La potencia visible oscila entre los 100 m y los 150 m.

Se pueden distinguir dos formaciones (García-Rodrigo y Pendás, 1971):

###### **Formación Carretas. Dolomías y calizas dolomíticas del Lías inferior (J<sub>1</sub>)**

Corresponde con una formación esencialmente dolomítica que descansa sobre el sustrato de arcillas del Triásico superior (Keuper). Litológicamente se trata de unas dolomías cristalinas de aspecto cavernoso, con cierto color rojizo y abundantes recristalizaciones de calcita, que en ocasiones forman geodas. Generalmente su estratificación es difusa, en especial a muro de la formación. Hacia techo se puede observar localmente un tramo dolomítico en el que se puede apreciar una cierta estratificación.

A techo de las dolomías anteriores, se observa un nivel muy poco potente (3 o 4 m) de yesos blancos, sólo visible en la Sierra del Madroño, que da nombre al conjunto de la formación. Por datos de sondeos es posible que lateralmente desaparezca este nivel yesífero.

Sus afloramientos son muy escasos, por lo que su potencia solo puede ser estimada en función de datos regionales. En la zona de Liétor su potencia estaba comprendida entre 100 y 150 m. Al norte, en la llanura de Albacete, Linares (1970) ha podido comprobar por sondeos que las dolomías sufren un importante cambio de facies a anhidritas y yesos.

La edad de este tramo se atribuye al Lías inferior medio.

### **Formación Madroño. Dolomías, calizas dolomíticas y/u oolíticas con intercalaciones de margas verdes y rojas (J<sub>2</sub>)**

Se trata de unas dolomías y margocalizas (dolomicritas y dolomicroesparitas) que se presentan alternando de forma irregular con paquetes de margas de tonos verdosos, que en ocasiones se intercalan con arcillas rojas. Presentan algunos niveles con oolitos dispersos pero la mayor parte de las estructuras sedimentarias han sido borradas a consecuencia de la intensa epigenización del tramo. Se presentan en capas de mediano espesor, formando un tableado típico. Se encuentran restos de moluscos.

En Alcadozo la potencia de la formación es de unos 50 m. La edad que se atribuye a este tramo es Lías medio-superior.

#### **3.1.2.2. Dogger (J<sub>3</sub>)**

Aflora ampliamente en la zona de estudio con la denominación de formación Chorro. Está formado por una serie monótona de dolomías romboédricas que constituyen la mayoría de las veces las alineaciones montañosas de la zona. Pueden diferenciarse dos facies:

- Dolomías de grano medio-grueso de aspecto masivo, aunque localmente pueda percibirse una cierta estratificación. Presentan un aspecto brechoide consecuencia de una dolomitización secundaria.
- Dolomías de grano fino, de tonos grises, que locamente adquieren un bandeado en franjas claras y oscuras que parecen indicar una cierta estratificación. Localmente también pueden presentar un aspecto de tipo brechoide.

Estas dos facies no constituyen dos formaciones cronológicamente separables, pues la dolomitización secundaria que afecta a todo el conjunto varía de unos puntos a otros. La diferenciación de ambos tramos depende fundamentalmente del nivel y grado alcanzado por dicha dolomitización.

El espesor del conjunto se estima en algo más de 300 m.

### **3.1.2.3. Oxfordiense (J<sub>3</sub>)**

A techo del Dogger está representado a nivel regional un marcado *hard-ground*, que da paso a un tramo de unos 25 m de calizas rosadas con abundancia de Ammonites y Espongiomorfos, e intercalaciones de arcillas que han sido datados como Oxfordiense superior.

### **3.1.2.4. Kimmeridgiense (J<sub>4</sub>)**

Esta formación aparece definida por una alternancia bastante constante de calizas y margocalizas de color beige claro, estratificadas en bancos de 0,20 metros a 0,50 metros, correspondiendo generalmente a micritas biomicritas, con un aumento del espesor de las capas a techo de la serie. A esta unidad se le atribuye una edad Kimmeridgiense inferior-medio.

Sobre el Kimmeridgiense medio se disponen unas calizas masivas (intramicritas y ooesparitas) grisáceas con oolitos y pinolitos de un espesor medio de 20 a 30 m. La edad que se atribuye a estas calizas es Kimmeridgiense medio.

### **3.1.3. Cretácico**

#### **3.1.3.1. Cretácico inferior (C<sub>1</sub>)**

En el sector estudiado, el Cretácico inferior se presenta en facies exclusivamente detríticas. Litológicamente se tratan de conglomerados de cantos de cuarcitas subredondeadas de hasta 10 cm de diámetro. Además presenta algunos niveles de arenas blancas con intercalaciones de arcillas con tonos rojizos, atribuibles a las facies Utrillas. Su potencia puede alcanzar los 100 m.

#### **3.1.3.2. Cretácico superior (C<sub>2</sub>)**

La entidad cartográfica de esta formación es muy escasa. Dentro de ésta se han podido establecer los siguientes tramos:

- Tramo inferior de dolomías amarillentas con intercalaciones margosas (esparitas y doloesparitas con oolitos y graveles). Descansa directamente y concordante con el Cretácico inferior.
- Dolomías grises (dolomicroesparitas y dolomicritas). Presentan fauna de Textuláridos, Verneulínidos y Moluscos.
- Dolomías arenosas blancas (Dolomicritas a microesparitas con intraclastos) que contiene fauna de Moluscos, Cuneolina, Ostrácodos, Miliólidos, y Equinodermos.

Los tres tramos se corresponden con el Cenomaniense-Turoniense y alcanzan en su conjunto un espesor de unos 60-70 m. Sobre éstos aparecen unas calizas margosas y brechoides que localmente pueden estar dolomitizadas. La datación de la fauna encontrada en esta formación permite datar este tramo en el Santoniense.

#### **3.1.4. Mioceno (M)**

El Mioceno de la zona estudiada está formado por dos unidades claramente separables y discordantes entre sí, así como el conjunto respecto a los materiales mesozoicos.

La primera unidad o tramo inferior marino, está formado por margas y areniscas calcáreas cementadas por caliza, conteniendo cantos aislados subredoneados de cuarcitas de tamaño medio, localmente más numerosos. Hacia la zona oriental presenta en la base un conglomerado de cantos calizos.

El segundo tramo consiste en una formación de calizas arcillosas que localmente se presentan con cristales e intercalaciones de yeso y arcillas yesíferas. Los cristales lenticulares de yeso se encuentran frecuentemente disueltos y reemplazados por calcita y sílice.

#### **3.1.5. Plio-Cuaternario (PQ)**

Ampliamente representado en superficie, tiene generalmente escaso desarrollo vertical, por lo que, dado los objetivos del presente estudio, su importancia es menor con respecto al resto de materiales representados.

Atendiendo a su génesis pueden diferenciarse:

- Aluviones antiguos.
- Conos de deyección y abanicos aluviales.
- Terrenos aluviales y terrazas.
- Costras carbonatadas.
- Dunas.

### **3.2. TECTÓNICA**

El área de estudio se localiza en la confluencia de las estribaciones más orientales del arco estructural de Cazorla-Alcaraz-Hellín al oeste, y las zonas donde se reconocen direcciones estructurales típicamente Béticas. Su complejidad tectónica viene definida a grandes rasgos por una serie de direcciones estructurales que interfieren con otras prácticamente perpendiculares entre si.

La zona se caracteriza por el tránsito entre las direcciones estructurales NO-SE de la terminación oriental del arco estructural Cazorla-Alcaraz-Hellín y las direcciones NE-SO típicamente béticas. Este cambio está ocasionado por una importante falla de desgarre dextrógira en el zócalo, que condiciona en principio el cambio direccional y más en detalle las vergencias de los pliegues. Existe una relación íntima entre el basamento rígido y fracturado, y una cobertera que se ve afectada tanto por los movimientos del zócalo como por los efectos halocinéticos del Keuper, que a su vez actúa como elemento principal de despegue. Pueden diferenciarse tres dominios estructurales.

La zona meridional del área de estudio finaliza con una falla E-O en la que se inyecta Trías entre Hellín e Isso y que puede prolongarse más hacia el oeste por debajo del Cuaternario en la zona límite de los afloramientos mesozoicos hacia el sur.

## **Sector Alcaadozo-Talave**

Ocupa el sector occidental de la zona de estudio. Se caracteriza por direcciones estructurales de dirección generalmente NO-SE.

En su zona meridional merece destacarse el antiforme del Talave, que se define entre el embalse de Talave y la pedanía de La Herrería, situada al oeste de Alcaadozo. Se trata de una alineación de anticlinales sucesivos, ocasionalmente separados por pequeños sinclinales o interrumpidos por fallas, en cuyos ejes llegan a aflorar el Trías (por su mayor superficie se destaca el afloramiento de aproximadamente un kilómetro cuadrado que se localiza al norte del embalse del Talave), y más frecuentemente el Lías.

Desde Alcaadozo hacia Peñas de San Pedro y desde aquí hacia el norte, el sector se caracteriza por una sucesión de pliegues anticlinales y sinclinales en cuyos núcleos aflora frecuentemente el Lías y en los sinclinales intermedios se encuentra más frecuentemente el Dogger y solo ocasionalmente el Cretácico, como es el caso del entorno de Peñas de San Pedro.

## **Sector Tobarra-Pozo Hondo-Pozo Cañada**

Se localiza en la zona oriental y central del área de estudio. Dentro de los terrenos jurásicos, hay un predominio de afloramientos del Dogger. Se caracteriza por una disposición de las direcciones estructurales NE-SO.

Entre Tobarra y Hellín la zona se encuentra intensamente tectonizada, con un predominio de cabalgamientos de vergencia hacia el NO, especialmente abundantes en la Sierra del Pino (al NE de Hellín) y también bien representados en las sierras de Romeral, Montesinos y Hellín, todas ellas situadas al sur de Tobarra.

Al norte de Tobarra el estilo estructural cambia. Está formado por una sucesión de amplios pliegues de dirección bética en cuyo núcleo suele estar representado el Dogger y ocasionalmente la formación Madroño, del Lías, como en la sierra de Navajuelas, al NO de Tobarra. En los sinclinales aparece representado el Cretácico y sobre este se encuentra discordante el Mioceno. El carácter discordante del Mioceno es la causa principal de que el Cretácico superior esté escasamente conservado. Los ejes de los anticlinales suelen estar fallados, con fallas longitudinales a los ejes que frecuentemente presentan varios kilómetros de longitud, como es el caso de las sierras de Navajuelas, sierras de Ontalafia-El Chortal. De la cartografía puede interpretarse que los saltos de falla son más elevados en el flanco meridional de los anticlinales, donde entran en contacto la base del Dogger-Lías con el sinclinal que le sigue en el que se conserva el Mioceno y presumiblemente un conjunto completo de la serie del Mesozoico representativo de la zona.

Relacionado con el plegamiento de dirección NE-SO en el límite oriental del área de estudio se aprecia un pequeño botón de Trías que puede extenderse por debajo del Cuaternario hacia el SO y determinar la posición de los manantiales de Polope, Mercedes y Pestosa.

## **Sector intermedio**

Es una franja de una anchura variable, generalmente comprendida entre 4 y 8 km, en la que se realiza el giro entre la dirección estructural NO-SE del sector Alcaadozo-Talave y la NE-SO del sector Tobarra-Pozo Hondo-Pozo Cañada. La rotación de las

estructuras es posterior a la fase compresiva de la orogenia, pues afecta claramente a los cabalgamientos, como puede apreciarse en la sierra de Búhos y en menor medida en la Sierra de Romeral, al oeste de Hellín.

Con frecuencia la rotación estructural ocasiona el desarrollo de fallas, si bien las principales no son directamente observables, si no que deben deducirse de la disposición de los materiales post-manto (neógenos). Esta situación se puede deducir en las sierras Quemada y San Juan, inmediatamente al norte de Pozohondo. Estas sierras constituyen un anticlinal de dirección principal aproximada E-O. El tránsito a las estructuras NO-SE que se sitúan al norte y oeste de Arenas de San Pedro debe estar posibilitado por las lineaciones NE-SO de los afloramientos miocenos u que pueden enlazarse con las fallas intramesozoicas que pueden observarse en las Lomas del Salobral y en la Morra del Tesoro. En cuanto a la terminación occidental de la sierra de San Juan, el Mioceno del sur de Pozo Hondo se estrecha hacia el NE en dirección a Campillo de Doblas.

Un detalle local de la incidencia de la fracturación en la conformación del giro estructural puede observarse a pequeña escala en la terminación occidental del Cerro del Cangilón, situado a unos 12 km al oeste de Tobarra. Dentro del Jurásico se pueden observar una fallas de dirección e inversas N-S *sensu lato*, que son las causantes de la conservación de un pliegue sinclinal NO-SE al sur del cerro y un anticlinal NE-SO en su zona más occidental.

## 4. HIDROGEOLOGÍA

### 4.1. FORMACIONES PERMEABLES E IMPERMEABLES

A la vista de la descripción litológica hecha en el apartado de Estratigrafía, en la zona de estudio se pueden diferenciar las siguientes formaciones acuíferas:

- Unos 150 m de dolomías del Lías inferior-medio ( $J_1$ ). Estos materiales presentan un tramo acuífero de menor importancia regional debido a la escasez de afloramientos y a su difícil accesibilidad. No se dispone de información precisa de sus características hidráulicas, pero de confirmarse la potencia estimada, puede almacenar un volumen de reservas significativo. La salinidad del agua podría ser localmente elevada, por la posibilidad de que se desarrollen facies evaporíticas y a los tiempos de residencia, que deben ser bastante más elevados que en otros tramos acuíferos más superficiales. Presenta una porosidad secundaria por dolomitización y fracturación de la roca.
- Al menos 300 m de dolomías con escasos niveles de calizas del Dogger y Oxfordiense ( $J_3$ ). Como consecuencia de su elevada transmisividad y buena accesibilidad, constituye el tramo acuífero más importante. La permeabilidad de estos materiales se debe al origen secundario de la dolomitización y en menor medida a su intensa fracturación.

De menor interés, por su potencia, permeabilidad y extensión de afloramientos, se pueden diferenciar los siguientes materiales, que pueden dar lugar a manantiales de muy poco caudal y ser captados por pozos artesanales de poca profundidad, con caudales muy pequeños y frecuentemente secos:

- Conglomerados y arenas del Cretácico inferior (C). Localmente pueden funcionar como acuíferos detríticos.
- Conglomerados y areniscas brechificadas del Mioceno medio (M). Pueden constituir niveles acuíferos de interés local.

En cuanto a los materiales que debido a su baja permeabilidad determinan los límites de los acuíferos, con carácter regional o local, pueden distinguirse:

- Arcillas y margas con yesos del Trías ( $T_g$ ). Constituye el impermeable de base regional. Además actúa como límite de acuífero cuando alcanza cotas elevadas a lo largo de los ejes anticlinales. Actúa como nivel de despegue en algunos cabalgamientos o se intruye en fallas de carácter distensivo.
- Margas del Lías medio-superior ( $J_2$ ). Localmente puede determinar la dirección de flujo e incluso ocasionar una diferenciación piezométrica entre los tramos acuíferos del Lías inferior y el Dogger, pero como consecuencia de la importante fracturación de la zona parece poco probable que pueda actuar globalmente como un límite absolutamente impermeable. No obstante, en la mayor parte de los casos debe ocasionar una diferenciación piezométrica entre los tramos acuíferos del Lías y del Dogger.
- Margas y margocalizas del Kimmeridgiense ( $J_4$ ). Localmente actúa como impermeable de techo, aunque carece de interés debido a su escasa continuidad horizontal y vertical.
- Margas del Mioceno (M). Actúa como impermeable de techo y localmente como impermeable debido a la acción de fallas.

## 4.2. DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS

Los planes hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Segura (DHS) y del Júcar (DHJ) diferencian 4 acuíferos: tres en la DHS (Boquerón, Búhos y Umbría) y uno en la DHJ, denominado Mancha Oriental.

Los trabajos realizados en el presente estudio para mejorar la delimitación de estos acuíferos y en especial para definir la naturaleza de los límites en el entorno de la divisora hidrográfica entre las dos demarcaciones, se han basado en la utilización de varias técnicas hidrogeológicas: revisión de cartografía hidrogeológica en el campo; cortes hidrogeológicos; campaña piezométrica *flash* y análisis del balance hídrico y cálculo de la recarga a los acuíferos por los métodos de balance de agua en el suelo y balance químico (cloruros).

Los límites propuestos se indican en los cuatro planos que acompañan a la presente memoria y en algunos casos presentan variaciones apreciables con respecto a la definición previa recogida en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura (Plano 4).

La zona se caracteriza por la escasez de afloramientos del impermeable de base general del Trías en la mayor parte de los límites y por una presencia limitada de la formación Madroño, de naturaleza margosa. En estas condiciones, juegan un papel fundamental los subafloramientos de estas formaciones en los ejes de los anticlinales y en las unidades cabalgantes, por lo que la comprensión de la estructura geológica de la zona tiene una importancia fundamental. Desde hace años la explotación por bombeo es muy intensa, 28,46 hm<sup>3</sup>/año (CHS, 2006), lo que ocasiona descensos generalizados y que se observen grandes conos piezométricos que permiten deducir variaciones en las direcciones de flujo con respecto a una situación previa a los años 1970, en régimen natural. El régimen influenciado ha producido divisorias piezométricas que deben ser consideradas.

La delimitación de acuíferos tiene un carácter general a nivel del Jurásico. Ya se ha comentado que el Dogger es la formación permeable principal de la zona. Se desconoce el funcionamiento hidrogeológico de la formación Carretas (Lías) ya que no es captada por sondeos, aunque el conocimiento regional del flujo induce a pensar que guarda relación con el Dogger.

### 4.2.1. Acuífero Boquerón

- El límite meridional está definido por los afloramientos triásicos situados al SE de Hellín, al sur de las estribaciones de las sierras de Romeral y Las Quebradas. Hacia el este del límite los afloramientos triásicos están recubiertos por materiales cuaternarios y pliocuaternarios.
- El límite occidental está definido por el levantamiento del impermeable de base en el eje antiformal del Talave, donde aflora ampliamente la formación Madroño y se producen inyecciones de Trías a lo largo de las fallas asociadas, algunas de las cuales llegan a aflorar.
- El límite oriental puede deducirse de la alineación tectónica Hellín-Tobarra como prolongación de la alineación triásica Tobarra-Sierra de Conejeros y Hellín-Ontur-Montealegre del Castillo (Rodríguez Estrella, 1979)
- El límite septentrional se deduce del levantamiento de la formación Madroño y del Trías merced a un conjunto de cabalgamientos y anticlinales, que ya fue puesto de manifiesto por Senent (1975, planos 4 a 7). El límite se ha trazado por los afloramientos del Lías medio-superior de la Sierra de los Montesinos, las estribaciones SE de las Sierras de la Umbría del Rincón y el Cerro de las

Trifillas. Se trata de afloramientos dispersos que afloran en el núcleo de pequeños anticlinales, que hacen pensar que en esta zona exista un levantamiento local, que dificulta el paso del flujo subterráneo.

No se puede asegurar que el límite con el acuífero Búhos sea completamente cerrado, pudiendo permitir la transferencia de agua desde el sector meridional del acuífero Búhos hacia el acuífero Boquerón. Este flujo ha ido disminuyendo a medida que han ido aumentando los bombeos en el acuífero Búhos, de modo que en la actualidad debe ser muy poco importante o incluso nulo.

El límite con el acuífero Umbría es claramente abierto y permite una transferencia subterránea desde éste hacia Boquerón.

El acuífero así definido supone una superficie de 83,9 km<sup>2</sup>, de los que 30,43 km<sup>2</sup> pertenecen a afloramientos permeables. Los límites propuestos suponen un aumento de superficie con respecto a los límites definidos en el Plan Hidrológico de Cuenca del Segura (PHCS) de un 12,1 %. Las modificaciones se localizan en el sector septentrional y occidental del acuífero.

#### **4.2.2. Acuífero Umbría**

- El límite sur se corresponde con el límite norte del acuífero Boquerón anteriormente definido.
- El límite occidental está definido por un antiforme del Talave, que juega un papel similar al del acuífero Boquerón, pues se trata de la misma estructura geológica. En el antiforme se produce un levantamiento del impermeable de base regional. A la altura aproximada de la intersección del Túnel del Talave gira en dirección O-E por el afloramiento de Madroño hasta alcanzar el levantamiento asociado al cabalgamiento septentrional de la Sierra de Cantalobos hasta la altura del paralelo que pasa por Nava de Abajo.
- El límite oriental está definido por los afloramientos dispersos de la formación Madroño que aflora en las Sierras de la Umbría del Rincón y en las estribaciones orientales del Cerro del Cangilón. Entre ambos hay dos zonas de recubrimiento Cuaternario que impide detallar la continuidad de esta estructura en profundidad, por lo que no puede descartarse una conexión con el acuífero Búhos. Entre el sector occidental de la Sierra de Búhos y el Dogger del Cerro del Romeral, el límite puede corresponder con una divisoria piezométrica. En el Cerro del Romeral se ha inventariado el sondeo 2432-80042, que se encuentra seco, indicativo de una zona desaturada o de baja transmisividad.
- El límite septentrional es el más difícil de definir, dada la ausencia de barreras impermeables que afloran de un modo continuo. En la situación actual se ha estimado conveniente trazarlo basándose en el levantamiento del impermeable de base al sur de Nava de Arriba hasta el Dogger del Cerro del Romeral.

La superficie del acuífero así definido es de 135,31 km<sup>2</sup>, de los que 47,4 km<sup>2</sup> se corresponden con afloramientos permeables.

Los límites propuestos suponen un aumento de superficie con respecto a los límites definidos en el PHCS del 50,9 %. Las modificaciones se localizan en el sector septentrional y occidental del acuífero.

#### **4.2.3. Acuífero Búhos**

- El límite sur coincide con el septentrional del acuífero Boquerón en su sector oriental.

- El límite occidental del acuífero coincide con el límite oriental del acuífero Umbría.
- El límite oriental tiene varios segmentos de diferente naturaleza y comportamiento hidrogeológico:
  - √ Al SO de Tobarra el límite se traza por el interior de la Sierra de Montesinos, debido al afloramiento de la formación Madroño provocado por un cabalgamiento de vergencia oeste.
  - √ Desde aquí el límite discurre debajo del Cuaternario de la cabecera de la Rambla de Polope, donde se situaban los manantiales de Polope y Mercedes (253320032 y 253320031), secos a consecuencia de los bombeos en el acuífero. Los terrenos impermeables en el límite pueden ser la formación Madroño que aflora ampliamente en el entorno del Balneario de La Pestosa o incluso el Trías, que también aflora, si bien de un modo muy limitado, en esta zona.
  - √ A continuación el límite continúa hacia el norte por los afloramientos de la formación Madroño en las estribaciones orientales la Sierra Abenuz y zona centro-meridional de la Sierra de los Navajuelos.
  - √ Desde aproximadamente la zona en que la autovía corta la sierra se produce un hundimiento gradual del Jurásico y por lo tanto de los impermeables que conforman sus límites que se hacen progresivamente menos claros. A falta de estudios específicos en esta zona que dispongan de datos de geofísica y sondeos de investigación, la posición del límite discurre aproximadamente por la actual definición del acuífero Tobarra-Tedera-Pinilla (IGME, 1988), si bien en este estudio se le ha tratado de dar mayor precisión al aprovechar una de las fallas de mayor salto que se encuentran cartografiadas. Resulta posible continuar el límite (sin el giro a la izquierda que se da en esta zona según la definición actual en la Plan Hidrológico) según el trazado de la falla que pone en contacto el Dogger con el Malm en la alineación Pico Vecino-Cuerda de Olivares-Morra de Montesinos. Este límite viene definido por los afloramientos y subafloramientos de la formación Madroño, aunque localmente pueda existir una cierta transferencia a través de él.
- El límite septentrional es el más complejo de establecer dentro de la DHS debido a la ausencia de límites geológicos claramente identificables basados en un fuerte contraste de transmisividades. Esta es la razón de que en el PHCS (1997) el límite septentrional tenga un carácter abierto y permita unas entradas subterráneas procedentes del mismo acuífero, en su parte situada en la DHJ. La existencia de esta transferencia en régimen natural, no es más que la constatación de que el límite actualmente definido en el PHCS es un límite convencional, y el límite hidrogeológico real se sitúa más al norte, en una posición que no se precisa, dentro de la DHJ. No es posible precisar la posición del límite dentro de la DHJ, pues en este territorio tampoco se observan límites impermeables de naturaleza geológica, si bien sí ha resultado posible determinar la extensión del acuífero en base al análisis de la coherencia de la superficie permeable con la tasa de recarga estimada en el área de estudio, lo que es una manera indirecta de aproximar la extensión del acuífero en la DHJ. Esta disposición geométrica es la causante de que en régimen natural, la terminación del acuífero esté relacionada con zonas de baja transmisividad relativa que causaban divisorias piezométricas con sentidos de flujo divergentes a ambos lados de la barrera (Figura 4.2).

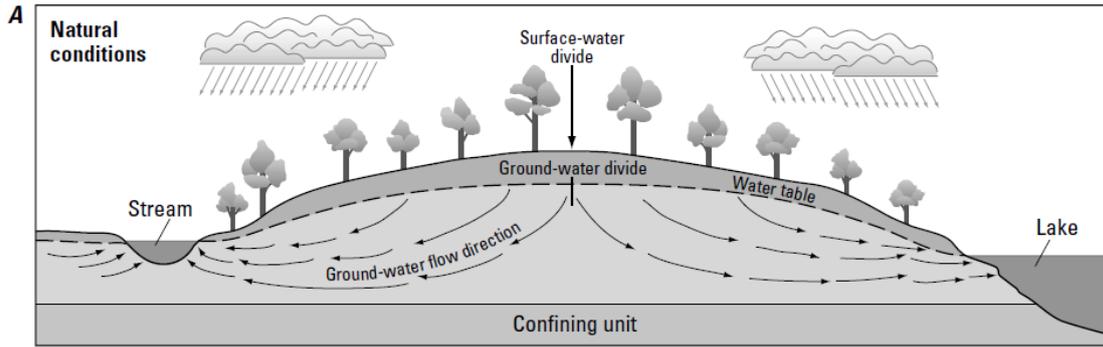


Figura 4.1. Esquema básico de una divisoria piezométrica (Grannemann 2000, en Reilly 2001) . En la cuenca hidrográfica de la derecha la escorrentía vierte a un lago y la de la izquierda a un río. La similitud en la extensión de ambas cuencas, de la precipitación sobre las mismas, la homogeneidad del acuífero y de las cotas de descarga, ocasionan una configuración hidrológica en que la divisoria piezométrica y el límite de la cuenca hidrográfica coinciden.

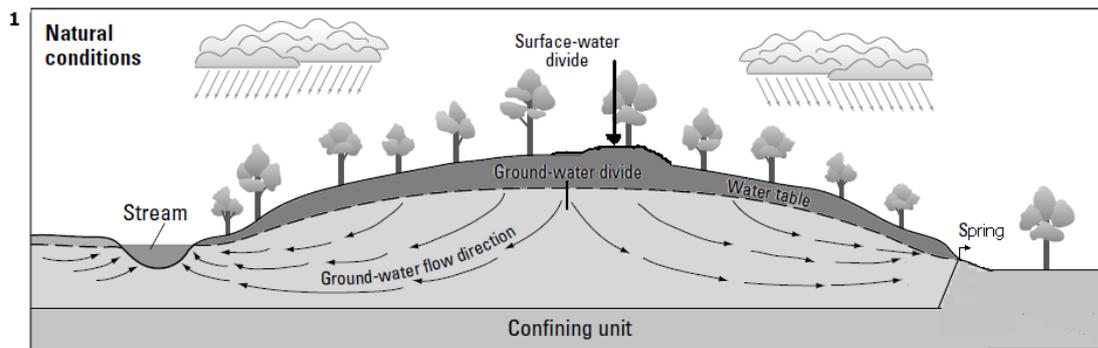


Figura 4.2. Adaptación del esquema de Grannemann (2000) para explicar de un modo simplificado el funcionamiento del límite septentrional del acuífero Búhos en régimen natural. La divisoria piezométrica donde se sitúa el límite hidrogeológico del acuífero no coincide con la divisoria hidrográfica. La cuenca de la izquierda es mayor que la de la derecha, pero la homogeneidad en los parámetros hidrogeológicos y de recarga ocasionan que los dos acuíferos tengan una superficie similar a la derecha del río. Si de un modo convencional se sitúa el límite hidrogeológico en el límite de cuenca hidrográfica, es necesario definir una entrada de agua subterránea para ajustar el balance. Esta transferencia es consecuencia de la deficiente localización del límite hidrogeológico.

Las extracciones actuales que se vienen realizando en el acuífero Búhos son superiores a los niveles de recarga, lo que ocasiona que se encuentre en una situación de sobreexplotación. Ésta ha ocasionado la compartimentación del acuífero por divisorias piezométricas de modo que en la situación actual aparece dividido en al menos tres sectores, denominados Meridional, Judarra o Intermedio y Septentrional. Este último se localizaría al norte de Judarra, aunque se delimitación precisa se desconoce por las variaciones del flujo subterráneo inducidas a causa de la sobreexplotación. Al tratarse de límites hidráulicos determinados por la distribución de las extracciones y condicionados por las barreras de transmisividad, son límites que, al menos en teoría, son móviles (Figura 4.3).

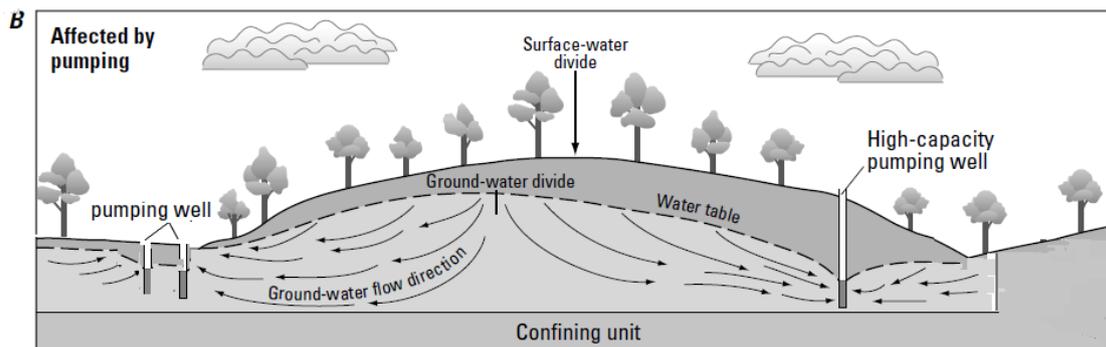


Figura 4.3. Esquema básico de variación de la posición de una divisoria piezométrica a consecuencia de la distribución de las extracciones (modificado de Grannemann 2000)

Partiendo de una situación inicial en que el límite de cuenca hidrográfica y la divisoria piezométrica coincidían en régimen natural, el distinto volumen de bombeo que se produce a ambos lados de la divisoria ocasiona su desplazamiento. Las mayores extracciones que se producen en el ejemplo en el acuífero de la derecha, ocasiona el desplazamiento de la divisoria desde su posición original hacia la izquierda.

No obstante, en la realidad la movilidad aparece limitada por la distribución de las transmisividades en el acuífero, que en gran parte están condicionadas por la tectónica que afecta a la zona. Las zonas de sierra donde aflora el Dogger tienen una sección saturada muy pequeña debido a su altitud, e incluso en algunos casos pueden encontrarse desaturada. En base a esta disposición, es posible precisar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero en sus sectores Meridional y Judarra. Se mantiene la incertidumbre en la geometría del límite septentrional, consecuencia de lo ya indicado al describir el límite septentrional del acuífero Búhos.

### Sector Judarra del acuífero Búhos

La definición de este sector del acuífero Búhos es consecuencia de la actual distribución de las extracciones en el acuífero.

- El límite meridional es consecuencia del levantamiento del impermeable de base en la Sierra de Búhos y en la Cuerda de Ballesteros, aunque en algunas zonas es posible que no sea suficiente para impedir el flujo subterráneo, que en régimen natural se dirigiría hacia el sector meridional del acuífero Búhos. En este sector se situaban los manantiales de Polope y Mercedes (25332032 y 25332031), actualmente secos a consecuencia de los bombeos.
- El límite occidental coincide con la divisoria piezométrica descrita al tratar el límite oriental del acuífero Umbría.
- El límite oriental coincide con el del acuífero Tobarra-Tedera-Pinilla y se define por la falla de dirección NE-SO del Dogger con el Kimmeriggiense en la alineación Pico Vecino-Cuerda de Olivares. Esta falla podría permitir una cierta transferencia subterránea entre la zona septentrional de Tobarra-Tedera-Pinilla y Judarra, especialmente a la altura la Casa de las Monjas.
- El límite septentrional es una divisoria piezométrica que se apoya en una zona de menor transmisividad. Se define del siguiente modo:
  - √ En la zona occidental del límite se apoya en la zona de baja transmisividad o seca del Cerro del Romeral, que ya se ha tratado al comentar el límite septentrional del acuífero Umbría.

- √ En el otro extremo, el límite se justifica con el afloramiento del Lías al sur de Las Tosquillas.
- √ Por último, la sección central del límite es una divisoria piezométrica que se ha trazado por la zona central del Mioceno de Buenavista.

El sector Judarra tiene una superficie de 100,38 km<sup>2</sup>, de los que 29,47 km<sup>2</sup> se corresponde con afloramientos permeables.

La superficie del sector meridional de Búhos es de 81,82 km<sup>2</sup>, de los que 15,44 km<sup>2</sup> se corresponde con afloramientos permeables. Los dos sectores definidos suman 182,2 km<sup>2</sup>, pero es una superficie incompleta para la totalidad del acuífero de Búhos, pues faltaría por definir el sector septentrional, ya que se ignora su continuidad hacia el norte. Esta definición implica trabajos complementarios que requieren medios adicionales que exceden a los objetivos del presente estudio.

La superficie del acuífero Búhos en el PHCS es de 160 km<sup>2</sup>, pero tal como ya se ha indicado, es una superficie igualmente incompleta. La definición actual con la consideración de límite septentrional abierto es una solución aceptable en tanto no esté disponible una definición más precisa del sector septentrional del acuífero.

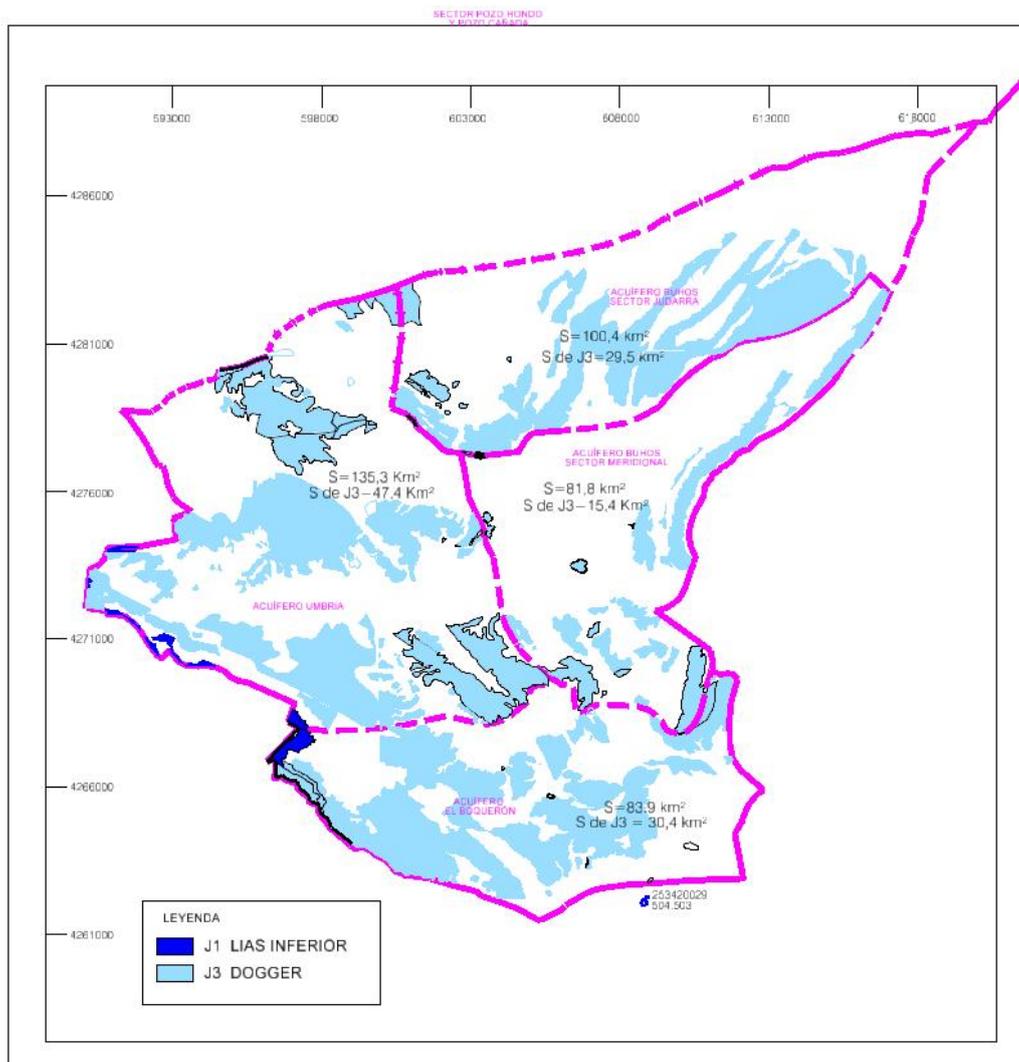


Figura 4.4 Superficie de los materiales permeables de los acuíferos.

#### 4.3. FLUJO SUBTERRÁNEO

La información piezométrica disponible para caracterizar el régimen natural mediante un mapa de isopiezas es bastante incompleta, pues desde la definición del acuífero Boquerón (Senent et al. 1975), en la zona no se han realizado estudios complementarios hasta el realizado por CHS (2007).

En el presente estudio se analiza la evolución espacio-temporal del flujo mediante el análisis de la información de las redes de control piezométrico en los acuíferos Boquerón, Umbría, Búhos (DHS) y sector meridional del acuífero Mancha Oriental (DHJ) y de los datos históricos del IGME, además de los trabajos de actualización de la infraestructura hidrogeológica llevados a cabo en el presente estudio.

Para la caracterización del flujo subterráneo actual se ha realizado una campaña piezométrica *flash* con nivelación de los puntos de control de mayor interés. El mapa de isopiezas obtenido se presenta en el plano 3, y se ha elaborado con los datos obtenidos durante la campaña piezométrica llevada a cabo durante el mes de mayo del año 2010.

Cuadro 4.1. Campaña piezométrica en la zona de estudio

Código IGME	X UTM (m s.n.m.)	Y UTM (m s.n.m.)	Z boca sondeo (m s.n.m.)	Fecha	Profundidad NP (m)	Cota NP (m s.n.m.)
253210043	604.461	4.297.942	795	25/05/2010	159,49	635,51
253210044	601.698	4.295.329	798	25/05/2010	163,62	634,38
253210048	604.684	4.293.429	866	25/05/2010	233,5	632,5/Seco
253210056	600.367	4.293.322	829	27/05/2010	194,72	634,28
253220270	613.988	4.294.592	863	25/05/2010	190,8	672,2
253225002	608.212	4.290.593	871	25/05/2010	238,95	632,05
253220275	607.556	4.294.444	830	25/05/2010	199,35	630,65
253220277	611.353	4.297.808	818	25/05/2010	154,45	663,55
253250043	601.061	4.286.093	856,51	31/05/2010	224,2	632,31
253250046	605.925	4.282.127	849	26/05/2010	212,15	636,85
253250048	601.022	4.282.082	790,6	02/06/2010	160,5	630,1
253255004	601.528	4.286.300	848	31/05/2010	214,05	633,95
253250058	605.466	4.282.664	848	28/05/2010	210,4	637,6
253255006	604.653	4.285.115	899	28/05/2010	263,22	635,78
253265003	611.957	4.283.065	854	28/05/2010	214,59	639,41
253270063	613.891	4.283.589	793,8	28/05/2010	159,81	633,99
253310010	600.912	4.273.197	730	04/05/2010	142	588
253310011	602.190	4.273.954	725	04/05/2010	121	604
253310020	602.538	4.279.600	775	31/05/2010	152,79	622,21
253310022	598.941	4.279.674	806,5	27/05/2010	183,45	623,05
253315003	603.597	4.276.609	768,2	26/05/2010	124,9	643,3
253315005	607.623	4.273.950	695	26/05/2010	68,85	626,15
253315006	605.979	4.275.430	725,46	26/05/2010	18,46	707
253320042	607.959	4.272.384	688,58	04/05/2010	59	629,58
253320047	609.417	4.276.603	768,8	26/05/2010	137,1	631,7
253320049	608.137	4.278.823	760	24/05/2010	133	627
243240013	595.736	4.291.611	858	31/05/2010	220,1	637,9
243285001	598.424	4.286.221	850	27/05/2010	152,3	697,7
243280049	597.239	4.284.435	830	27/05/2010	250	580
243285006	597.164	4.284.514	830	27/05/2010	200	630

Cuadro 4.1. Campaña piezométrica en la zona de estudio

Código IGME	X UTM (m s.n.m.)	Y UTM (m s.n.m.)	Z boca sondeo (m s.n.m.)	Fecha	Profundidad NP (m)	Cota NP (m s.n.m.)
243340043	597.775	4.280.353	806,58	27/05/2010	184,32	622,26
253225003	608.865	4.296.465	817,5	25/05/2010	182	635,5
253250045	600.847	4.286.240	860,2	15/05/2010	223	637,2
253315005	607.623	4.273.950	694,85	26/05/2010	68,85	626
253325003	607.514	4.280.487	798	31/05/2010	186	612
243285004	598.582	4.289.970	703	31/05/2010	86	617
253325009	609.020	4.274.573	717,79	31/05/2010	87	630,79
253215053	601.669	4.290.704		25/05/2010	seco	
243280042	599.619	4.282.478		26/05/2010	seco	
253250006	610.623	4.294.521	830,22	31/05/2010	164,22	666
253350003	606.113	4.268.007	645,85	18/05/2010	82,05	563,8
253360009	680.808	4.264.028	540,95	26/05/2010	36,81	504,14
253360004	611.093	4.263.283	580	18/02/2010	83,71	496,29

Las cotas de los sondeos se han tomado de mapas 1:25.000; salvo las que tienen decimales, que se han obtenido con altímetro de precisión.

#### 4.3.1.1. Régimen natural

En régimen natural, los recursos de los acuíferos Umbría y Boquerón descargaban por la fuente de Isso (253420029) y en menor medida por los manantiales de La Teja (253420030) y del Prado (253420030), estas últimas con unos caudales de unos 5 l/s cada una. La fuente de Isso perteneció a la red de control del IGME, registrándose caudales en torno a los 100 l/s, con un máximo observado de 150 l/s en marzo de 1990. A partir de 2002 la fuente permanece seca, si bien ha vuelto a surgir esporádicamente en relación con periodos con fuertes precipitaciones. Los recursos generados en el acuífero Umbría descargan de un modo subterráneo al acuífero Boquerón a través de un límite de carácter abierto.

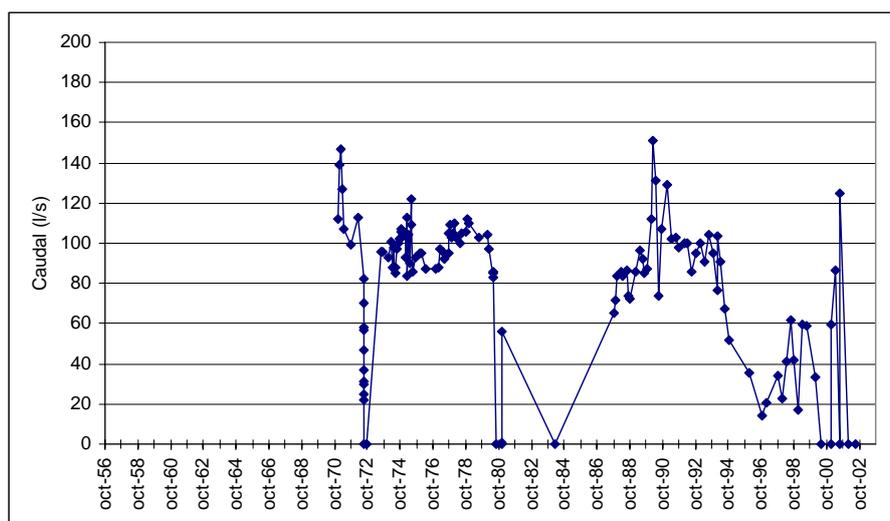


Figura 4.5. Hidrometría de la fuente de Isso (acuífero Boquerón-Umbría)

El acuífero Búhos descargaba en régimen natural por las fuentes de Polope y Mercedes. La fuente La Pestosa, con cota muy similar a la de Mercedes (5 m de diferencia), se secó más tarde aunque surgía a menor cota, por lo que podría indicar que es representativa de un nivel diferente a la formación del Dogger, quizás la formación Carretas. Por ello no se asigna a este acuífero.

Es importante indicar la existencia de una transferencia subterránea desde el sector meridional del acuífero Búhos al acuífero Boquerón. La naturaleza tectónica del levantamiento del impermeable de base que se describió al explicar el límite septentrional del Boquerón no permitía establecer una mayor precisión. La disponibilidad de una geofísica en el valle que se extiende en dirección O-E desde la Cañada de Tobarra hasta la antigua zona de surgencia del acuífero, permitiría comprender mejor el funcionamiento de este sector.

Ya se ha comentado al describir los límites del acuífero que del análisis de la recarga (ver epígrafe 4.4) y estimación del área generadora en relación con la superficie de afloramientos permeables, la extensión del acuífero se extiende a la cuenca hidrográfica del Júcar.

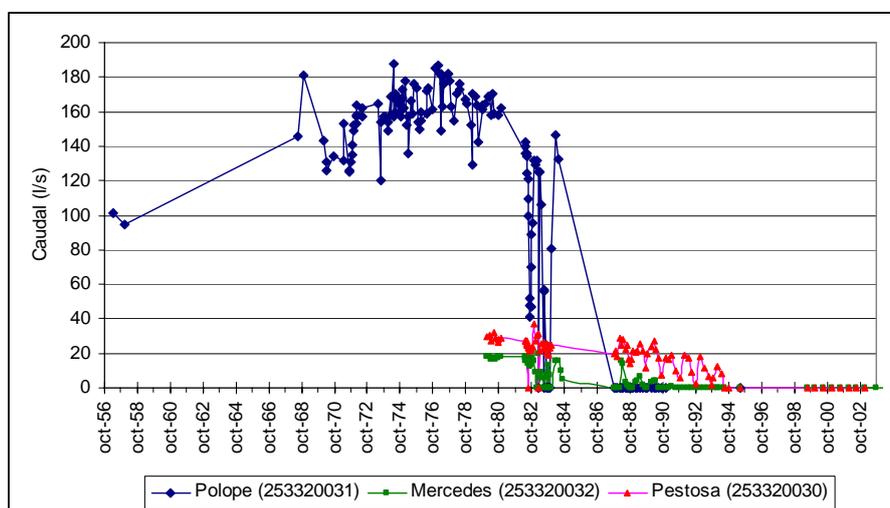


Figura 4.6. Hidrometría de las fuentes Polope y Mercedes (acuífero Búhos)

#### 4.3.1.2. Régimen influenciado

Desde los trabajos hidrogeológicos iniciales realizados por el IGME en el marco del estudio hidrogeológico Cazorla-Hellín-Yecla (IGME, 1978), los bombeos en la zona sur de Albacete fueron incrementándose gradualmente hasta superar en algunos casos los recursos subterráneos renovables.

Los significativos descensos piezométricos causados por estos bombeos han alterado sensiblemente el esquema de circulación del agua subterránea en los acuíferos Mancha Oriental y los tratados en el presente estudio. En el acuífero Búhos los bombeos han mermado muy significativamente o incluso hecho desaparecer la transferencia subterránea que en régimen natural existía entre la DHJ y la DHS. El acuífero Umbría se ha visto menos afectado por el incremento de las extracciones.

En el presente capítulo se analizará primero las evoluciones temporales de los piezómetros, para luego analizar el flujo subterráneo actual deducido de un mapa de isopiezas (Plano 3).

### **a) Análisis de las evoluciones piezométricas**

Se parte de los sondeos de la red de control piezométrico de la CHS situados en los acuíferos estudiados (en la actual definición del PH de la cuenca del Segura: 243340051, 253270063, 253310011, 253310022, 253320042 y 253350003) y de los piezómetros 08.09.005, 08.09.036, 08.09.040, 08.09.074 asignados a la MASUB Mancha Oriental (DHJ). La situación de los piezómetros puede observarse en los planos 1 y 3.

#### **Acuíferos Umbría y Boquerón**

En la actualidad se controla un piezómetro construido por la CHS (2433-50051) en la zona septentrional del acuífero, que da continuación al de titularidad privada 2533-10022, que en su conjunto aportan un registro muy completo desde el año 1982 (Figura 4.7). Entre 1973 y 1991 el IGME controló el sondeo 2533-10011, situado en la zona central del acuífero (Figura 4.8). En la zona septentrional del acuífero Boquerón se controla el sondeo 2533-50003, también con registro histórico muy completo (Figura 4.9).

Con las diferencias específicas de su entorno hidrogeológico más próximo, la evolución piezométrica es muy similar. Hay periodo de ascenso piezométrico entre 1973 y 1979 imputable al régimen de recarga, y desde entonces una tendencia descendente muy bien definida que caracteriza claramente una situación de sobreexplotación.

El sondeo 2433-40051 se observa una evolución marcadamente negativa desde 1982. La cota piezométrica ha pasado de 681,81 m s.n.m. a 622,83 m s.n.m., con un descenso medio de 2,2 m/año. La leve recuperación que se aprecia al final del registro se entiende por las elevadas precipitaciones de 2009-2010. Es interesante observar que en el periodo de solape de medidas con el sondeo 253310022 (los dos están nivelados) el flujo subterráneo se mantiene NO-SE.

En el sondeo 2533-10011 se observan dos tendencias claramente diferenciadas. Una primera desde 1973 hasta 1982, donde el acuífero se muestra en equilibrio, al menos en este sector. A partir de esta fecha comienza un descenso continuado de los niveles piezométricos, producto de la sobreexplotación del acuífero, que se mantiene hasta la actualidad. Los descensos van desde 680 m s.n.m. a 604 m s.n.m., a un ritmo medio de 2,6 m/año, lo que supone un descenso total de 76 m.

En el piezómetro del acuífero Boquerón se pueden diferenciar 3 fases. Una primera comprendida entre 1971 y 1979, donde se observa una tendencia al equilibrio. A partir de 1979 se inicia la sobreexplotación del acuífero con una tendencia negativa de la evolución piezométrica, que se acentúa entre 1986 y 1988, en que la cota de agua desciende desde los 577,47 m s.n.m. a 572,84 m s.n.m., a un ritmo medio de 1,6 m/año, posiblemente debido a la influencia de un bombeo local. Entre 1988 y 1991 se observa una recuperación parcial que aproxima la evolución del piezómetro a la tendencia descendente general del acuífero. Esta tendencia local se interpreta como el cese de las afecciones locales al piezómetro. Desde entonces la tendencia negativa se mantiene hasta la actualidad, con un ritmo de descensos de 0,6 m/año.

Una de las características de este acuífero es el fuerte gradiente (SE-NO) del impermeable de base, determinado por causas geológicas, lo que determina a su vez

un gradiente piezométrico muy marcado. En estas condiciones, el caudal en la Fuente de Isso no se ve significativamente afectado en su tendencia general (descontados las afecciones locales causadas por los bombeos de la batería del Boquerón (BO-104, 106 y 107) hasta el año 1994, cuando el nivel en el piezómetro 2533-50003 desciende por debajo de la cota 573 m s.n.m.

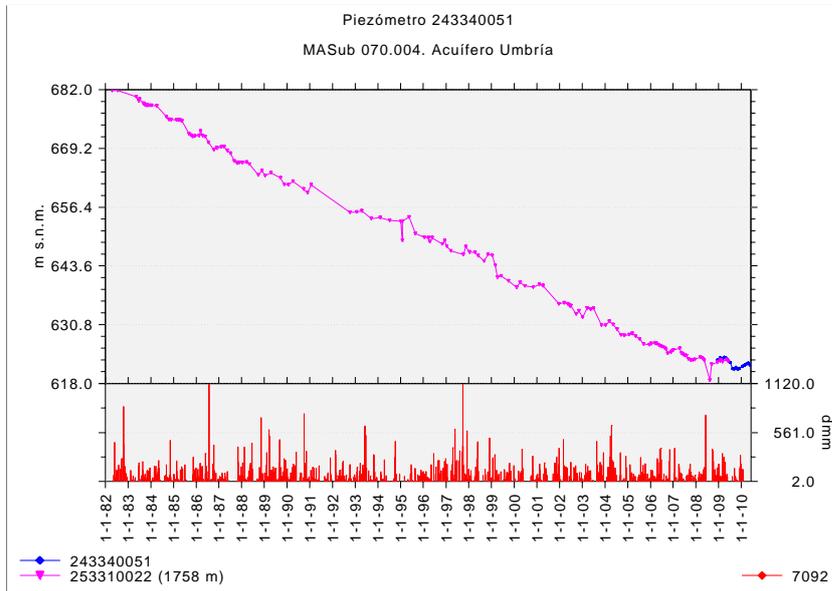


Figura 4.7. Evolución piezométrica en los sondeos 2433-50051 y 2533-10022

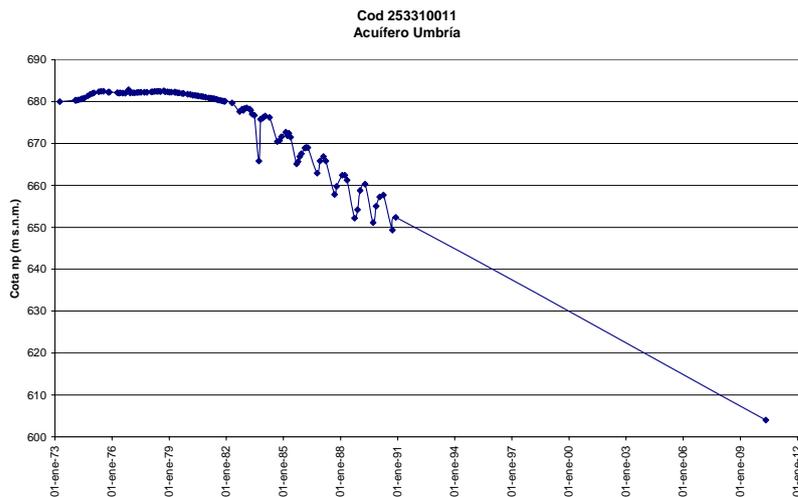


Figura 4.8. Evolución piezométrica en el sondeo 253310011

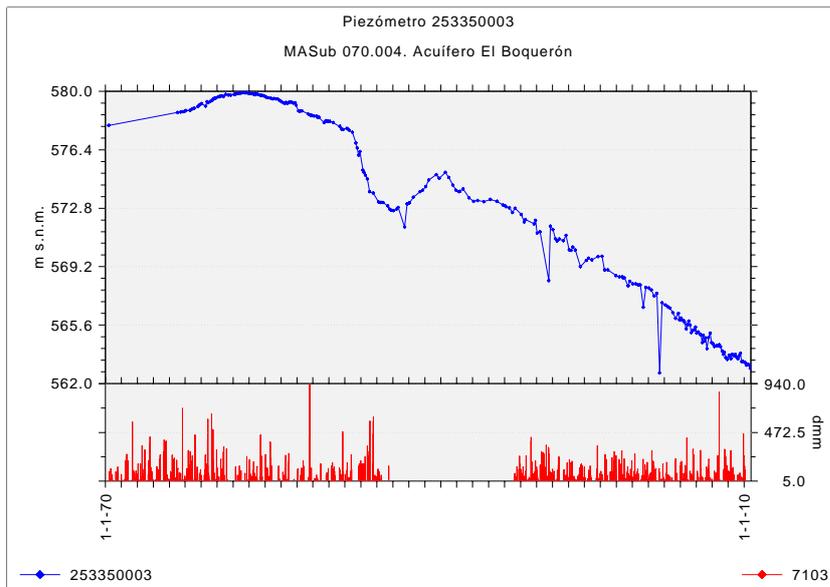


Figura 4.9.  
Evolución  
piezométrica en el  
sondeo 2533-50003

### Acuífero Búhos

Hay dos piezómetros de control. El 2532-70063 se sitúa en la zona nororiental (Figura 4.10) y el 2532-10042 (Figura 4.11) controla la evolución de la zona meridional y se sitúa próximo a las surgencias naturales del acuífero en la cabecera de la Rambla de Polope. Los dos tienen una evolución similar: los descensos son inicialmente relativamente suaves y se incrementan de una manera progresiva hasta que aproximadamente entre 1995 y 2008 alcanzan sus valores máximos, con una tendencia bastante constante. Desde 2008 se observa una estabilización o disminución del ritmo de descensos a consecuencia de la mayor pluviometría de estos últimos años. En este caso, la zona meridional de explotación se sitúa próxima a los manantiales principales, y la afección a sus caudales se empieza a notar a partir de 1982, cuando los descensos piezométricos en el acuífero aún eran pequeños.

En el piezómetro 2532-70063 el primer periodo de descenso suave se aprecia entre 1982 y 1995, con un valor medio de 0,6 m/año. Desde el 1995 hasta el año 2008, el ritmo de descensos asciende a 1,4 m/año. Finalmente a partir del año 2008 se observa una disminución de los descensos, relacionado con las mayores precipitaciones.

En el piezómetro 2532-10042 se observan tres fases. La primera está comprendida entre el inicio del registro en el año 1971 hasta aproximadamente 1987, en la cual el acuífero se encuentra próximo al equilibrio. A partir de 1987, la tendencia se va definiendo de un modo gradual como marcadamente negativa con un aumento de descensos entre 1999 a 2007. Desde 2008, como consecuencia de una disminución de las extracciones y un aumento de la pluviometría, se observa una tendencia más estabilizada. Entre el año 1987 y el año 2007 se ha producido un vaciado del acuífero de más de 30 m.

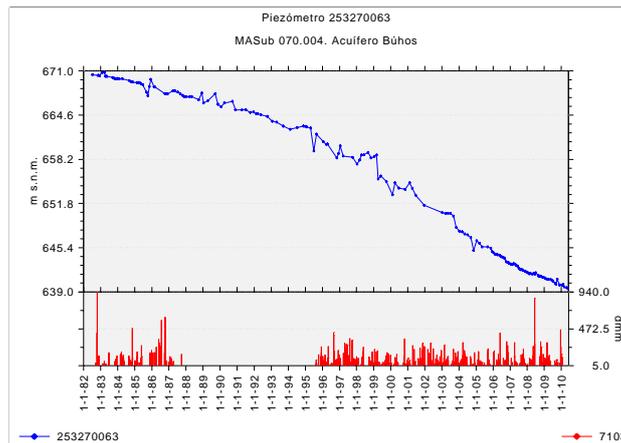


Figura 4.10. Evolución piezométrica en el sondeo 2532-70063

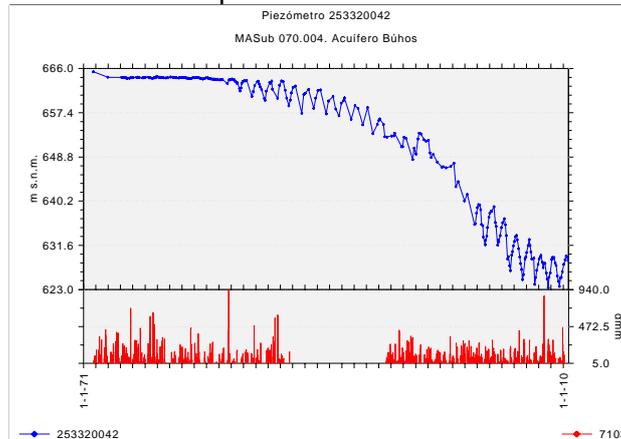


Figura 4.11. Evolución piezométrica en el sondeo 2532-20042

### Acuífero Mancha Oriental, sector Pozohondo-Pozo Cañada

El sector Pozo Hondo-Pozo Cañada del acuífero Mancha Oriental sólo tiene un piezómetro de la red de control (08.29.036) con un historial piezométrico largo (Figura 4.13) y se sitúa a 7,5 km al noroeste de Pozo Cañada. En esa zona, aunque menos distante de Pozo Cañada, se localiza el 08.29.040, con datos entre 1982 y 2001 (Figura 4.14). El piezómetro 08.29.005 (2532-20270) ha entrado en funcionamiento en 2008 (Figura 4.12) y se sitúa más próximo a la zona de más interés para el estudio, a 2 km al E-SE de esa población. Por último, el 08.29.074 (243240010), situado a 4,5 km al N-NE de Pozo Hondo, se empezó a medir en 1974 y se abandonó en 1996 (Figura 4.15).

El acuífero se caracteriza por una evolución descendente muy clara que pone de manifiesto una situación de sobreexplotación. La aparición de descensos residuales se inicia antes en la zona septentrional (08.29.036), mientras que al sur del paralelo de Pozo Cañada se inician a principios de la década 1980. Los ritmos de descensos medios son variables según el piezómetro considerado y oscilan entre 0,8 m/año en el 08.29.036 y 1,9 m/año en el 08.29.074 (243240010). Al sur de Pozo Cañada apenas existen datos piezométricos.

La evolución entre 2002 y 2009 del piezómetro 08.29.036 parece obedecer a condiciones locales. En el piezómetro de nueva construcción 08.29.005 (253220270), en el periodo de evolución reciente mantiene una tendencia de descenso ligeramente inferior a 1 m/año.

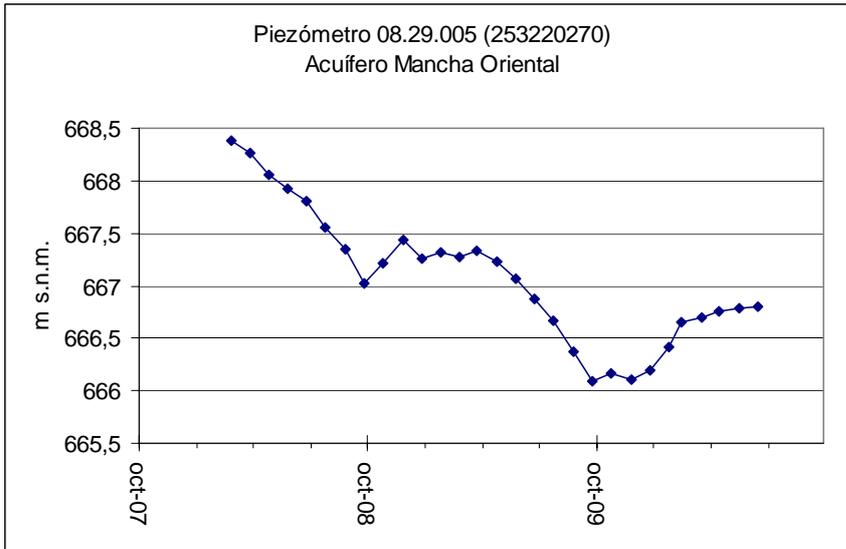


Figura 4.12.  
Evolución  
piezométrica en el  
sondeo 08.09.005

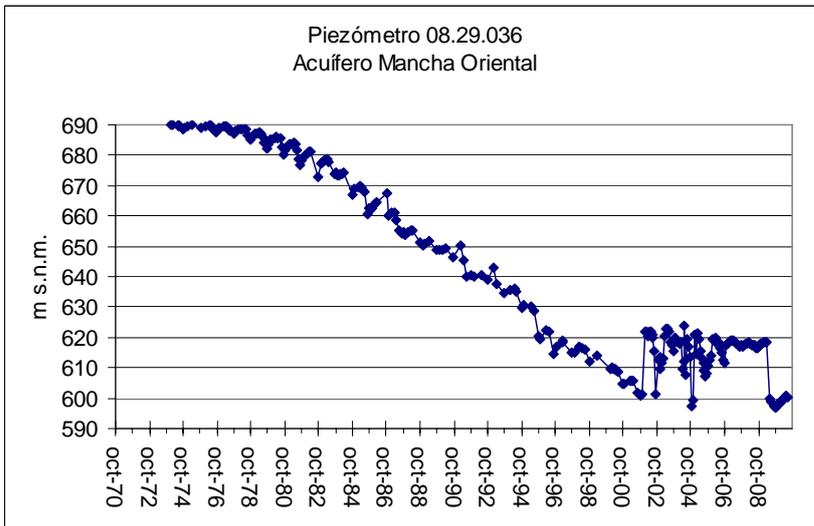


Figura 4.13.  
Evolución  
piezométrica en el  
sondeo 08.09.036

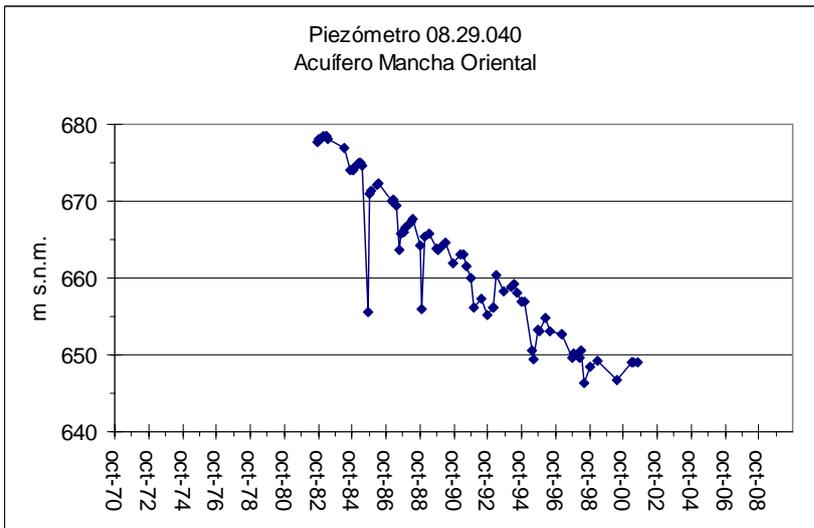


Figura 4.14.  
Evolución  
piezométrica en el  
sondeo 08.09.040

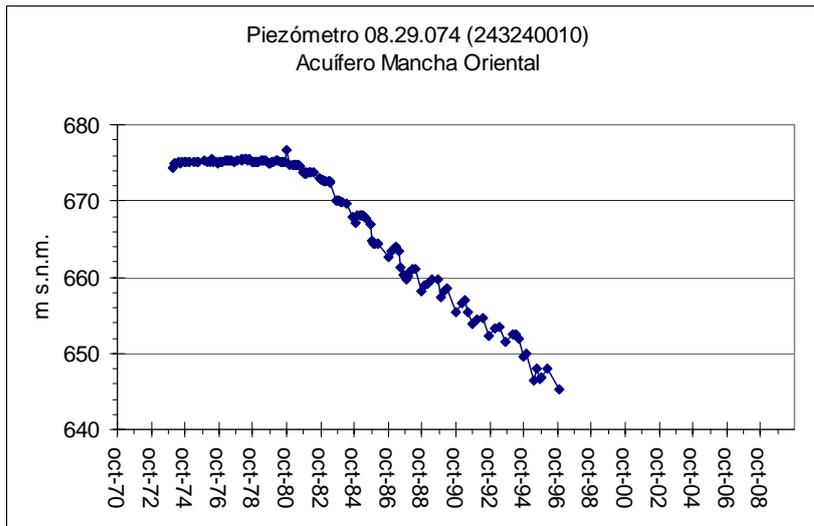


Figura 4.15.  
Evolución  
piezométrica en el  
sondeo 08.09.074

### b) Isopiezas en junio de 2010

Los flujos subterráneos en régimen natural han sido profundamente modificados por el efecto de los bombeos y la sobreexplotación de los acuíferos. El mapa de isopiezas elaborado con los datos obtenidos en finales de abril de 2010 (Plano 3) pone de manifiesto la existencia de dos grandes conos de bombeo:

#### **Acuífero Umbría-Boquerón**

Se aprecia un flujo subterráneo continuo NO-SE, con una zona de baja transmisividad en la zona meridional del acuífero. Esta baja transmisividad está causada por la tectónica de cabalgamientos y fallas inversas de la zona, que ocasionan un levantamiento de la formación Madroño y disminuye significativamente la sección saturada del acuífero.

En la zona NO del acuífero, la posición del límite con el sector Judarra del acuífero Búhos e incluso con el sector Pozo Cañada-Pozo Hondo de Mancha Oriental se sitúa por divisorias piezométricas condicionadas por los bombeos.

La zona más occidental del acuífero ha sido cortada por el túnel del Talave, que podría drenar de un modo muy local esta zona.

En la situación actual, las detracciones de recursos al acuífero a consecuencia de los bombeos en la DHJ parecen poco significativas y la disminución del caudal surgente en la Fuente de Iseo es consecuencia de los bombeos en el sistema Umbría-Boquerón, que en función del análisis realizado en el presente estudio podrían considerarse un único acuífero.

#### **Acuífero Búhos**

El flujo natural desde el sector septentrional del acuífero hacia los manantiales de Polope y Mercedes (2533-20031 y 20032) se ve interrumpido en el denominado sector Judarra, o sector intermedio del acuífero. En el interior del cono, las cotas son inferiores a 620 m s.n.m. No se descarta una pequeña transferencia subterránea a

través de su límite nororiental, pero el área generadora de recursos subterráneos drenables hacia Judarra en la situación actual es pequeña, y aparece limitado por la barrera de transmisividad Ontalafia-Chertal y el sur del piezómetro 2532-20270. Esta última zona límite puede deducirse del flujo subterráneo S-N que se observa en un bloque situado inmediatamente al este de Pozo Cañada, entre los sondeos 2532-20270 y el 2532-20277. Tampoco puede descartarse completamente una transferencia poco significativa a través del límite suroriental del sector Judarra hacia el sector meridional del acuífero Búhos.

Dentro del sector meridional del acuífero Búhos, las mayores depresiones se observan en los pozos situados inmediatamente hacia el oeste de las antiguas surgencias naturales del acuífero.

No se puede descartar una transferencia subterránea desde el sector del acuífero situado al sur del paralelo que pasa por el antiguo nacimiento de la Fuente de Polope hacia el acuífero Boquerón, pero con la situación de sobreexplotación que se observa en este sector, de existir debe ser muy poco importante, y se debe más bien a las imprecisiones que pueden existir en los límites entre los dos acuíferos como consecuencia de la gran complejidad tectónica de la zona y a la escasa información existente de sondeos y de geofísica.

### **Sector Pozo Hondo-Pozo Cañada del acuífero Mancha Oriental**

Entre Pozo Hondo y Pozo Cañada se ha formado una amplia zona piezométricamente deprimida a consecuencia de los bombeos que se producen en su interior. Este macrocono puede aparecer más acusado por el hecho que en la época en que se realizó la campaña *flash* ya se había iniciado la campaña de bombeos.

La alineación Ontalafia-Chertal (al SO de Pozo Cañada) define una barrera de transmisividad determinada por el afloramiento de la formación Madroño. Esta barrera continúa por el este de Pozo Cañada, a la luz de la interpretación piezométrica de los sondeos 2532-20270 y el 2532-20277, si bien en esta zona resulta difícil de explicar este comportamiento en función de los datos geológicos disponibles.

Es muy posible que en régimen natural el sector definido al este de la Sierra de Ontalafia pudiese drenar hacia la DHS, pero la falta de información piezométrica impide realizar una conclusión firme a este respecto.

#### **4.4. ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO Y COHERENCIA CON LA DELIMITACIÓN GEOMÉTRICA DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA BOQUERÓN.**

Desde el punto de vista hidrogeológico, el valor y la distribución espacial y temporal de algunos términos del balance analizados sirven para mejorar el modelo conceptual del acuífero y su funcionamiento. El cálculo y análisis individualizado de algunos de los términos presentan una cierta complejidad, circunstancia que, de forma idéntica a otras variables de tipo hidrológico se traduce, en la mayoría de los casos, en una importante incertidumbre que es necesario valorar. Estudios recientes (IGME, 2009) han ayudado a definir con mayor precisión la estructura hidrogeológica y el balance hídrico en áreas limítrofes a la zona de estudio, concretamente en la Masa de Agua Subterránea de Alcaozo. Esta mayor precisión ha estado relacionada con el método de cálculo, ya que éste ha permitido calibrar los resultados temporales con las descargas naturales que se están produciendo de manera concentrada en algunos sectores acuíferos. De manera resumida es oportuno indicar que la aplicación de la modelación numérica mediante el código Visual Balan (Samper y García-Vera, 1999) está basada en el carácter secuencial de determinados balances de agua que se producen en los acuíferos durante el proceso de recarga, concretamente los referidos a los balances de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el propio acuífero.

Las masas de agua subterránea de Alcaozo y Boquerón presentan algunos elementos de correlación, fundamentalmente en lo que se refiere a sus características hidrogeológicas, tipo de estructura hidrogeológica y materiales permeables. Además, su situación geográfica y las variables climatológicas presentan características similares que permiten extrapolar ciertos parámetros y estimaciones dentro de este ámbito hidrogeológico. En este sentido se ha considerado que es factible extrapolar el valor de la recarga media interanual estimada en la MAS de Alcaozo, considerándola en términos de tasa media, es decir, valor medio de la fracción de precipitación que se infiltra en el acuífero. Para ello será necesario encontrar algún elemento de calibración, de tal manera que el grado de incertidumbre se pueda minimizar. Los elementos de calibración en la estimación de la recarga en la MAS de Boquerón serán, principalmente, la información hidrológica disponible, es decir, piezometría y caudales de descarga por manantiales. Asimismo los resultados deberán ser coherentes con la nueva definición geométrica propuesta en este estudio, que modifica parcialmente los límites hidrogeológicos y, por tanto, la superficie total de los materiales permeables. Es importante significar que la estimación de la recarga en la MAS Boquerón, al igual que en otras áreas de estudio con características físicas y climatológicas similares, está rodeada de ciertas incertidumbres relacionadas sobre todo con la distribución espacial y temporal de la precipitación, con las condiciones atmosféricas ambientales (temperatura), las características del suelo y de la vegetación, y a veces con las modificaciones o perturbaciones derivadas de algunas acciones antrópicas (Custodio, 2009). Esta suma de circunstancias son inherentes en muchos casos a los parámetros considerados, extrapolaciones y cálculos que se realicen y por tanto determinantes en la precisión del valor de la recarga.

Como se ha comentado, es aconsejable contrastar el valor calculado de la recarga mediante diferentes métodos. Uno de los métodos de estimación que viene experimentando un desarrollo más amplio en su implementación está basado en el cálculo de la recarga partir del valor de deposición total atmosférica de ión cloruro sobre el acuífero. El componente climático en la composición química de las aguas subterráneas es función de la composición química promedio de la precipitación atmosférica (Custodio, 1997) y la estimación de la recarga promedio en algunos acuíferos se puede realizar a partir del balance químico de sustancias conservativas procedentes casi exclusivamente de la lluvia (Eriksson y Khunakausem, 1969). Esta

metodología ha sido tratada por Custodio (1997, 1998 y 2009) y Alcalá y Custodio (2004). Los resultados obtenidos con esta metodología en diferentes ámbitos hidrogeológicos han sido valorados muy positivamente y se presentan como una técnica solvente a la hora de establecer el valor de la recarga difusa media en determinados acuíferos. Además ayuda a precisar mejor algunos términos con elevado peso en la ecuación del balance, por ejemplo, los términos que hacen referencia a la infiltración por retornos de riego o la posible transferencia de agua por entradas o salidas laterales con acuíferos adyacentes, términos que en muchos casos son imprecisos, ya que son estimados dependiendo de los otros términos y con el objetivo de cerrar el balance hídrico.

Las metodologías utilizadas para el cálculo de la recarga en la Masa de Agua Subterránea de Boquerón han sido:

- Extrapolación de los resultados obtenidos mediante Visual Balan en la MAS de Alcadozo (IGME-CHS, 2009) considerando el valor de la recarga media interanual obtenida para una serie de 20 años hidrológicos (1989-90 hasta 2008-09).
- Aplicación de métodos de balance químico utilizando el ión cloruro atmosférico (CMB). En el área de estudio, los valores de deposición de ión cloruro en agua de lluvia proceden de los trabajos de Alcalá y Custodio (2003, 2004 y 2008) y Custodio (2009), por otro lado, los valores de cloruro en el agua subterránea se han obtenido de distintas muestras, seleccionadas a partir de la información hidroquímica existente en la base de datos del IGME. Estas muestras de agua localizadas en la MAS Mancha Oriental y MAS Boquerón presentan baja mineralización, y el valor de su contenido en cloruros parece indicar que no procede de un aporte salino de origen litológico o antrópico, ya que esta circunstancia invalida el método y no permite su aplicación.

#### **4.4.1. Estimación de la recarga media aplicando Visual Balan**

En la siguiente tabla se reflejan los datos obtenidos en la MAS de Alcadozo (IGME-CHS, 2009) para la serie hidrológica analizada. Se indican temporalmente los valores de precipitación total registrada (mm/año) en la estación de Liétor-CHS ( $x=590903$   $y=4266658$   $z=641$  m snm). De acuerdo al conocimiento espacial de los materiales permeables se ha obtenido la precipitación total depositada sobre los afloramientos permeables ( $hm^3/año$ ). El valor de la recarga media e interanual se ha calculado mediante el código Visual Balan (versión 2.0) y de su resultado se ha deducido la fracción de precipitación que se infiltra sobre el acuífero. Con estos datos anuales se han calculado los diferentes valores medios, entre los que destaca la relación porcentual P/R de 10,66% obtenido para el periodo hidrológico 1989/90-2008/09, siendo P la precipitación y R la recarga por infiltración de lluvia.

Los trabajos efectuados en materia de geología, fundamentalmente los realizados para mejorar la cartografía y estructura hidrogeológica, aconsejan una nueva definición geométrica de la MAS Boquerón. En esta propuesta de redefinición de la masa de agua subterránea se han modificado los límites hidrogeológicos, por lo que ha variado la distribución y superficie total de los materiales permeables del Lías y Dogger (ver figura 4.4). El cálculo de la recarga ha sido realizado teniendo en consideración esta nueva definición, sobre todo en lo que se refiere a la información aportada a nivel espacial de los materiales permeables, ya que éstos se corresponden con las áreas principales de recarga, ya sea por infiltración de lluvia y/o retornos de riego.

Tabla 4.1 Datos obtenidos de recarga en la MAS de Alcadozo aplicando el código Visual Balan

<b>MAS ALCADOZO (Sector acuífero Ayna y Liétor)</b>						
<b>Año Hidrológico</b>	<b>nº año</b>	<b>Precipitación Liétor CHS (mm)</b>	<b>Precipitación total afloramientos (hm<sup>3</sup>/año)</b>	<b>Recarga (hm<sup>3</sup>/año)</b>	<b>% P/R</b>	<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>
1989-90	1	453	17.5311	3.818	<b>21.78</b>	<b>38700000</b>
1990-91	2	316	12.2292	1.096	<b>8.96</b>	
1991-92	3	381	14.7447	1.532	<b>10.39</b>	
1992-93	4	389	15.0543	0.3844	<b>2.55</b>	
1993-94	5	187	7.2369	0.08504	<b>1.18</b>	
1994-95	6	227	8.7849	1.562	<b>17.78</b>	
1995-96	7	394	15.2478	0.5326	<b>3.49</b>	
1996-97	8	768	29.7216	1.782	<b>6.00</b>	
1997-98	9	382	14.7834	5.374	<b>36.35</b>	
1998-99	10	280	10.836	1.0114	<b>9.33</b>	
1999-00	11	239	9.2493	0.07011	<b>0.76</b>	
2000-01	12	302	11.6874	0.2206	<b>1.89</b>	
2001-02	13	455	17.6085	2.131	<b>12.10</b>	
2002-03	14	306	11.8422	0.09464	<b>0.80</b>	
2003-04	15	689	26.6643	5.553	<b>20.83</b>	
2004-05	16	253	9.7911	0.9259	<b>9.46</b>	
2005-06	17	382	14.7834	0.05264	<b>0.36</b>	
2006-07	18	389	15.0543	2.412	<b>16.02</b>	
2007-08	19	412	15.9444	0.9259	<b>5.81</b>	
2008-09	20	508	19.6596	2.252	<b>11.45</b>	
<b>Valor medio</b>		<b>386</b>	<b>14.92</b>	<b>1.59</b>	<b>10.66</b>	

A partir de los resultados y variables unitarias obtenidas en la MAS Alcadozo se ha efectuado una extrapolación en la MAS Boquerón. En la siguiente tabla se indica que la precipitación media en la estación termopluviométrica de Ontur para la misma serie temporal ha sido de 300 mm, aproximadamente un 25% menos que la registrada en la estación de Liétor-CHS. Con los valores de precipitación total interanual, superficies permeables correspondientes a cada sector acuífero de la nueva definición geométrica y porcentajes de recarga extrapolados de la MAS Alcadozo, se han estimado la recarga interanual y la recarga media. Con estos datos el valor de la recarga media por infiltración de agua de lluvia sobre los 122,7 km<sup>2</sup> de superficie total permeable ha quedado fijada en 3,62 hm<sup>3</sup>/año.

En la memoria correspondiente al “Estudio de Cuantificación del Volumen Anual de Sobreexplotación de los Acuíferos de las Unidades Hidrogeológicas 07.02 Sinclinal de la Higuera, 07.03 Boquerón, 07.16 Tobarra-Tedera-Pinilla, 07.18 Pino, 07.49 Conejeros-Albatana, 07.55 Corral-Rubio”, realizado por la Confederación Hidrográfica del Segura en 2006, se aportaban valores de precipitación-infiltración para una serie temporal de 20 años hidrológicos (1986-2005). En dicho estudio, tanto los valores interanuales como el valor medio de la recarga son algo superiores a los reflejados en la tabla anterior, circunstancia que se debe fundamentalmente a que los balances de agua en el citado estudio se han realizado a escala mensual y no diaria. En este tipo de climas de carácter árido-semiárido es fundamental realizar los cálculos a nivel diario, ya que los eventos de precipitación se producen de manera súbita y concentrados temporalmente, característica climatológica que aconseja que los cálculos no se desarrollen a nivel mensual, ya que en la mayoría de los casos se obtienen valores sobredimensionados y con una menor precisión.

Tabla 4.2. Datos obtenidos en la MAS Boquerón por extrapolación de los porcentajes de recarga calculados mediante Visual Balan en la MAS Alcadozo

MAS BOQUERÓN (Nueva Definición Geométrica)						
Año Hidrológico	nº año	Precipitación Ontur (mm)	Precipitación total afloramientos (hm <sup>3</sup> /año)	Recarga (hm <sup>3</sup> /año)	Sector acuífero y superficie permeable en m <sup>2</sup>	
1989-90	1	284	34.86	7.59	Buhos-Judarra	29470000
1990-91	2	251	30.81	2.76	Buhos meridional	15440000
1991-92	3	310	38.05	3.95	Umbría	47400000
1992-93	4	307	37.68	0.96	Boquerón	30430000
1993-94	5	206	25.28	0.30		
1994-95	6	214	26.27	4.67		
1995-96	7	349	42.84	1.50		
1996-97	8	522	64.07	3.84		
1997-98	9	254	31.18	11.33		
1998-99	10	257	31.54	2.94		
1999-00	11	227	27.86	0.21		
2000-01	12	328	40.26	0.76		
2001-02	13	369	45.29	5.48		
2002-03	14	274	33.63	0.27		
2003-04	15	409	50.20	10.45		
2004-05	16	157	19.27	1.82		
2005-06	17	266	32.65	0.12		
2006-07	18	351	43.08	6.90		
2007-08	19	386	47.38	2.75		
2008-09	20	274	33.63	3.85		
<b>Valor medio</b>		<b>300</b>	<b>36.79</b>	<b>3.62</b>	<b>Total</b>	<b>122740000</b>

#### 4.4.2. Análisis y calibración de los resultados obtenidos en la MAS Boquerón

El balance hídrico de la masa de agua expresado en el Plan de Cuenca (CHS, 1997) establece que existe un equilibrio entre las entradas y salidas. En el estudio de cuantificación del volumen anual de sobreexplotación realizado por el Organismo de Cuenca (CHS, 2006) se hace una actualización del balance hídrico. A partir de los datos obtenidos en este último estudio y considerando los diferentes términos de la ecuación para la Masa de Agua Subterránea de Boquerón, la variación de almacenamiento calculada para la totalidad de la masa ha sido -13,19 hm<sup>3</sup> (año 2006). Los datos más significativos en los que se apoya esta cuantificación han sido:

- la explotación anual por bombeo es de 28,46 hm<sup>3</sup> frente a una recarga anual por infiltración de agua de lluvia de 4,4 hm<sup>3</sup> y por retornos de riego de 2,8 hm<sup>3</sup>.
- los valores establecidos en el Plan de Cuenca (CHS, 1997) referidos a las entradas y salidas laterales, 10,27 hm<sup>3</sup>/año y 2,2 hm<sup>3</sup>/año respectivamente.

La evolución piezométrica analizada en el estudio refleja que la situación de desequilibrio comienza en la década de los años 80, y que posteriormente el uso intensivo de las aguas subterráneas ha creado un escenario de sobreexplotación caracterizado por descensos piezométricos continuos que han debido modificar el esquema de funcionamiento de la masa de agua.

Como ya se ha comentado, el objetivo de evaluar la recarga en la MAS Boquerón es analizar la coherencia de su valor, independientemente de su aplicabilidad a la mejora del conocimiento del balance hídrico, con la nueva distribución geométrica propuesta, así como con la evolución de su estado cuantitativo. El nuevo escenario

hidrogeológico implica algunas diferencias respecto del esquema de funcionamiento conocido y, por tanto, también respecto de las posibles relaciones internas entre los diferentes sectores acuíferos y de la propia masa de agua con otros acuíferos o masas de agua adyacentes.

El área permeable en la MAS Boquerón es extensa (122 km<sup>2</sup>) y los resultados que se aportan indican que la recarga presenta una importante variabilidad temporal (ver tabla 4.2 y figura 4.16). Estas características sugieren cuantificar el valor de la recarga como valor medio interanual. El porcentaje de recarga sobre la precipitación está cercano al 10,66% y la estimación realizada indica que la recarga media es 3,62 hm<sup>3</sup>/año. Si se asumen los valores aportados en el informe de CHS (2006) referidos a las entradas por retornos de riego, cuantificadas sobre la base de una superficie de regadío superior a las 5000 ha, las entradas y salidas laterales, y, sobre todo por su impacto en el balance hídrico, la explotación de agua subterránea, el resultado de la ecuación del balance hídrico confirma la variación de almacenamiento negativa cercana a los 14 hm<sup>3</sup>/año que podría estar experimentando la masa de agua en estos últimos años, si los términos del balance se mantienen más o menos estables. Hay que anotar el enorme peso que tiene en el resultado final el volumen de explotación y las posibles entradas laterales desde otros sistemas acuíferos.

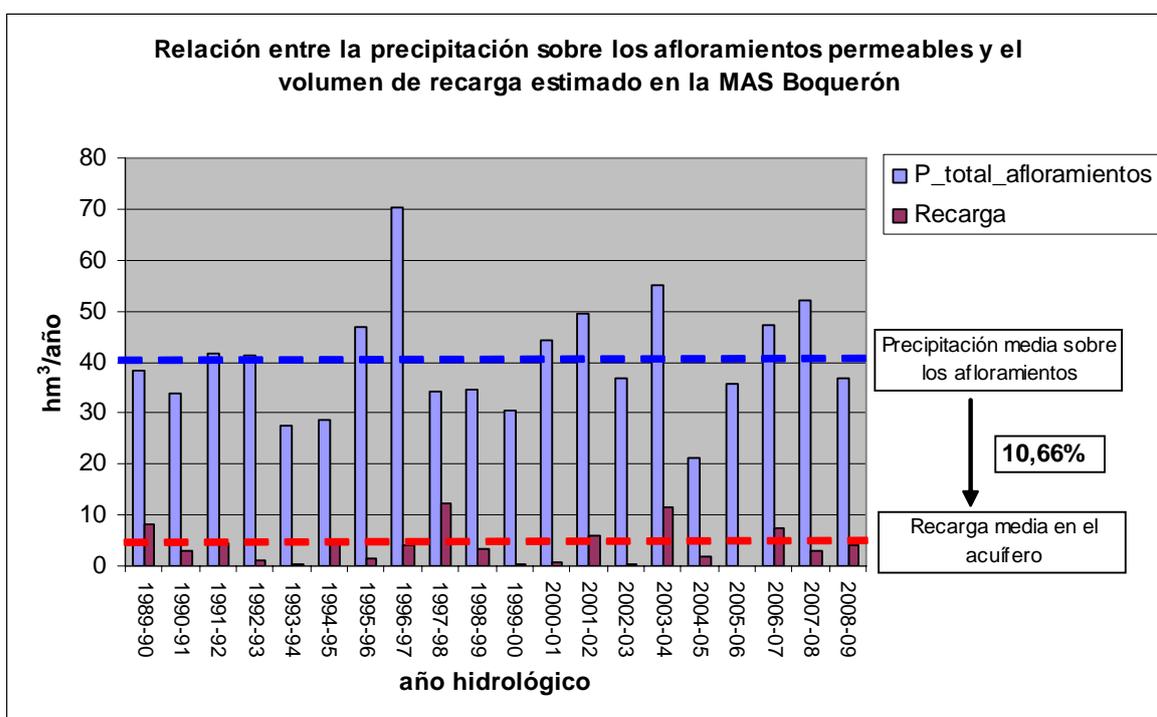


Figura 4.16. Distribución temporal de la precipitación y la recarga en la MAS Boquerón a partir de los datos extrapolados de la MAS Alcadozo.

Estos resultados deberían ser coherentes con las variaciones temporales de la piezometría o la evolución de las descargas por manantiales. Esta comparación permite hacer una relativa calibración, si bien los parámetros a calibrar no deberían estar sometidos a ninguna perturbación, es decir, el mejor escenario hidrogeológico posible debe reflejar el estado natural del acuífero, situación que no se observa en la MAS Boquerón desde el inicio de la década de los años 80.

El gráfico representado en la figura 4.17 muestra unos descensos totales en los puntos de control que oscilan entre los 16 m y 58 m para un periodo aproximado de 30 años

(1980-2010). Los descensos mayores se localizan en la parte norte del acuífero Umbría y Búhos, áreas donde los puntos de explotación están distribuidos espacialmente y la extracción de agua subterránea es importante. En cambio, los descensos menores se observan en el sector acuífero Boquerón, donde la explotación está más concentrada en torno al borde suroriental de la masa de agua (ver figura 4.19). La evolución piezométrica indica un evidente vaciado del volumen almacenado en el acuífero. En la figura 4.18 se observa la evolución de las principales descargas naturales. Las oscilaciones puntuales e intensas y los descensos de caudal no recuperado se han debido a dos situaciones derivadas del uso intensivo de las agua subterráneas: por un lado, la regulación relativamente planificada de algunos manantiales mediante sondeos ubicados en sus inmediaciones, ya que la demanda de agua para regadío estaba por encima de los volúmenes aportados por los manantiales, y por otro, el lógico efecto de agotamiento de los caudales debido a la sobreexplotación del acuífero. Los efectos negativos sobre el funcionamiento del acuífero comienzan al principio de los años 80, tal y como refleja el gráfico de la figura 4.17 donde se muestra la relación de la evolución piezométrica y su intersección con las cotas de salida de los manantiales.

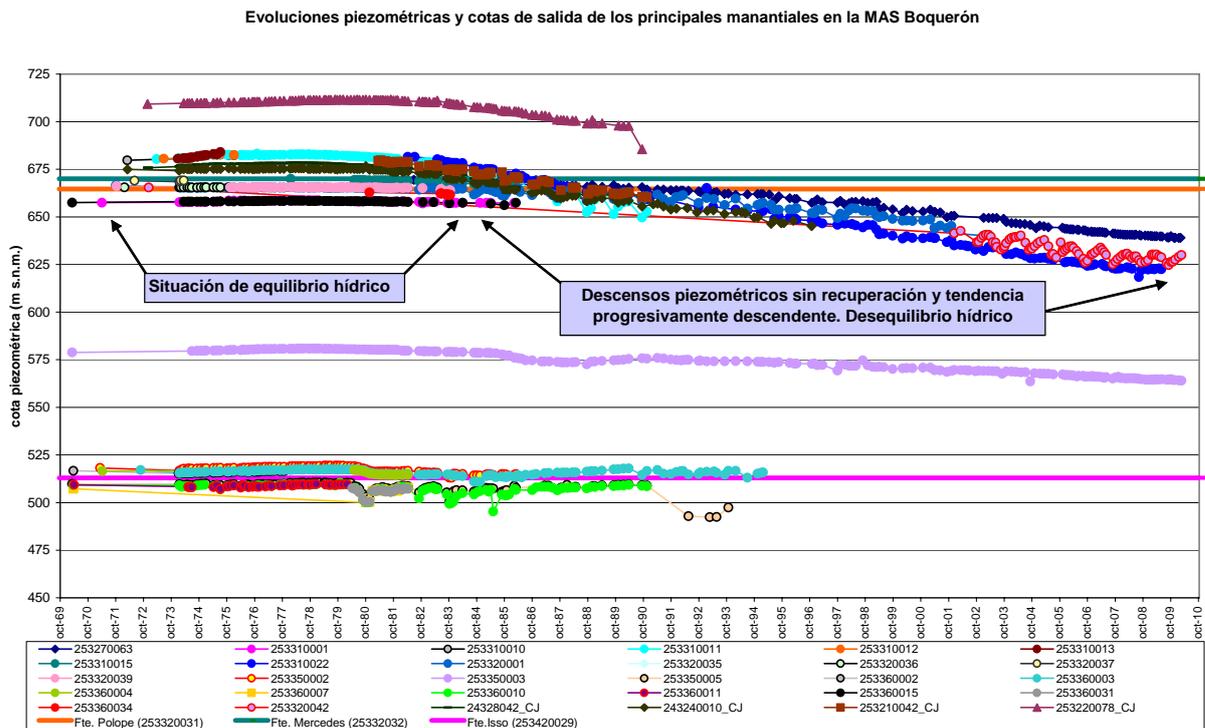


Figura 4.17. Evolución histórica de los niveles piezométricos y su relación con las cotas de salida de los principales manantiales en la MAS Boquerón.

Evolución histórica de las descargas naturales a través de manantiales en la MAS Boquerón

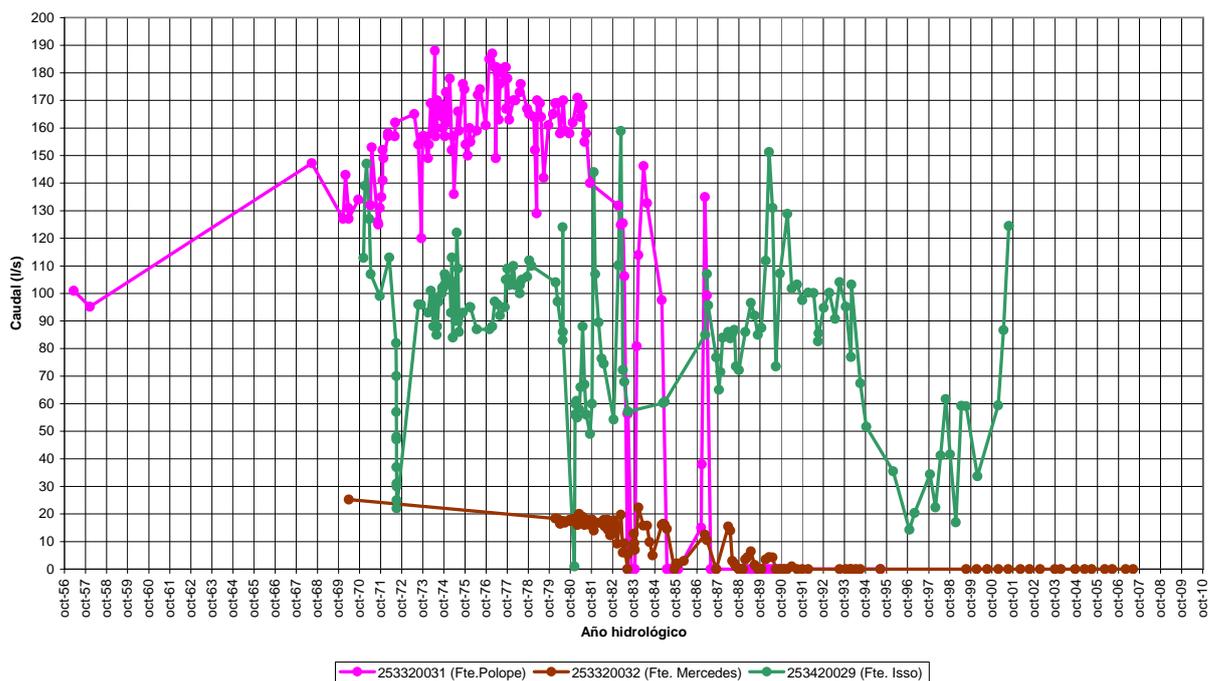


Figura 4.18. Evolución histórica de las descargas por manantial en la MAS Boquerón

En la tabla 4.2 se puede observar la importante variabilidad interanual que presentan los valores de recarga, ya que la estimación realizada indica que hay años donde la recarga ha sido prácticamente nula, debido fundamentalmente a que las precipitaciones han sido inferiores al valor medio de los 20 años hidrológicos considerados, y otros años en los que el valor de la recarga ha sido considerablemente mayor. Por otro lado, los datos de explotación histórica son muy escasos, tan solo hay dos valores de referencia, concretamente para el año 1988-89 la explotación estaba cercana a los 9,82 hm<sup>3</sup> (IGME, 1988), cifra que desde entonces ha ido creciendo paulatinamente hasta alcanzar en el año 2006 los 28,46 hm<sup>3</sup> (CHS, 2006). En cualquier caso, aunque se consideren los años hidrológicos en los que la aportación de recursos a la masa de agua ha sido más alto, la recarga siempre ha estado notablemente descompensada respecto de los volúmenes de agua extraídos. Los dos elementos de calibración a la hora de detectar el impacto de la sobreexplotación han sido el descenso de niveles piezométricos y el comportamiento hidrodinámico de los manantiales. En ambos casos, su evolución responde lógicamente a un escenario temporal (1989-2009) de agotamiento de reservas.

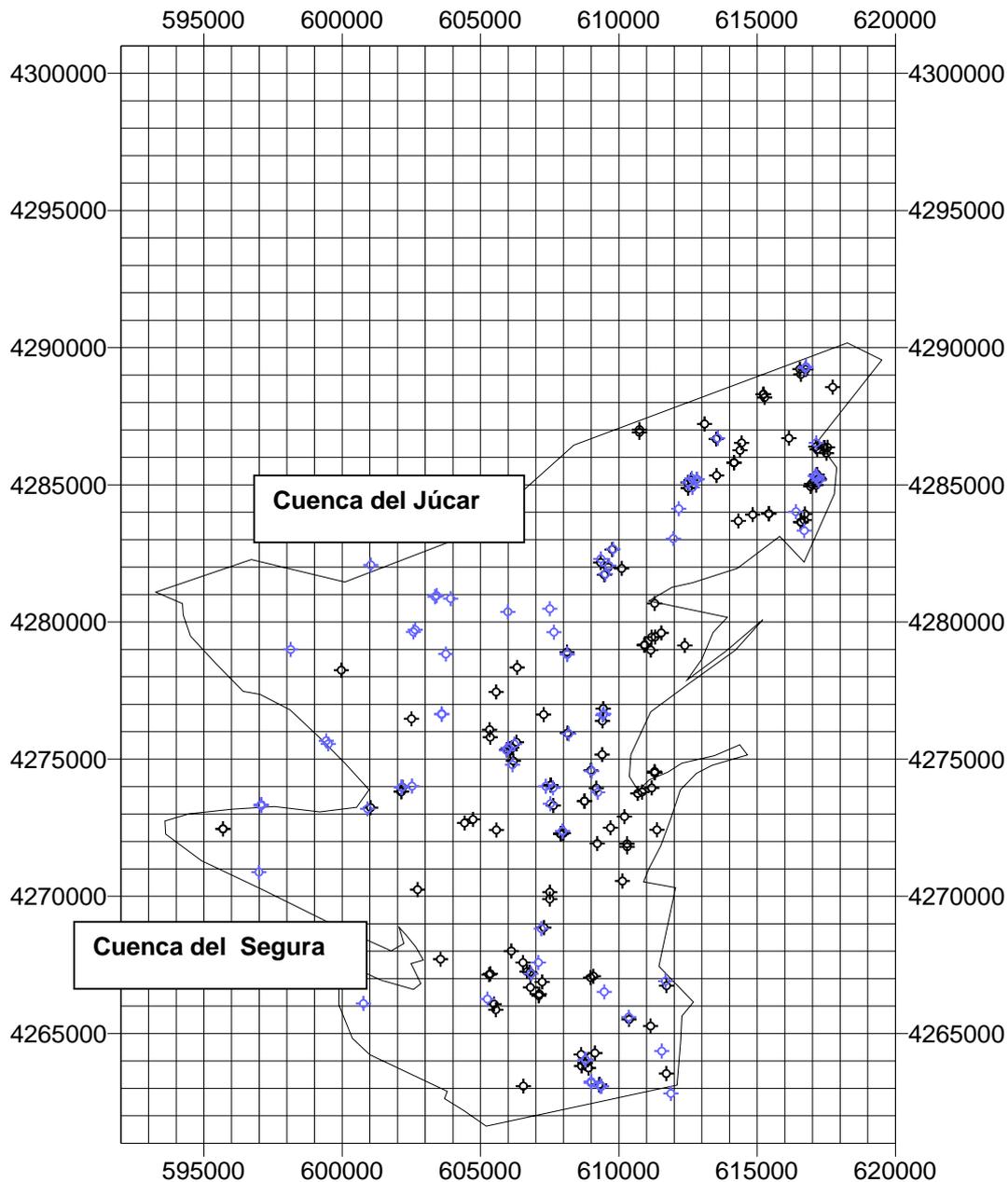


Figura 4.19. Distribución espacial histórica de puntos de agua en la MAS Boquerón (en negro: puntos procedentes de la base de datos IGME; en azul: puntos procedentes del informe de sobreexplotación de la CHS en 2006).

Por tanto, aunque ya se ha comentado el factor de incertidumbre que acompaña a este tipo de estimaciones, se considera válido que un 10,66% del agua de precipitación sea transferida desde los materiales permeables hacia el acuífero. Este valor expresado en términos de volumen medio de agua de recarga puede ser coherente con la superficie permeable existente. Además la relación entre la explotación de agua subterránea y la disponibilidad de recursos justifica la situación hidrogeológica de sobreexplotación en la masa de agua, independientemente de la evidente imprecisión que existe en algunos términos del balance.

#### 4.4.3. Estimación de la superficie permeable en régimen natural

Con el objetivo de comprobar la coherencia hidrogeológica de la superficie permeable de la masa de agua y los volúmenes de descarga de las salidas naturales, se ha estimado conveniente realizar un análisis comparativo en régimen natural entre los caudales descargados desde los principales manantiales y la superficie permeable existente. Para realizar este análisis se ha escogido un escenario temporal anterior al comienzo de la explotación (ver figura 4.17), concretamente el periodo comprendido entre los años hidrológicos 1975-1979. Los datos de caudal utilizados en el desarrollo de este análisis proceden del control hidrométrico realizado por el IGME en los manantiales de Polope (253320031), Las Mercedes (253320032) e Isso (253420029).

El conocimiento geológico e hidrogeológico del conjunto de la masa de agua subterránea Boquerón indica que el análisis comparativo se debe hacer de manera independiente para los acuíferos Umbría-Búhos y Boquerón, es decir, considerar, en primer lugar, la coherencia de la superficie permeable total existente en los acuíferos de Umbría y Boquerón con respecto a la descarga natural de la fuente de Isso (253420029) y, en segundo lugar, realizar la comparación de los volúmenes de descarga en régimen natural de las fuentes de Polope (253320031) y Las Mercedes (253320032) con respecto a la superficie permeable correspondiente al acuífero de Búhos.

En las siguientes tablas se exponen los resultados más significativos para el periodo 1975-1979 de las descargas anuales por manantial ( $\text{hm}^3$ ), precipitación total anual registrada en la estación de Ontúr (mm), así como la precipitación media total depositada sobre los afloramientos permeables. Éste último valor se ha obtenido a partir del estudio geológico y de la delimitación de las superficies permeables existentes en cada uno de los acuíferos (ver figura 4.16).

Tabla 4.3. Relación de valores medios de descarga por acuífero en la MAS Boquerón en régimen natural.

Acuífero	IPA	Nombre	Año hidrológico	Q medio (l/s)	Descarga anual ( $\text{hm}^3$ )	Descarga media interanual en $\text{hm}^3$
Buhos	253320031	Polope	1975-76	162	5.04	5.17104
			1976-77	175	5.44	
			1977-78	171	5.32	
			1978-79	157	4.88	
	253320032	Mercedes	1975-76	22	0.68	0.684288
			1976-77	22	0.68	
			1977-78	22	0.68	
			1978-79	22	0.68	
Boquerón	253420029	Isso	1975-76	93	2.89	3.125952
			1976-77	94	2.92	
			1977-78	105	3.27	
			1978-79	110	3.42	

Tabla 4.4. Relación de precipitación anual, superficies permeables y lluvia media total sobre los afloramientos permeables de los acuíferos Umbría, Búhos y Boquerón (MAS Boquerón) en el periodo 1975-1979.

Año hidrológico	Precipitación estación Ontur (mm)	Sup. Permeable (m <sup>2</sup> )			Precipitación media total sobre afloramientos (hm <sup>3</sup> /año)		
		Umbría	Boquerón	Buhos	Umbría	Boquerón	Buhos
1975-76	467	47400000	30430000	44910000	17.51	11.24	16.59
1976-77	409						
1977-78	355						
1978-79	247						

En condiciones de régimen no influenciado, las descargas de agua subterránea cercanas a los 3,1 hm<sup>3</sup>/año que se han producido a través de la fuente de Isso (253420029) indican que el porcentaje de recarga respecto de la precipitación caída sobre la superficie permeable ha sido de un 10,87%. Este porcentaje de recarga está en el mismo orden de magnitud (10,66%) al considerado como válido para el conjunto de la MAS Boquerón y la masa de agua subterránea adyacente de Alcadozo. Por tanto, la superficie permeable de Umbría-Boquerón es coherente con los recursos generados en ambos acuíferos y descargados en régimen natural a través de la fuente de Isso (tabla 4.4).

En cambio, con el porcentaje de recarga/precipitación del 10,66%, la superficie permeable correspondiente al acuífero Búhos tan solo podría justificar unos recursos medios cercanos a 1,76 hm<sup>3</sup>/año. Los valores de volumen medio de descarga anual en el acuífero Búhos a través de las fuentes de Polope (253320031) y Mercedes (253320032) son 5,85 hm<sup>3</sup> (tabla 4.3). Esta cifra indica que sería necesaria una superficie permeable cercana a los 149 km<sup>2</sup> para justificar ese volumen de descarga. Esta importante conclusión indica que los recursos correspondientes a una parte de la MAS Boquerón, concretamente los recursos que han estado disponibles en régimen natural a través de las salidas naturales en el acuífero Búhos, debían proceder en gran parte de la recarga efectuada sobre determinados afloramientos permeables localizados al norte del acuífero, es decir, se considera factible que en régimen natural haya existido una transferencia de agua desde el acuífero de la Mancha Oriental (antes denominada UH 08.29 Mancha Oriental) hasta el acuífero Búhos (MAS Boquerón). En términos porcentuales, la recarga total media que se ha producido desde zonas hidrogeológicas externas al acuífero Búhos ha podido alcanzar el 70%. Esta cifra indica que el volumen medio transferido de agua subterránea en régimen natural estaba cercano a los 4 hm<sup>3</sup>/año.

Esta posible continuidad hidrogeológica, caracterizada por un esquema de flujo subterráneo norte-sur y determinada por la disposición y geometría de la estructura hidrogeológica, ya había sido recogida en los primeros estudios realizados por el IGME (ver capítulo de antecedentes). Aunque se adoptó por cuestiones administrativas y de cara a la eficacia en la gestión hídrica como límite hidrogeológico la divisoria de las demarcaciones hidrográficas Júcar-Segura, en algunos estudios previos ya se advierte la posible transferencia de recursos desde el acuífero de la Mancha Oriental, ya que no se justificaban desde un punto de vista hidrogeológico las importantes salidas naturales en el sector meridional de Boquerón. En este aspecto, existe actualmente en la ecuación del balance hídrico una importante confusión relacionada con los términos relativos a las transferencias laterales. Se contemplan los valores establecidos en el Plan Hidrológico de la cuenca del Segura, concretamente entradas de 10,27 hm<sup>3</sup>/año y salidas laterales de 2,2 hm<sup>3</sup>/año. Estos valores actualmente presentan un nulo sentido hidrogeológico, si bien, enmarcado en el

periodo en el que la masa de agua estaba en régimen natural, y enlazando con la hipótesis antes comentada, es factible pensar que las entradas laterales podían ser consideradas como escorrentía subterránea de entrada a la MAS Boquerón desde la Demarcación hidrográfica del Júcar (acuífero de la Mancha Oriental), ya que las descargas naturales existentes no se podían justificar exclusivamente con recursos generados en la propia masa de agua subterránea.

#### 4.4.4. Estimación de la recarga mediante balance de cloruros

Para realizar el análisis y aplicación del CMB se ha contado con valores obtenidos o calculados por Alcalá y Custodio (2004) y Custodio (2009) y datos propios del IGME de deposición de cloruros en agua de lluvia en la MAS de Alcadozo, información esta última que está siendo actualmente analizada e interpretada. Los valores de cloruro en agua de recarga se han obtenido de algunas muestras de agua subterránea localizadas en el área de estudio (MAS Mancha Oriental y MAS Boquerón), recogidas entre los años 1974 y 1979, periodo en el que no se evidenciaba todavía la afección por explotación intensiva en el acuífero. Estas muestras han sido seleccionadas de la base de datos del IGME por su baja salinidad y por estar espacialmente relacionadas con líneas de flujo cortas (aguas más superficiales), lo que disminuye la posibilidad de aportes de Cl desde los materiales por los que circula (tabla 4.5).

Tabla 4.5. Datos de contenido en Cl en determinados puntos situados en el área de estudio

IPA	X UTM	Y UTM	Z	Año hidrológico	Cl(mg/l)
253210024	601950	4295350	800	1974-75	25
253220077	610721	4294818	811.07	1977-78	39
253310004	602922	4278720	765.48	1971-72	28
253320035	608759	4273470	696.86	1973-74	35
243340046	598104	4279985	810.00	1978-79	25

Por tanto, utilizar el Cl para calcular el balance de masas entre el agua de lluvia y el agua subterránea, con ausencia de acumulación de Cl en el suelo y plantas, implica que el valor de la recarga media interanual queda determinada por la expresión (Allison et al. 1985):

$$R \cong P \cdot Cl_P / Cl_R$$

en la que R es la infiltración media (mm/año), P es la precipitación media anual (mm/año),  $Cl_P$  es el contenido medio en cloruros en el agua de lluvia (en mg/l) y  $Cl_R$  es el contenido en cloruros en el agua de recarga. El cociente entre  $Cl_P$  y  $Cl_R$  determina la tasa de infiltración que suele ser expresada como porcentaje.

Para el periodo en el que se han seleccionado las muestras de agua, la precipitación media registrada ha sido de 385 mm/año. La deposición atmosférica media se mueve entre valores de 0,3-0,5 g/m<sup>2</sup>/año, según reflejan los últimos resultados obtenidos por el IGME (en fase de análisis) y los que se exponen en los estudios e investigaciones anteriormente citadas. Como se observa en la tabla 4.5, el valor medio de cloruros que presentaba el agua subterránea era de 30 mg/l con un coeficiente de variación próximo a 0,20. Con estos datos y con la salvedad de que existe cierta heterogeneidad temporal en los mismos, el valor de recarga media calculado estaría cercano a los 20,5 mm/año, es decir, el porcentaje de recarga respecto de la precipitación se

aproxima a un 5,6%. Este valor es bastante similar a los calculados por Alcalá (2006) y Custodio (2009) en las inmediaciones del área de estudio.

Este resultado al igual que el obtenido con Visual Balan indica que, en régimen natural, la MAS Boquerón se recargaría, en gran parte, a través de afloramientos permeables externos a los considerados actualmente, es decir, se ratifica la posibilidad de que se produjese una importante transferencia de agua subterránea, desde el acuífero de la Mancha Oriental (cuenca del Júcar), circunstancia que podría justificar las descargas naturales de su borde norte.

El porcentaje de recarga obtenido es menor que el calculado con Visual Balan. Es importante señalar que el método de balance de cloruros presenta una mayor incertidumbre relacionada principalmente con los contenidos en cloruro considerados tanto en el agua de lluvia como en las muestras de los sondeos seleccionados.

## 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

- 1) La MASUB Boquerón está definida en la DHS y aparece formada por tres acuíferos: Boquerón, Umbría y Búhos. La formación permeable principal está constituida por la formación dolomítica del Dogger, coronada por un tramo calizo poco potente del Oxfordiense, que dan al conjunto una potencia de unos 300 m. A muro del Dogger se encuentra una formación margosa poco permeable del Lías y que se utiliza ampliamente en la definición de los límites hidrogeológicos. Por debajo, hay una formación dolomítica del Lías que apenas aflora y de la que se conoce poco de su comportamiento hidrogeológico, así como de la salinidad de su agua, que puede ser localmente peor que la del Dogger. El impermeable de base general es la formación arcillosa del Trías, que localmente también actúa como límite lateral. Otras formaciones permeables a techo del Dogger tienen muy poco interés y tienen una piezometría descolgada del acuífero principal.
- 2) Los límites de los acuíferos de la MASUB son en parte de difícil definición. El límite meridional de Boquerón aparece claramente definido por los afloramientos de Trías al SO de Hellín. Desde esta zona, tanto los límites laterales de la MASUB (límite occidental de los acuíferos Boquerón, como el oriental del acuífero Búhos) deben ser definidos por levantamientos del impermeable de base, en anticlinales o cabalgamientos, en los que aflora de un modo parcial. Este tipo de estructura determina el límite entre los acuíferos Umbría y Boquerón.  
Aparte del límite meridional ya descrito, el resto de límites este-oeste resultan más difíciles de determinar.  
El límite entre Umbría y Boquerón no resulta de definición clara, y puede proponerse su eliminación, dejando los actuales dos acuíferos, Boquerón y Umbría, como uno solo Boquerón-Umbría.  
El límite entre Umbría y Búhos se traza por levantamiento de la formación margosa del Lías por la acción de cabalgamientos sucesivos que existen en esta zona.  
El límite septentrional de la MASUB (acuíferos Umbría y Búhos), son los más difíciles de establecer, pues se deduce que se trata de divisorias piezométricas condicionadas por zonas de baja transmisividad y la distribución de los bombeos. El límite septentrional del acuífero Umbría parece que ha variado poco con respecto a la situación en régimen natural, pero no así el límite septentrional del acuífero Búhos, que como consecuencia de los bombeos en el acuífero Mancha Oriental, ha visto mermados los flujos subterráneos que se dirigían hacia las fuentes de Polope y Mercedes.
- 3) La zona estudiada está sometida a un proceso de sobreexplotación, que viene ocasionando un descenso piezométrico muy acusado desde el periodo 1970-1980. Esta situación ha ocasionado que se hayan secado los manantiales del acuífero Búhos (las ya mencionadas fuentes de Polope y Mercedes) y la Fuente de Isso. Esta última, por la configuración geométrica del acuífero y por la mayor o menor intensidad de las explotaciones, surge esporádicamente en épocas de fuertes precipitaciones.
- 4) En la situación actual, el volumen anual de extracciones excede los recursos renovables de los acuíferos de la MASUB Boquerón y del acuífero Mancha Oriental. La variación de las direcciones de flujo subterráneo ha ocasionado a su vez una variación de las transferencias subterráneas que en régimen natural se producían entre la DHJ y la DHS. En base al conocimiento alcanzado en el

presente estudio, el cambio producido es poco importante en el acuífero Umbría, pero resulta muy significativo en el acuífero Búhos en el sentido de que la transferencia subterránea entre las demarcaciones hidrográficas del Júcar y Segura ha disminuido muy significativamente o incluso ha desaparecido.

- 5) Para precisar la posición actual del límite y la evolución de la divisoria piezométrica meridional del acuífero Mancha Oriental con los acuíferos septentrionales de la MASUB Boquerón, es necesario disponer de datos complementarios de geofísica y sondeos, y realizar un estudio de mayor amplitud que contemple la realización de un modelo de flujo que reproduzca la situación en régimen natural y el régimen antropizados actual fruto de la sobreexplotación generalizada que afecta a la zona. En tanto no se disponga de los resultados de este estudio, el límite septentrional del acuífero Búhos debería ser el que se propone en este estudio, y en cualquier caso considerar una transferencia subterránea muy poco significativa entre las demarcaciones hidrográficas del Segura y del Júcar. Para el caso del acuífero Boquerón, también se proponen variaciones respecto al límite oficial actual, si bien no es descartable que sufra alguna modificación con la realización de un estudio de mayor profundidad que disponga de los medios ya referidos.

## 6. **BIBLIOGRAFÍA**

- Alcalá, F.J., Custodio, E. (2003). Recopilación de datos bibliográficos sobre deposición atmosférica de cloruro al terreno. Informe nº 3. Proyecto de investigación HID 1999-0205. Ministerio de Ciencia y Tecnología (CICYT). Centro de Documentación del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. 1-43.
- Alcalá, F.J., Custodio, E. (2004). Deposition total atmosférica de elementos mayoritarios en la ciudad de Barcelona (NE de España). Datos preliminares sobre la aportación mineral por la precipitación atmosférica. En: Simposio sobre el Agua y la Ciudad Sostenible: Hidrogeología Urbana. Barcelona. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Alcalá, F.J., Custodio, E. (2008). Atmospheric chloride deposition in continental Spain. *Hydrological Processes*, 22: 3636–3650.
- Allison G.B., Stone, W.J. y Hughes, M.W. (1985). Recharge in karst and dune elements of a semi-arid landscape as indicated by natural isotopes and chloride. *Journal of Hydrology*, 76:1-26.
- CHS (1997). Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura.
- CHS (2007). Estudio de cuantificación del volumen anual de sobreexplotación de los acuíferos de las unidades hidrogeológicas 07.02 Sinclinal de la Higuera, 07.03 Boquerón, 07.16 Tobarra-Tedera-Pinilla, 07.18 Pino, 07.49 Conejeros-Albatana, 07.55 Corral-Rubio.
- Custodio, E., (1997b). Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos. ITGE (ed.). En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica. AIH-GE, p. 83-109. Las Palmas de Gran Canaria.
- Custodio, E. (1998). Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. *Boletín Geológico y Minero*, 109:329-346.
- Custodio, E., (2009). Recarga a los acuíferos extensos a partir de la deposición atmosférica de cloruros y de la temperatura del terreno. *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4): 631-640.
- DGOH-IGME (1988). Delimitación de las UU HH del territorio peninsular e Islas Baleares, y síntesis de sus características.
- DGOH (1988). Estudio de la explotación de aguas subterráneas en el acuífero de la Mancha Oriental y su influencia sobre los caudales del río Júcar .
- DGOH (1993). Estudio de seguimiento del impacto de las extracciones de aguas subterráneas en los acuíferos de la Mancha Oriental y los caudales del río Júcar.
- E. Font Vicent. Informe de colaboración en el desarrollo de un modelo matemático distribuido de flujo subterráneo de la U.H. 08.29 (Mancha Oriental). Eriksson, E., Khunakasem, V. 1969. Chloride concentrations in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain. *Journal of Hydrology*, 7: 178-197.
- García-Rodrigo, B, F. Pendás (1971). Consideraciones sobre el Jurásico inferior y medio de Albacete. *Cuadernos de Geología Ibérica*, vol. 2, pp 255-272.
- Grannemann, N.G., Hunt, R.J., Nicholas, J.R., Reilly, T.E., and Winter, T.C. (2000). The importance of ground water to the Great Lakes Region: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4008, 12 p.
- IGME (1973). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. (816) Peñas de San Pedro. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria.
- IGME (1975). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. (817) Pozo Cañada. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria.
- IGME (1978). Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Alta del Segura. Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas. Ministerios de Industria y Agricultura.
- IGME (1979). Investigación hidrogeológica de la cuenca alta de los ríos Júcar y Segura.

- IGME (1980). El Sistema Hidrogeológico de Albacete (Mancha Oriental). Sus recursos en aguas subterráneas, utilización actual y posibilidades futuras.
- IGME (1980). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. (843) Hellín. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria.
- IGME (1981). Evolución y estado actual de los acuíferos en las cuencas altas del Júcar y Segura.
- IGME (1985). El Sistema acuífero del Sinclinal de la Higuera (Albacete).
- IGME (1988). Estudio hidrogeológico de los sistemas acuíferos situados al NE de Hellín (Albacete) dentro de la Cuenca del Segura.
- IGME (1999). Convenio para actuaciones de apoyo a la gestión hídrica en la U.H. 08.29 Mancha Oriental.
- IGME-CHS. 2009. Definición de un plan de extracciones de agua subterránea en la cuenca Alta del Segura en épocas de sequía.
- Reilly, Thomas E. (2001). System and Boundary Conceptualization in Ground-Water Flow Simulation. Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey, Book 3, Applications of Hydraulics, Chapter B8.
- Rodríguez Estrella, T (1978). Geología e Hidrogeología del sector Alcaraz-Liétor-Yeste (Albacete). Síntesis geológica de la zona de Albacete. Colección Memorias del IGME, tomo 97. Servicio de Publ. Minist. Industria y Energía, 2 tomos.
- Samper, J., García Vera, M.A. 1999. Manual de usuario del programa Visual Balan Version 1.0. ENRESA. Madrid.
- Senent, M, L. Linares y J. Barba-Romero (1975). El sistema hidrogeológico del Boquerón (Albacete); contribución a su estudio con un bombeo de ensayo de larga duración. Boletín Geológico y Minero. T. LXXXVI-III, pp 277-296.
- UCM-CHJ. Caracterización geológica de la U.H. 08.29 Mancha Oriental.

**ANEXO 1**  
**NIVELACIÓN DE POZOS**

## **METODOLOGÍA EMPLEADA**

Se ha procedido a realizar una nivelación de los puntos de control representativos, de modo que se puedan relacionar los mismos con una cota suficientemente precisa.

La metodología empleada es la propia de los levantamientos topográficos con sistema GPS adaptadas a las particularidades de cada elemento a nivelar.

### **1. SISTEMA DE REFERENCIA**

El levantamiento topográfico GPS se realiza en el sistema de coordenadas UTM en la zona 30 N con Datum WGS84 y Modelo Geoidal IBERGEO95 publicado por el CNIG-IGN.

Posteriormente y con el gestor de información GPS Trimble Geomatics Office se transforman al sistema ETRS89 UTM 30N según método de siete parámetros Molodensky.

Dentro de este sistema se han empleado dos métodos:

#### **A. MÉTODO VRS (L1 fijo)**

Método apoyado en la existencia de redes GPRS/UTMS que transmiten por vía telefónica los parámetros de corrección que posibiliten un trabajo RTK (Real Time Kinematics) o Cinemático en Tiempo Real.

Se puede considerar el método más efectivo y rápido pero depende su aplicación de varias circunstancias:

- que exista cobertura telefónica en el lugar exacto, circunstancia que no siempre se da, especialmente en sondeos alejados de núcleos urbanos, poblacionales o de vías principales de comunicación
- que el sistema de referencia sea plenamente operativo, circunstancia que habitualmente se da.
- que el equipo de campo con su conexión telefónica se encuentre perfectamente configurado y operativo

Este método se ha empleado desde el primer momento como prioritario usando para ello la red de Estaciones Permanentes GNSS del IGN (Instituto Geográfico Nacional), en concreto la Estación situado en la localidad de Albacete con código "ALBA".



**Lectura de Sondeo denominado nº 38**

## **B. MÉTODO CINEMÁTICO CON POST PROCESADO (PPK)**

Este método es aplicado en las nivelaciones a realizar en puntos sin cobertura telefónica o cuando el sistema VRS no se encuentra disponible.

El método PPK requiere de la presencia de un número suficiente de satélites y según ese número requiere de un tiempo necesario para que se produzca la inicialización del levantamiento.

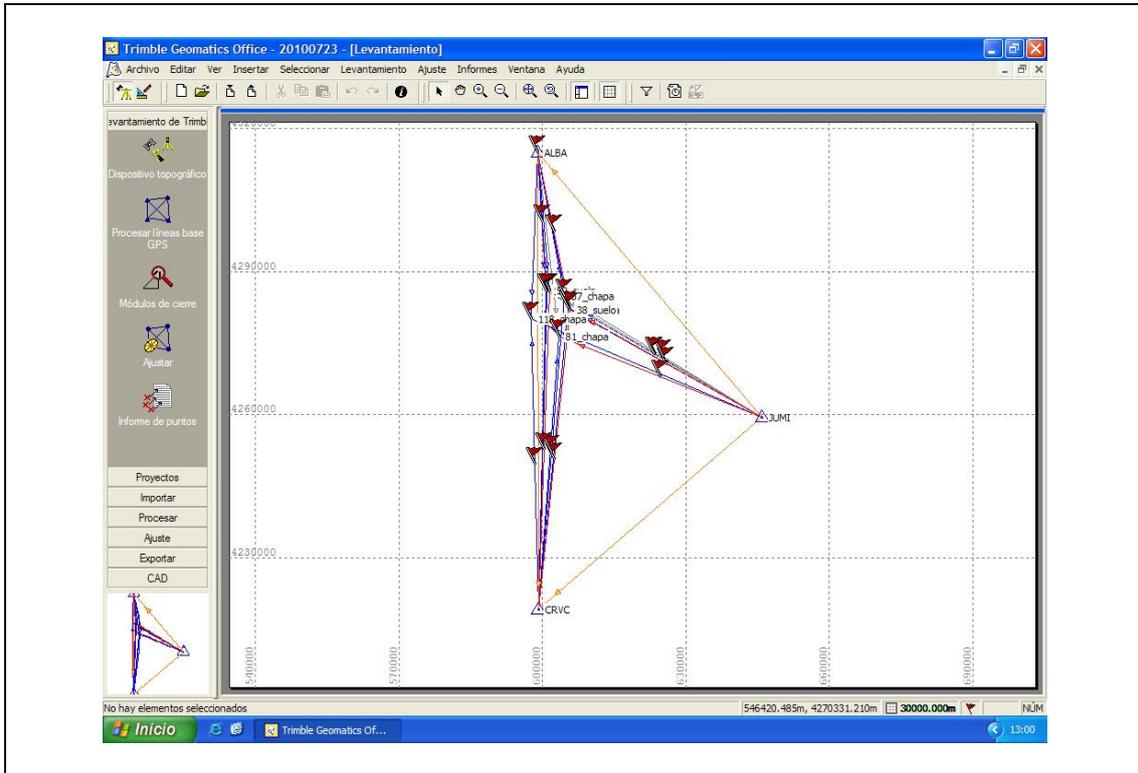
Este tiempo está fijado en 8 minutos con una presencia de 6 SV's circunstancia generalmente habitual salvo en zonas muy concretas con cobertura de árboles, edificaciones próximas al punto objeto de medición u otras circunstancias similares lo cual alarga el tiempo de espera.

Una vez realizada la lectura correspondiente y obtenida la inicialización se genera una serie de ficheros con la denominada información base que permitirá su posterior tratamiento informático o post-proceso.

Una vez en gabinete se descarga esta información usando el software apropiado, Trimble Geomatics Office (TGO), momento en que se obtiene la información sobre periodos de tiempo que requieren la descarga de ficheros de corrección desde estaciones de referencia.

Estos ficheros se descargan del servidor de datos de la red MERISTEMUN (antenas JUMI situada en Jumilla y CRVC situada en Caravaca) y del servidor del IGN para la antena de Albacete llamada ALBA, se descomprimen y se asocian a cada uno de lo ficheros-día generados para su tratamiento.

Este tratamiento se prolonga, en cada uno de los casos, por el tiempo necesario para el análisis de toda la línea-base que relacionan estos puntos de coordenadas conocidas, coordenadas de referencia como puntos fijos, y los puntos a corregir.



Gestión de levantamiento GPS para nivelación de sondeos en el límite de las cuencas hidrográficas del Segura y el Júcar.  
Tratamiento en el entorno Trimble Geomatics Office (TGO)

## 2. RESULTADOS OBTENIDOS

IGME	Número	Coord. x	Coord. y	Elevación	Observaciones
	35	600963.559	4285897.294	856.518	
	37	600755.713	4286054.646	860.208	
	38	605807.484	4281963.178	846.829	
	41	600919.290	4281872.344	790.651	
	52	601425.860	4286056.184	847.004	
	54	605363.891	4282456.004	849.321	
	57	604558.780	4284942.436	895.838	
	77	602438.827	4279397.915	770.848	
	81	603491.093	4276450.056	768.235	
	118	597670.628	4280148.242	806.858	
<b>UTM 30N ETRS89</b>					