

INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN SECTORES DE GRAN PRESIÓN DE LA PROVINCIA DE JAÉN. PAUTAS PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS ABASTECIMIENTOS URBANOS.



**INFORME SOBRE LA VIABILIDAD DE LA RECARGA
ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE BEDMAR-JÓDAR (1ª FASE)**

Noviembre de 2015

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	3
2	EQUIPO DE TRABAJO.....	4
3	VIABILIDAD DE UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL.....	4
4	ACUÍFERO RECEPTOR: BEDMAR-JÓDAR	6
4.1	Localización.....	6
4.2	Geología	7
4.2.1	Litoestratigrafía.....	8
4.2.2	Tectónica	9
4.3	Definición del acuífero. Estructura y geometría	10
4.3.1	Campaña de prospección geofísica.	11
4.4	Inventario de puntos de agua.....	16
4.5	Funcionamiento hidrogeológico. Piezometría.....	17
4.6	Hidroquímica y calidad del agua.	20
4.7	Parámetros hidráulicos.....	21
4.8	Volúmenes utilizables o disponibles en el acuífero (reservas útiles).....	23
4.8.1	Precipitación.....	23
4.8.2	Temperatura.....	30
4.8.3	Evapotranspiración potencial.....	33
4.8.4	Lluvia Útil y Evapotranspiración real.....	34
4.8.5	Cálculo de la recarga natural del acuífero de Bedmar.....	36
4.9	Usos, demandas y consumos de agua.	38
4.10	Balance hídrico	39
5	AGUA DE RECARGA.....	39
6	PROPUESTA DE RECARGA ARTIFICIAL.....	41
6.1	Captación.....	41
6.2	Zonas de recarga	41
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
8	REFERENCIAS	43

INFORME SOBRE LA VIABILIDAD DE LA RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE BEDMAR-JÓDAR

1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El presente informe forma parte de las actividades previstas en el Convenio Específico entre la Excelentísima Diputación Provincial de Jaén y el Instituto Geológico y Minero de España (en adelante IGME) en materia de aguas subterráneas (2012-2015) y cuyo objetivo es la mejora del conocimiento de los acuíferos en algunos núcleos urbanos o sectores de la provincia de Jaén. Se encuadra dentro de la Actividad 1 del mencionado convenio.

La Excm. Diputación Provincial de Jaén y el IGME, cuya actividad realizando investigaciones hidrogeológicas de detalle en la provincia de Jaén se viene llevando a cabo desde el año 1966 (Proyecto del Guadalquivir. FAO-IGME), suscribieron, con fecha 27 de octubre de 1981, un Convenio Marco que regula de forma general la colaboración entre ambas entidades y que prevé en su cláusula segunda la realización de una serie de actuaciones mediante la figura de un convenio de colaboración. Actualmente, y dentro del Convenio Específico (Excm. Diputación Provincial de Jaén- IGME) en materia de aguas subterráneas (años 2012-2015), se pretende ampliar el conocimiento de diferentes sectores de masas de agua subterránea (MASb) donde la presión humana por bombeos o la presencia de focos potenciales de contaminación puede poner en peligro el suministro de agua potable a las municipios afectados, así como recomendar pautas para la sostenibilidad de sus recursos.

Una definición de sostenibilidad puede ser la de atender a las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas, garantizando el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y bienestar social. En este sentido, la explotación sostenible de las aguas subterráneas deberá ir encaminada a un conocimiento de los recursos y reservas existentes en los acuíferos junto con la dinámica y funcionamiento de los mismos.

En el presente estudio se ha llevado a cabo una revisión del estado actual del acuífero de Bedmar-Jódar encaminada a determinar la viabilidad de realizar operaciones de recarga artificial para mejorar la disponibilidad de recursos hídricos provenientes de ese acuífero.

En la redacción de este documento se ha partido de los numerosos estudios hidrogeológicos que se han llevado a efecto en este acuífero, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Estudio de los recursos hidráulicos para la recarga artificial del acuífero de Bedmar-Jódar. Jaén. Elaborado por el Servicio Geológico de Obras Públicas (Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo) en 1991. Además del acuífero en estudio, incluía los próximos de Almadén-Carluco y Sierra Mágina.
- Informe del mismo Servicio Geológico de Obras Públicas titulado "Sondeos de investigación hidrogeológica para el estudio de las zonas de recarga artificial del acuífero de Bedmar-Jódar (Jaén) en el que se describen los sondeos de investigación realizados por ese organismo en el dicho acuífero.

- Atlas hidrogeológico de la provincia de Jaén. Diputación Provincial de Jaén-IGME de 2012. Documento considerado de referencia para los trabajos de hidrogeología en la provincia.
- Proyecto actualmente en elaboración de título genérico "*Investigaciones hidrogeológicas sobre Masas de Agua Subterránea con problemas de explotación en la cuenca del Guadalquivir. Propuesta de uso sostenible (Alto Guadalquivir). Convenio IGME-CHG*". Puesto que en ese proyecto se está trabajando también en el acuífero de Bedmar-Jódar desde la Unidad del IGME en Granada, se han complementado los trabajos por lo que en el presente informe se describen con más detalle los trabajos llevados a cabo correspondientes al proyecto que nos ocupa y se resumen los correspondiente al proyecto del Convenio IGME-CHG que aportan información valiosa. Estos han sido, principalmente, los correspondientes a la prospección geofísica y de revisión geológica e hidrogeológica así como la definición e instalación de sensores de piezometría automática y definición del balance hídrico y sus factores.

2 EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo que ha llevado a cabo este estudio ha sido el formado por Crisanto Martín Montañés (Jefe de Proyectos Técnicos y Responsable del Proyecto), Sergio Martos Rosillo (Científico Titular del IGME), Concepción Fernández Leyva (Técnica Superior Especializada de O.P.I.), Ana Ruiz Constán (Investigadora Contratada "Juan de la Cierva") por parte del IGME. Además se ha contado con la inestimable colaboración de Elena Mancera Molero con su Trabajo Fin de Máster y el catedrático de la UGR Jesús Galindo Zaldívar.

3 VIABILIDAD DE UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL

Un proyecto de recarga artificial debe considerarse como una alternativa para atender la demanda de agua. A este respecto deben contemplarse, antes de considerar cualquier hipótesis de recarga artificial, los siguientes aspectos:

- Análisis de demandas y usos actuales y futuros.
- Análisis de los elementos de regulación actual y futura, tanto de índole superficial como subterránea.
- Evaluación de las hipótesis de gestión enfocadas al aumento de la regulación, al incremento de la garantía, o a ambas conjuntamente.

Es preciso evaluar la viabilidad de la operación de recarga artificial mediante el análisis y estudio de los factores que se relacionan a continuación:

- Características del acuífero receptor.
- Agua de recarga en origen.
- Análisis de las diferentes alternativas de instalaciones de recarga, así como de las auxiliares de control, tratamiento y transporte del agua de recarga.
- Destino final del agua recargada.

➤ Evaluación económica y aspectos legislativos y de gestión.

La recarga artificial se puede practicar, en principio, en cualquier tipo de formación permeable que tenga condiciones para almacenar y transmitir agua. Sin embargo, hay dos factores limitantes: el agua recargada tiene que permanecer en el acuífero el tiempo suficiente para permitir su utilización posterior. Asimismo, su calidad final debe ser la adecuada a los usos a los que se destine.

Es preciso disponer de información detallada de aspectos tales como:

- ✓ Geología (litoestratigrafía, geometría del acuífero, etc.)
- ✓ Piezometría.
- ✓ Hidroquímica y calidad del agua.
- ✓ Parámetros hidráulicos (transmisividad, permeabilidad, porosidad eficaz, coeficiente de almacenamiento, capacidad de infiltración).
- ✓ Velocidad del agua subterránea y direcciones preferenciales de flujo.
- ✓ Volúmenes utilizables o disponibles en el acuífero (reservas útiles).
- ✓ Zonas de drenaje o descarga natural.
- ✓ Relación río-acuífero.
- ✓ Usos, demandas y consumos de agua.
- ✓ Balance hídrico.

En el estudio del agua de recarga en origen se deben contemplar tanto aspectos cuantitativos como cualitativos. Los resultados del estudio deben incorporar no sólo la perspectiva espacial, sino también la distribución temporal. Así, en la evaluación de aportaciones y determinación de excedentes hídricos, un condicionante necesario es disponer de agua excedentaria.

El agua que se emplea en la recarga artificial proviene principalmente de diferentes fuentes:

- Superficial continua o discontinua
- Residual doméstica
- Procedente de otro acuífero

Un aspecto a tener en cuenta es que no toda la aportación excedentaria de una cuenca es susceptible de aprovechamiento mediante la técnica de recarga artificial de acuíferos, ya que su distribución espacial y temporal no es uniforme.

El estudio de las aportaciones y potenciales volúmenes de agua a infiltrar se puede estructurar según la secuencia siguiente:

1. Análisis climático
2. Análisis de la distribución espacial de las aportaciones

3. Análisis de usos y demandas
4. Cálculo de excedentes o aportaciones no reguladas
5. Generación de series de volúmenes a infiltrar
6. Análisis de sensibilidad

En cuanto al análisis de las características de calidad y variabilidad temporal, los principales controles periódicos que se han de efectuar sobre la calidad del agua de recarga se centran en los siguientes aspectos:

- o Compuestos de nitrógeno y fósforo.
- o Compuestos orgánicos.
- o Metales pesados.
- o Bacteriología y virología.
- o Elementos radiactivos.

4 ACUÍFERO RECEPTOR: BEDMAR-JÓDAR

4.1 Localización

El acuífero de Bedmar-Jódar está catalogado como Masa de Agua Subterránea 05.14 a efectos de gestión de cuenca. Se sitúa en la comarca de Jódar, al sur de la provincia de Jaén, unos 35 km al este de la capital (Figura 1).

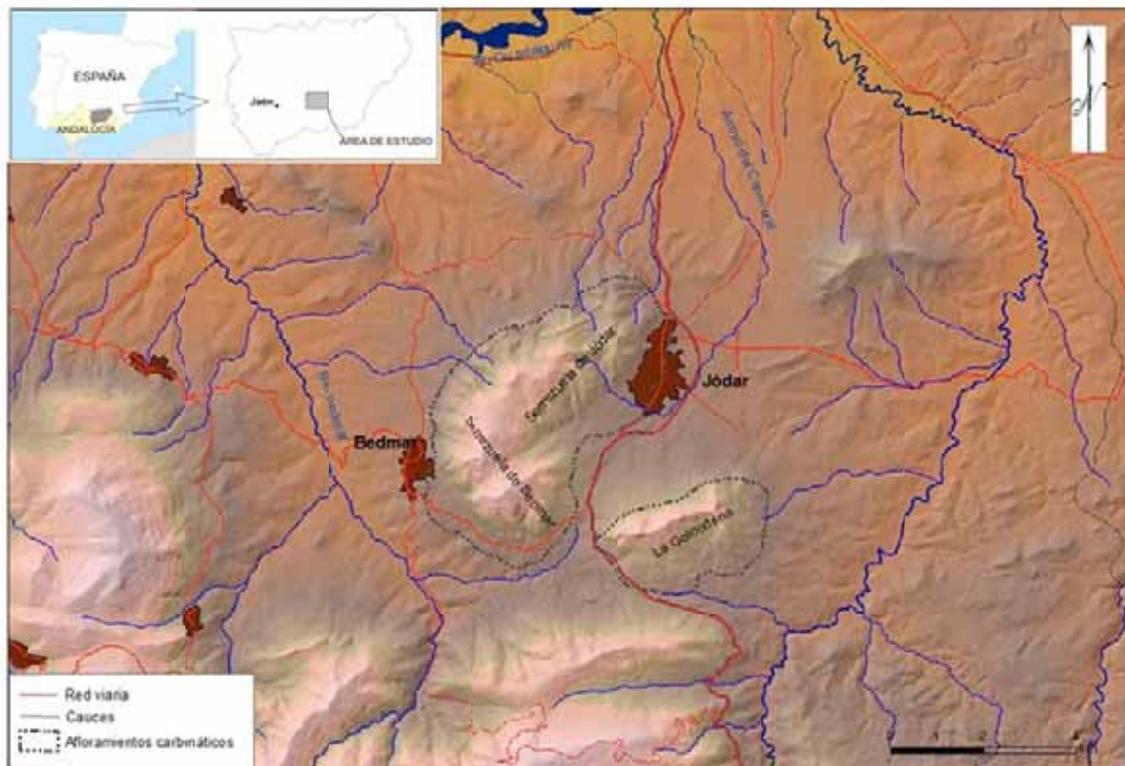


Figura 1: Localización geográfica del acuífero Bedmar-Jódar-La Golondrina

El acuífero se ubica en la margen derecha del río Bedmar, entre las localidades Bedmar y Jódar, en la Cuenca Alta del Guadalquivir (CHG-IGME, 2001). La población de estos municipios, según la Revisión del Padrón municipal de Bedmar y Garcéz, es de 3.051 habitantes (INE, 2012) y de 12.117 (INE, 2012) en Jódar, por lo que la población total es de 15.168 habitantes.

Las hojas del Mapa Topográfico Nacional (1:50.000) en las que se encuentra son la 927 (20-37) de Baeza y la 948 (20-38) de Torres.

Está constituido por dos relieves positivos conocidos como las Serrezuelas de Bedmar y Jódar, de mayor extensión, y a La Golondrina.

4.2 Geología

El Prebético de Jaén comprende varios afloramientos aislados, que limitan la Depresión del Guadalquivir por el sur, en la provincia de Jaén. Están compuestos por calizas y dolomías del Cretácico y separados por importantes accidentes tectónicos situados cerca del frente de contacto de los materiales subbéticos con los materiales de relleno de la Depresión del Guadalquivir. El afloramiento más occidental es el correspondiente al acuífero de Bedmar-Jódar, constituido a su vez por afloramientos calcáreos del Cretácico y Mioceno que dan lugar a las Serrezuelas de Bedmar y Jódar, el de mayor extensión y a La Golondrina, al sureste del anterior (Figura 2).

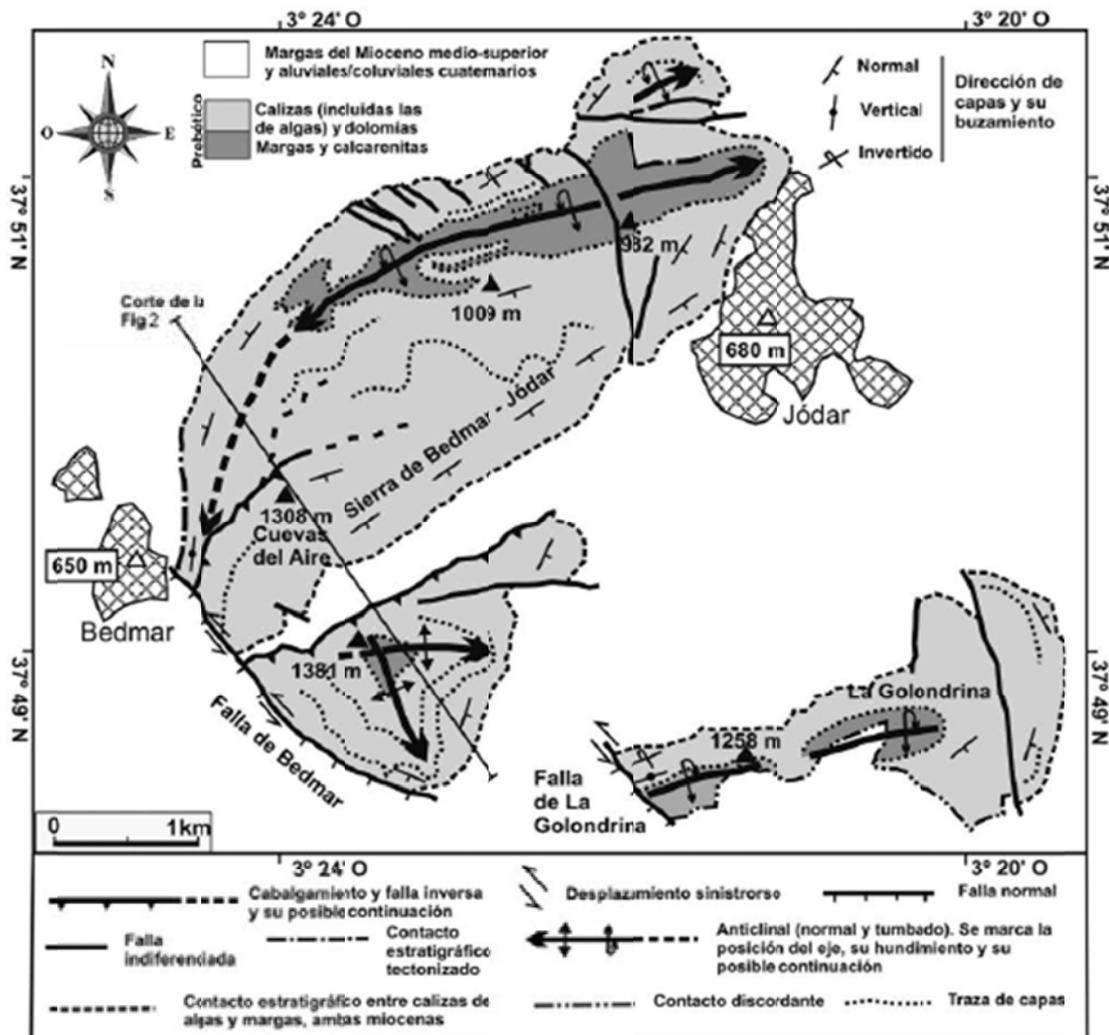


Figura 2: Mapa geológico simplificado de la Sierra de Bedmar-Jódar y de La Golondrina. Se marca la posición del corte de la Figura 3 (modificado de Sanz de Galdeano et al., 2013).

4.2.1 Litoestratigrafía

La serie de sedimentos cretácicos se inicia con unos paquetes de margas, calcarenitas y calizas del Valanginiense–Barremiense (Cretácico inferior), que afloran exclusivamente en el núcleo del anticlinal de la Serrezuela. La siguiente secuencia está representada por calizas y calcarenitas, parcial o totalmente dolomitizadas y margas del Aptiense-Albiense, y finaliza en un conjunto dolomítico del Cenomaniense (Cretácico superior) (Álvaro et al., 1992; Sanz de Galdeano et al., 2013). Sobre estos materiales se depositaron calizas blancas con algas de espesor superior a 30 m en algunos puntos (Roldán García et al., 1992), cuyos afloramientos aparecen localmente en la Serrezuela, superpuestas por margas del Mioceno medio y superior, de varios cientos de metros de potencia. Sobre las margas se sitúan conglomerados y limos del final del Mioceno y del Plioceno. Finalmente, las laderas aparecen parcialmente recubiertas por depósitos cuaternarios de piedemonte. Todo el conjunto de materiales permeables, fundamentalmente carbonático, tiene un espesor del orden de 600-700 m (González-Hernando y González-Ramón, 2002; Sanz de Galdeano et al., 2013).

4.2.2 Tectónica

La estructura del afloramiento de la Serrezuela está constituida por un gran pliegue anticlinal vergente al N y al NNO (Figura 3 y 4.A), con su flanco noroccidental en el que los estratos aparecen verticalizados e incluso invertidos (Figura 4.C). La traza axial del pliegue puede seguirse cartográficamente a lo largo de 6,5 km. El borde suroccidental está limitado por una falla normal verticalizada de varios cientos de metros de salto que corta la continuidad del pliegue (Figura 4.B). El afloramiento en su zona sur se encuentra dividido en dos zonas a causa de la existencia de un nuevo pliegue afectado por una falla inversa de alto ángulo, vergente al norte, que superpone carbonatos cretácicos a margas miocenas (Figura 3 y 4.B). Al igual que el afloramiento de la Serrezuela, la terminación SO del anticlinal está afectada por una falla de gran salto y orientación sur.

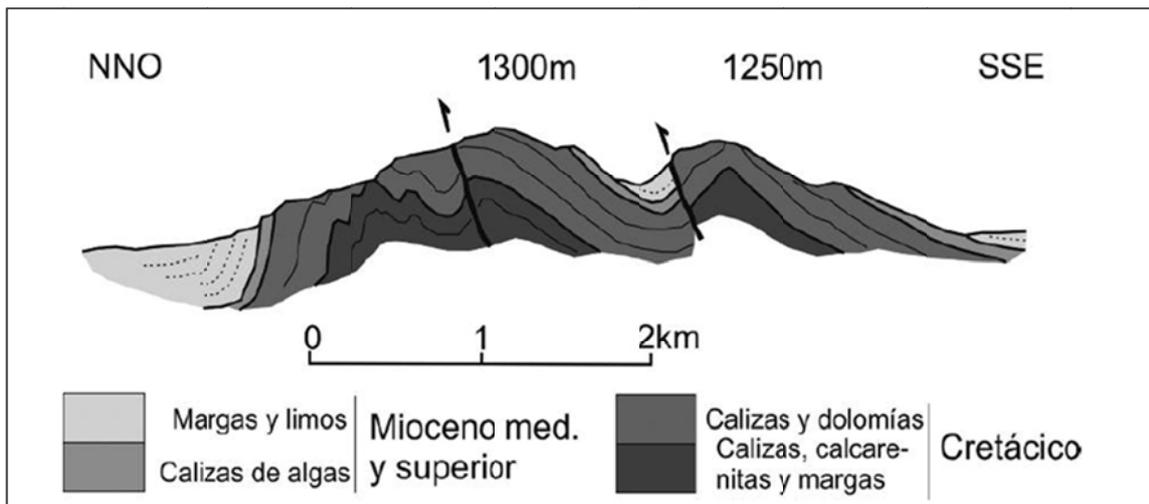


Figura 3: Corte geológico de la Sierra de Bedmar-Jódar (Sanz de Galdeano et al., 2013).

La estructura general de la sierra de La Golondrina es parecida a la de la sierra de Bedmar-Jódar y esta ha sido descrita recientemente, en Sanz de Galdeano et al., (2013). Se trata de un anticlinal vergente al N, cuyo flanco septentrional está vertical o ligeramente invertido Figura 4.D.

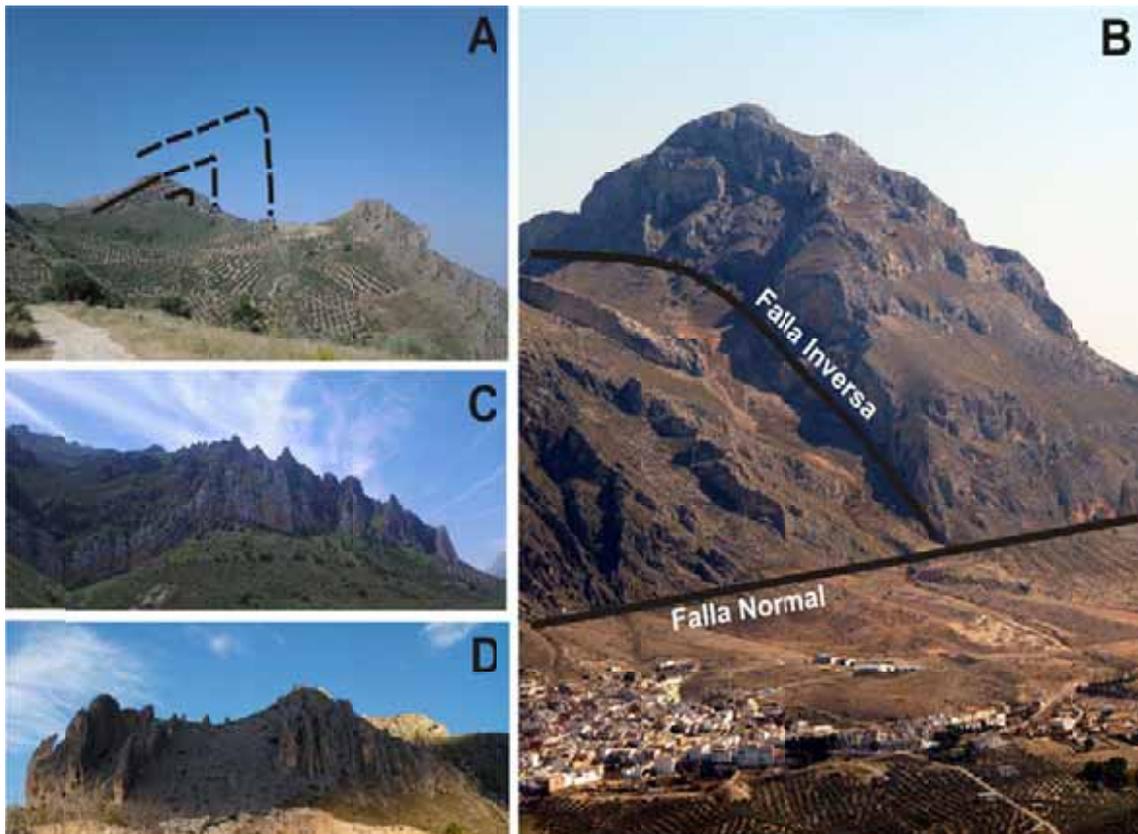


Figura 4: A: Núcleo de pliegue anticlinal vergente al N y NNO de la Serrezuela. B: Falla normal en el borde SO de la Serrezuela y falla inversa que afecta al pliegue. C: Detalle de los estratos verticalizados del flanco NO de la Serrezuela. D: Flanco septentrional de La Golondrina. (Fotos: Elena Mancera Molero)

4.3 Definición del acuífero. Estructura y geometría

El acuífero de Bedmar-Jódar presenta una superficie de materiales permeables, carbonáticos cretácicos y miocenos, próxima a 17 km² (Figura 5). Se trata de un acuífero kárstico constituido por calizas y dolomías del Cretácico medio-superior, con potencias del orden de 600-700 m (González-Hernando y González-Ramón, 2002; Sanz de Galdeano et al., 2013) y pueden aparecer localmente recubiertas por calizas algales del Mioceno medio, en las que se definen espesores inferiores a los 100 m (Álvaro et al., 1992). Las calizas algales se localizan al noroeste, en la zona meridional y al sur del relieve de la Serrezuela.

El muro del acuífero lo definen las margas, arcillas y areniscas calcáreas del Cretácico inferior y las margas y arcillas del Complejo Caótico subbético. Lateralmente el acuífero se enfrenta a materiales acuitardos del Mioceno medio y a materiales de origen triásico, incluidos en el conjunto Olistostrómico del Guadalquivir.

La geometría del acuífero consiste en una estructura plegada (Figura 6), definida por los anticlinales de la Serrezuela y el de La Golondrina. El primero da lugar al relieve de la Serrezuela; consiste en un pliegue anticlinal curvado de vergencia N y NNO. Por su parte, la estructura de la Sierra de La Golondrina también consiste en un pliegue vergente al norte. Entre ambas estructuras anticlinales existe una estructura sinclinal en el sector suroeste que se supone continúa en profundidad en el valle que separa las sierras de la Serrezuela y La Golondrina.

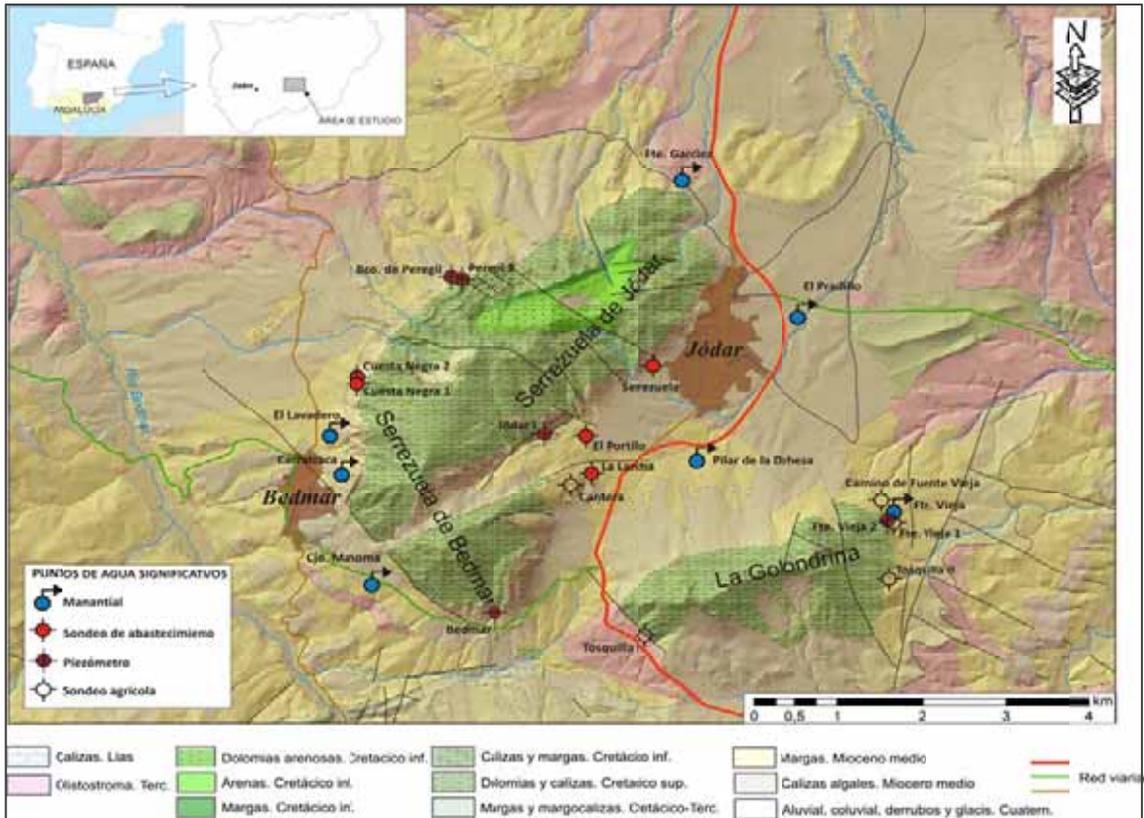


Figura 5: Mapa hidrogeológico del acuífero de Bedmar-Jódar

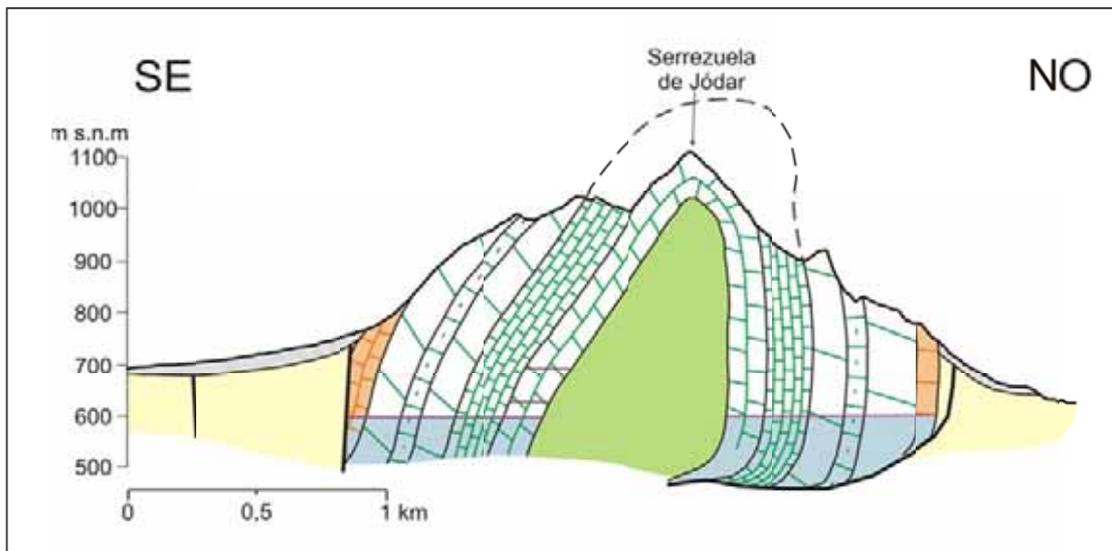


Figura 6: Corte geológico de la Serrezuela de Bedmar-Jódar.

4.3.1 Campaña de prospección geofísica.

Para mejorar el conocimiento y la definición de la estructura en profundidad de este acuífero y validar, en la medida de lo posible, la hipótesis de la continuidad de los materiales carbonáticos entre la Serrezuela de Bedmar y La Golondrina se llevó a cabo una campaña de prospección geofísica dentro del proyecto IGME-CHG (2015).

Los métodos de prospección geofísica utilizados han sido el denominado Audiomagnetotelérfico (AMT) que es una técnica en el dominio de las frecuencias, con la que se puede obtener la distribución de resistividad de un volumen del

subsuelo y la Gravimetría que permite detectar anomalías de aceleración de la gravedad debidas a la diferencia de densidad de las rocas.

Se realizaron un total de 14 sondeos audiomagnetotelúricos en estaciones alineadas en dos perfiles que intersectan en un punto equidistante entre los núcleos de Bedmar y Jódar. En la tabla 1 se presentan sus coordenadas UTM y en la figura 7 se puede observar su posición sobre una cartografía geológica. Además se han adquirido más de un centenar de estaciones gravimétricas en el entorno de las serrezuelas de Bedmar y La Golondrina.

ESTACIÓN	Nombre	Y	X
1	01Pozo	4186868	466765
2	02PreCantera	4186543	466948
3	03Cantera1	4186010	467123
4	04Cantera	4185935	467220
5	05GolondN1	4185433	467542
6	06GolondN2	4185311	467810
7	07GolondN3	4185156	467965
8	08GolondSur	4184281	468679
9	09GolondSur	4183851	468818
10	10SierraJod	4185993	465386
11	11Era	4185742	465187
12	12Falla	4185552	464499
13	13Almendral	4185342	464115
14	14Trias	4184948	463713

Tabla 1. Coordenadas de las estaciones realizadas

A partir de la información obtenida con los datos de anomalía gravimétrica se han modelizado dos perfiles gravimétricos: uno E-O perpendicular a la falla del borde occidental de la Serrezuela de Bedmar y otro en dirección NO-SE, perpendicular a las sierras. Su traza se puede ver en la figura 8 en la que además se ha representado la localización de los puntos de adquisición de datos gravimétricos.

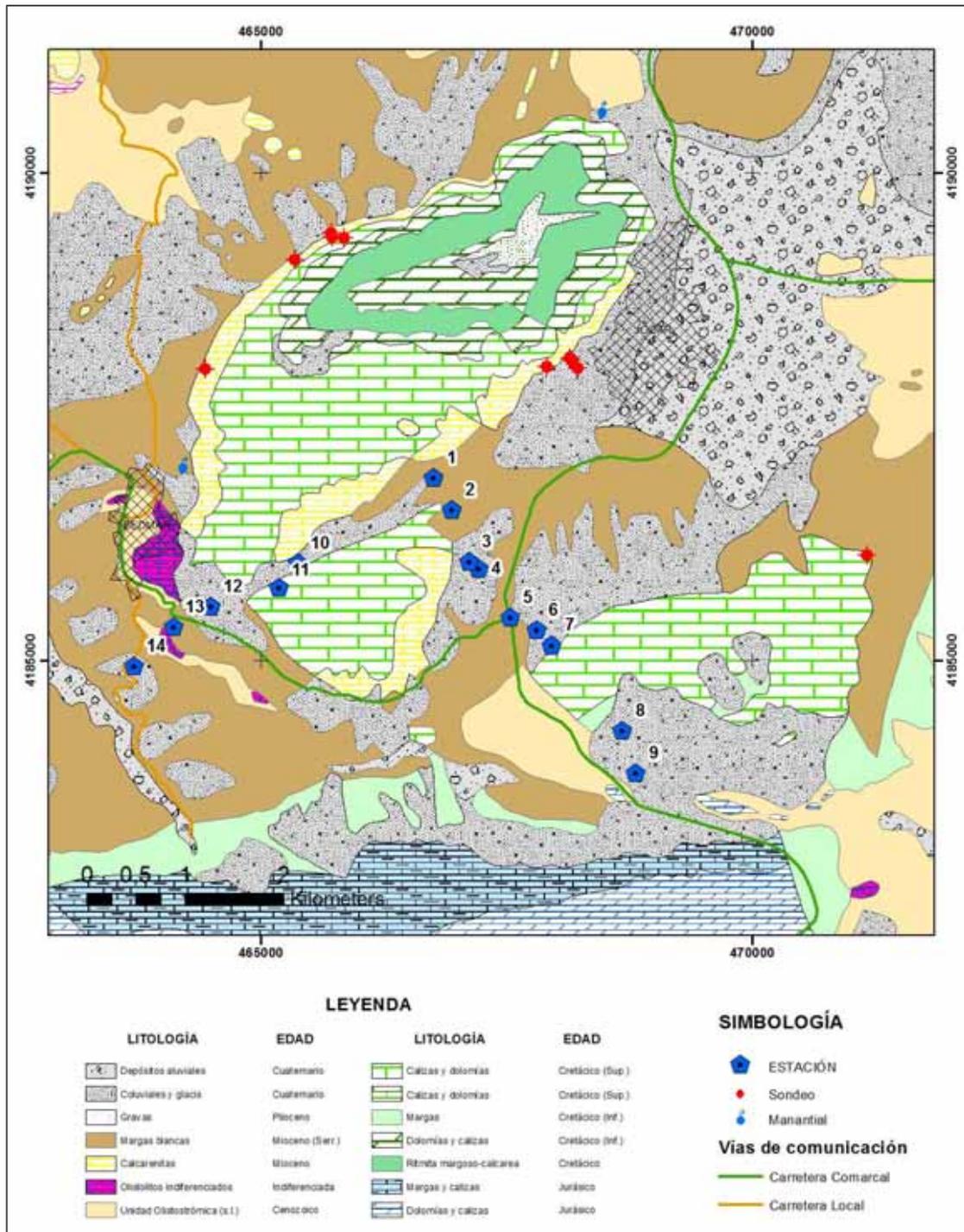


Figura 7: Localización de las estaciones AMT sobre la cartografía geológica.

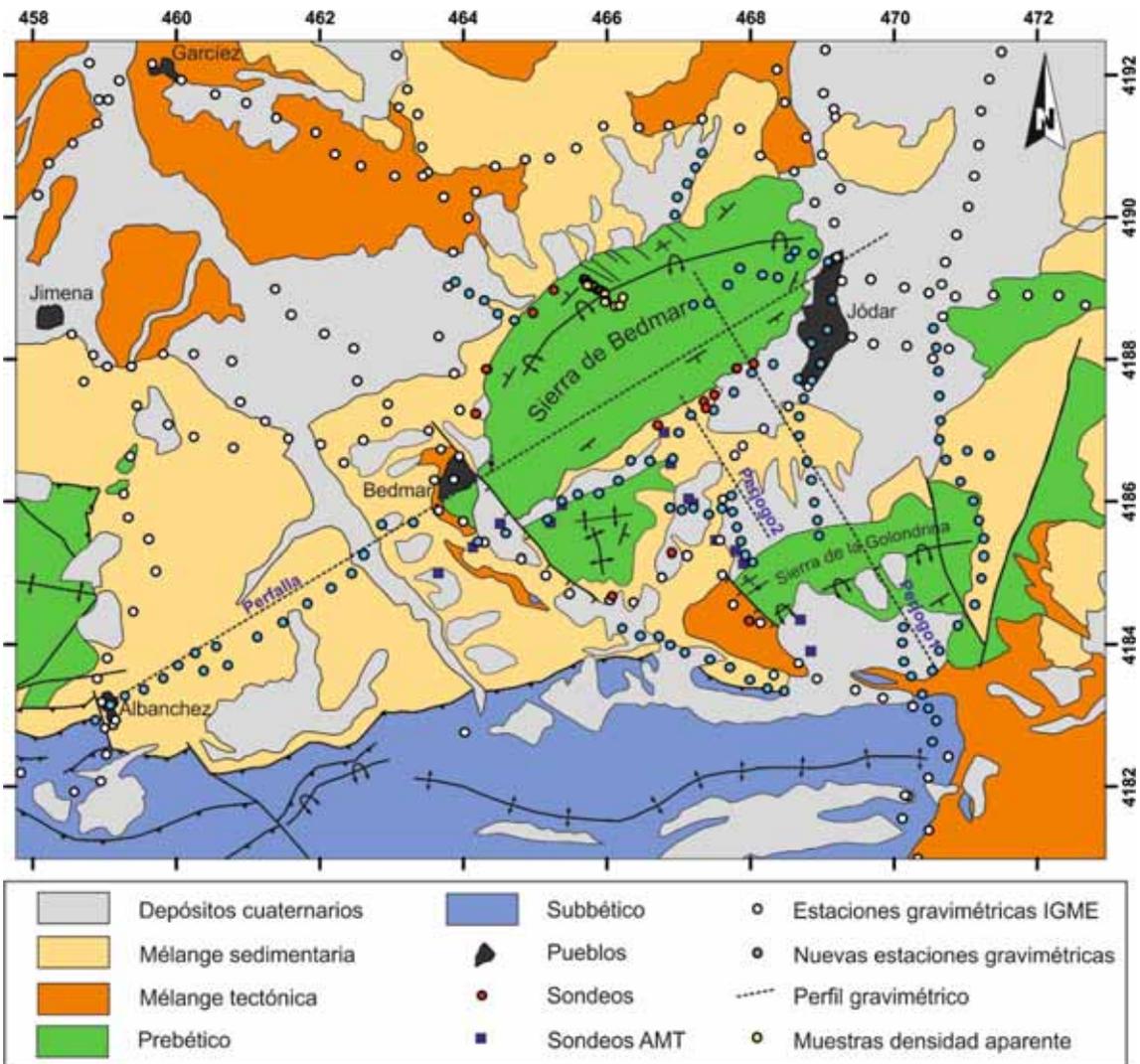


Figura 8: Mapa geológico con la posición de los diferentes datos geofísicos, sondeos y puntos de muestreo de rocas.

En el primero de los perfiles (E-O) se ha modelizado un cuerpo con densidad $2,62 \text{ g/cm}^3$ que se corresponde con los materiales carbonatados que componen la Serrezuela de Bedmar, situado sobre un cuerpo menos denso que se corresponde con los materiales de la melange (impermeable de base). El modelo muestra como las calizas que afloran en la sierra no continúan hacia el oeste. Sin embargo se observa algún bloque calizo incluido en la melange. El otro perfil, que atraviesa La Golondrina y la propia Serrezuela de Bedmar, se observa la continuidad de las calizas bajo los sedimentos detríticos existentes en la vaguada.

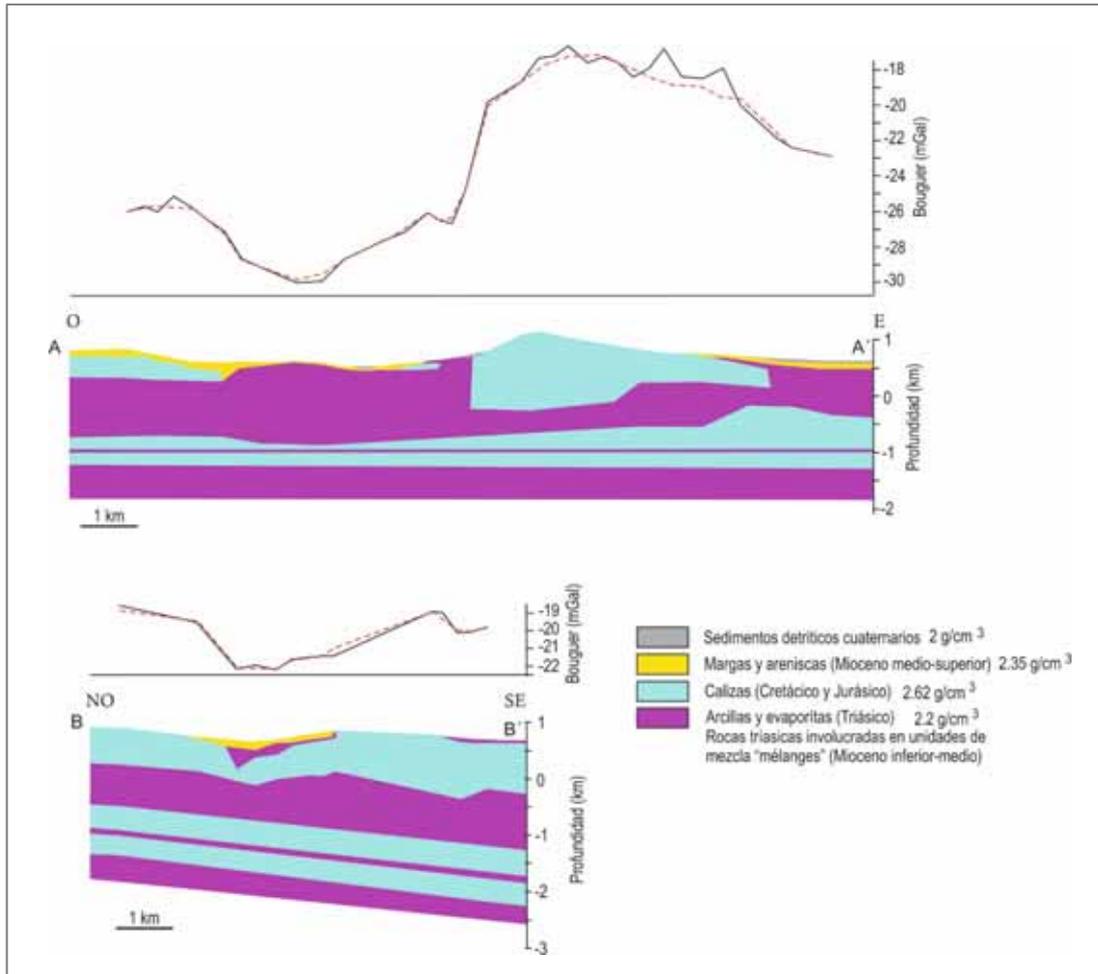


Figura 9: Modelos gravimétricos realizados a partir de la anomalía gravimétrica regional. La traza se muestra en la figura 8.

Los sondeos AMT han permitido la elaboración de dos perfiles con trazas similares a los gravimétricos. De ellos, el de dirección NO-SE se ha incluido en la figura 10. Como se puede observar, en el modelo existe una capa resistiva de varios centenares de metros de potencia debajo de los sedimentos de la unidad de mezcla (sondeos AMT de 1 a 4). Los sondeos de 5 a 7, situados en la vaguada al norte de la Sierra de la Golondrina, no detectan la capa resistiva correspondiente a las calizas ya que dichos sondeos alcanzan poca profundidad debido a la existencia de materiales muy conductores en superficie (unidad de mezcla). En el sondeo 8, al sur de La Golondrina, se detecta una capa resistiva de varios centenares de metros de potencia, que se interpreta como las calizas y bajo ella una capa muy conductora (unidad de mezcla). En el sondeo 9 solo se observan materiales de baja resistividad. En dicho perfil se han incluido también sondeos mecánicos de columna litológica conocida.

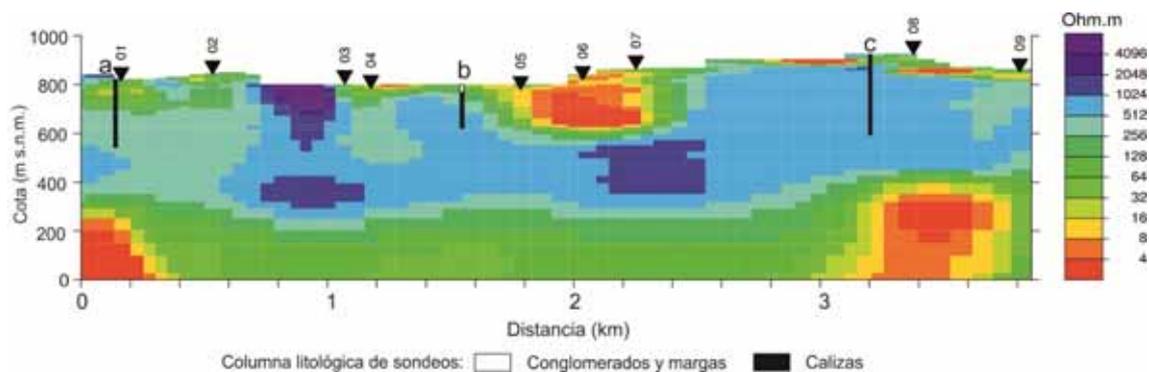


Figura 10: Inversión 2D conjunta de los modos TE y TM tanto de resistividad como de fase, de todas las estaciones AMT.

4.4 Inventario de puntos de agua

En la tabla 2 se representan los principales puntos de agua, incluidos en la Base de Datos AGUAS del IGME, así como sus principales características. Existen ocho manantiales, cuatro de ellos están secos por afecciones de los sondeos próximos y dos se encuentran captados para uso agrícola. Además, la zona investigada cuenta con 14 sondeos, de los que tres se usan para abastecimiento. El Portillo y Serrezuela abastecen al núcleo de Jódar, mientras que Cuevas Negras II se utiliza para abastecimiento al núcleo urbano de Bedmar y Garcéz. El sondeo Cuevas Negras I, también es un sondeo de abastecimiento pero actualmente está sin uso. El sondeo La Lancha se construyó para abastecimiento, pero aún no se ha puesto en marcha, actualmente se usa como piezómetro.

Para uso agrícola hay un total de tres sondeos en explotación, el resto están sin instalar. Por último, el sondeo Peregil 2 es un antiguo sondeo de investigación hidrogeológica que se utiliza como piezómetro de control.

Denominación	Naturaleza	Uso	Prof. (m)	X (UTM)	Y (UTM)	Nº IGME
Cortijo. Mahoma	Manantial	Seca por afecciones de sondeos		464423	4184899	203820011
El Lavadero	Manantial	Seca por afecciones de sondeos		463899	4186918	203820013
Fuente Garcéz	Manantial	Agricultura (0,7 hm ³ /año)		468395	4190423	203760012
El Pradillo	Manantial	Agricultura		470049	4188758	203770005
Carratraca	Manantial	Seca por afecciones de sondeos		464071	4186761	203820009
Fuente Vieja	Manantial	Seca por afecciones de sondeos		471120	4185913	203830002
Pilar de la Dehesa	Manantial			468751	4186729	203820020
Fuente del Portillo	Manantial	Agricultura		466864	4186650	203820035
Peregil 2	Piezómetro	Sin uso	164	465717	4189116	203760018
Serrezuela	Sondeo	Abastecimiento a núcleo urbano de Jódar	205	468056	4187864	203760001
Bco. del Perejil	Sondeo		206	465598	4189181	203760017
Cuesta Negra I	Sondeo	Abastecimiento a núcleo urbano de Bedmar y Garcéz. Sin uso		464329	4187783	203820014

Bedmar I	Sondeo	Piezómetro	289	466084	4184606	203820022
Jódar I	Sondeo	Piezómetro	280	466714	4187002	203820024
Cueva Negra II	Sondeo	Abastecimiento a núcleo urbano de Bedmar y Garcéz (0,1 hm ³ /año)	120	464337	4187772	203820027
Tosquilla 1	Sondeo C.R.	Piezómetro	330	467991	4184263	203820034
Fuente Vieja 2	Sondeo	Agricultura	200	471081	4185860	
El Portillo	Sondeo	Abastecimiento a núcleo urbano de Jódar	220	467228	4187006	203830013
La Lancha	Sondeo	Abastecimiento a núcleo urbano. Sin uso	240	467382	4186447	203830014
Fuente Vieja 1	Sondeo	Piezómetro	140	471068	4185865	203830012
Camino Fuente de Vieja	Sondeo	Agricultura		471065	4186044	203830014
Tosquilla 2	Sondeo C.R.	Agricultura		471140	4184984	203830015
Cantera	Sondeo					203820029

Tabla 2: Inventario de puntos de agua

4.5 Funcionamiento hidrogeológico. Piezometría.

La información piezométrica previa al inicio de la explotación del acuífero es escasa. Se sabe que existían numerosas descargas difusas en el núcleo de Jódar, lo que se ha denominado como "Fuentes públicas de Jódar", a cotas en torno a 650 m (Peinado-Parra et al., 1989; González-Hernando y González-Ramón, 2002). En Bedmar, se conocen al menos dos zonas de descarga principales formadas por la fuente de Carratraca, situada a una cota de 670 m, y más al sur la fuente del Cortijo de Mahoma, con una cota similar. La primera presentaba un caudal en torno a 10 l/s y la segunda de unos 5 l/s, ambas funcionaron al menos hasta 1977. Al norte del afloramiento de la Serrezuela se localiza el único manantial de importancia que no se ha visto afectado por las extracciones de agua subterránea: la fuente de Garcéz, situada a una cota en torno a 630 m y con caudales medios de descarga de entre 5 y 10 l/s. En el afloramiento de La Golondrina solo se conoce la existencia de un manantial de importancia, la Fuente Vieja (697 m s.n.m), que se secó en la misma época que los manantiales de la Serrezuela, para nunca más volver a surgir.

Entre junio y noviembre de 1963 el Instituto Nacional de Colonización (INC) construyó el primer sondeo en el acuífero (sondeo Serrezuela), para ser utilizado en el abastecimiento a la ciudad de Jódar. Actualmente, este sondeo continúa siendo el punto principal de abastecimiento a este núcleo urbano. En el momento de su construcción, el nivel piezométrico se situó a 695 m s.n.m., cota de referencia del nivel previa al inicio de la explotación del acuífero. A finales de 1978 se construyó el sondeo de abastecimiento a Bedmar (sondeo Cuesta Negra I), que presentó el nivel piezométrico a la cota 695 m, la misma que el sondeo Serrezuela.

Existe también alguna información de la situación piezométrica a finales de los 70 y comienzos de los 80 del pasado siglo (Peinado Parra et al., 1989). En 1983, el nivel en el acuífero presentaba descensos de unos 7 m por debajo del nivel de referencia de los años 60 y 70; en 1987 era de 10 m. La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir comenzó a controlar el nivel, con periodicidad mensual, en 1995, tras la construcción del piezómetro 05.14.01 y en 2002 se iniciaron las medidas en un segundo piezómetro, el 05.14.02. La figura 11 muestra la información suministrada

por estos piezómetros, comparada con los datos de precipitación de la estación de Jódar (IGN 5154A) completada a partir de 2006 con datos de la estación agroclimática de la Junta de Andalucía nº 103) y con la curva de desviación acumulada de la precipitación mensual respecto a la media de esa serie de precipitación.

Ambos piezómetros muestran una evolución similar, con escasas diferencias en sus cotas piezométricas. Esto indica que cortan una misma zona saturada y sugiere que la permeabilidad es elevada. El comienzo de la serie de medidas se produjo en un año extraordinariamente seco, el nivel se sitúa al inicio de las medidas unos 60 m por debajo del nivel de referencia. Se mantiene más o menos estabilizado hasta 1998, donde alcanza el máximo de la serie y comienza a descender a un ritmo de unos 5 m/año hasta 2010, año en que se invierte la tendencia debido a que éste fue extraordinariamente lluvioso. El mínimo se alcanza en junio de 2009, con 107 m por debajo del nivel de referencia. El periodo de descenso más acusado coincide con una serie seguida de años secos entre 2005 y 2010 (figura 11); sin embargo, se observa que se inicia antes del comienzo de esta serie seca, por lo que debió producirse un incremento en la explotación durante en esos años.

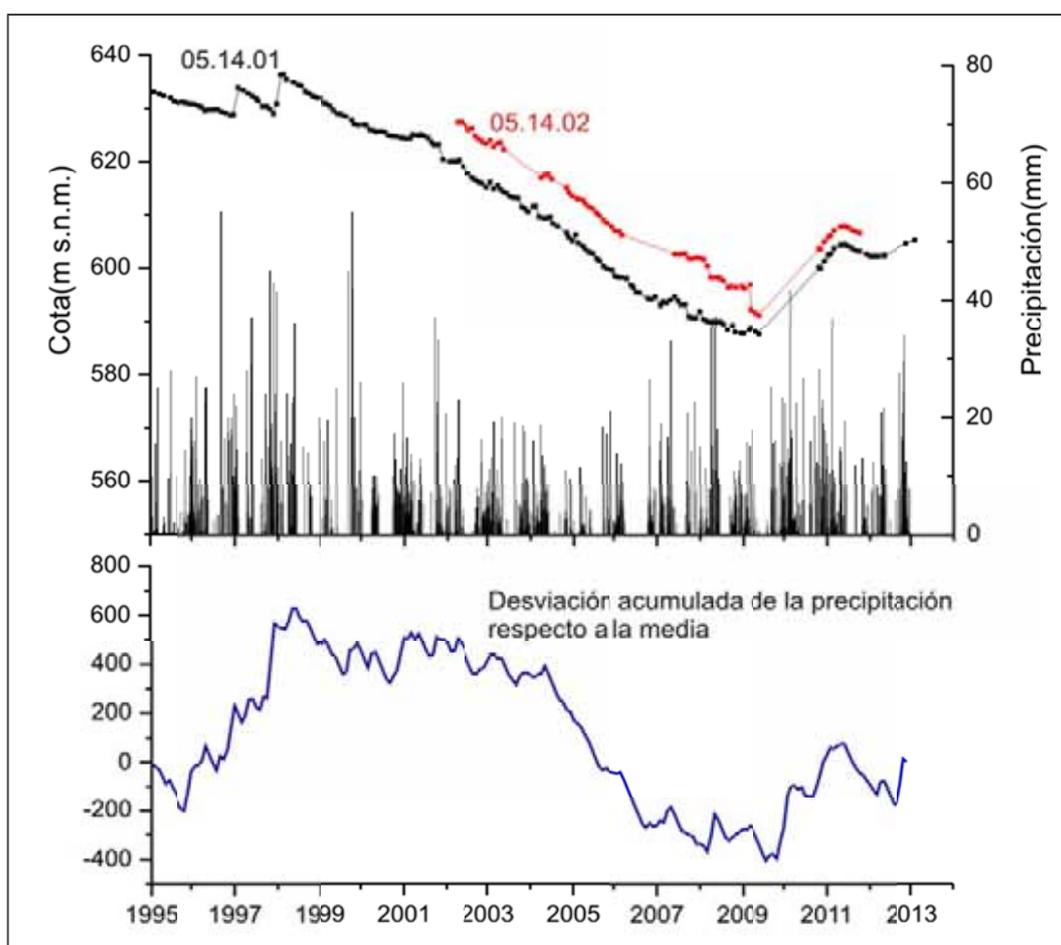


Figura 11: Evolución piezométrica histórica en el acuífero de Bedmar-Jódar (puntos de la Red nacional) y su comparación con la precipitación diaria y con la desviación acumulada de la precipitación mensual respecto a la media. Datos de precipitación unificados de la estación del IGN 5154A (Jódar) y la estación agroclimática de la Junta de Andalucía 103 (Jódar).

En este acuífero se ha definido una red de control piezométrico que consta de 4 puntos en dos de los cuales se han instalado sensores automáticos de registro. En

la figura 12 se presenta un gráfico con la evolución piezométrica reciente del acuífero según los datos suministrados por los sensores automáticos. Como se puede observar en la figura, la evolución de ambos puntos es similar con una cierta tendencia descendente. En el caso del piezómetro Fuente Vieja I que en principio se asignaría al acuífero de la Golondrina y puesto que está situado muy próximo a un sondeo de explotación y el nivel se ve afectado por los bombeos, se ha representado también su línea de tendencia la cual es prácticamente paralela a la curva del piezómetro Bedmar I. Esto indica que el comportamiento de ambos acuíferos es similar y que, muy probablemente, existe una conexión en profundidad entre ambos.

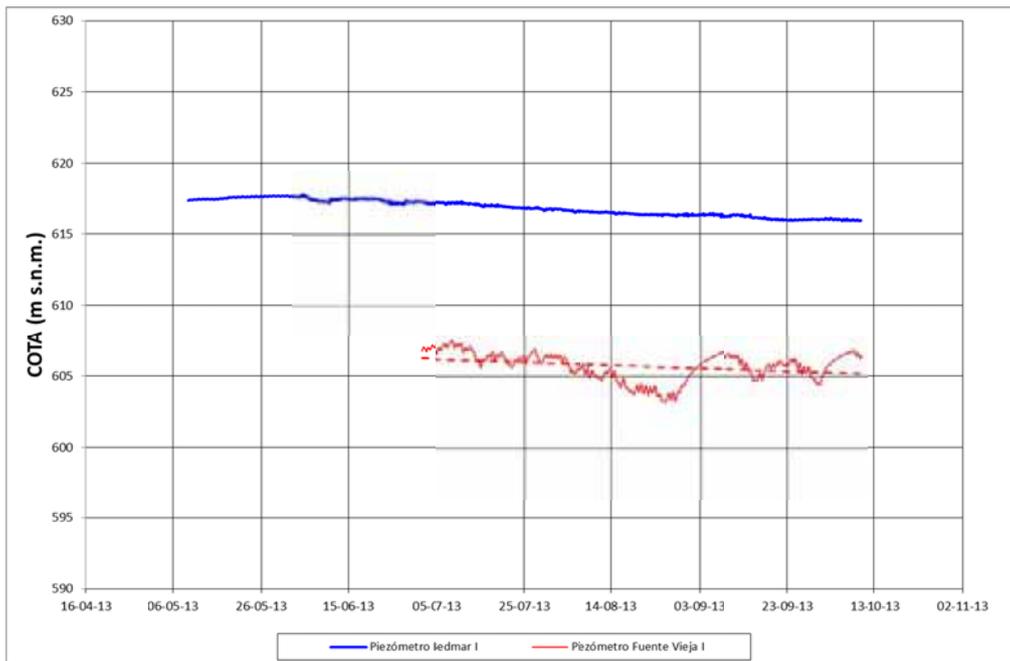


Figura 12: Evolución piezométrica del acuífero de Bedmar-Jódar-La Golondrina

Durante el año 2014 se ha continuado con el control de la red piezométrica y foronómica definida para este acuífero. En la figura 13 se presenta un gráfico con la evolución piezométrica reciente del acuífero según los datos suministrados por los sensores automáticos en el que se puede observar (figura 13A), en el caso del piezómetro Fuente Vieja I con claridad los ciclos de bombeo de un sondeo cercano además de que la envolvente de la curva indica periodos de descenso (con bombeos) y recuperación (sin bombeos). Los otros dos piezómetros siguen una evolución paralela con algún episodio de infiltración rápida por intensas lluvias en el caso del Bedmar I. Estos valores corresponden, en el tiempo, a los finales de la curva del punto 05.14.01 en la figura 13B.

En trabajos anteriores se ha planteado la posibilidad de la existencia o no de conexión hidrogeológica entre los afloramientos de la Serrezuela y La Golondrina (ITGE-DPJ, 1997). El hecho de una similitud notable en las cotas del nivel piezométrico en los sondeos de Jódar y Bedmar y el manantial de Fuente Vieja sugiere la existencia de esta relación. Por otra parte, el manantial se secó cuando estos sondeos se pusieron en explotación, sin que existiesen extracciones en el afloramiento de La Golondrina. Esto es una evidencia que, junto con la similitud en el comportamiento piezométrico, no se puede obviar, por lo que hay que considerar

que ambos afloramientos forman una única unidad hidrogeológica con una zona saturada común.

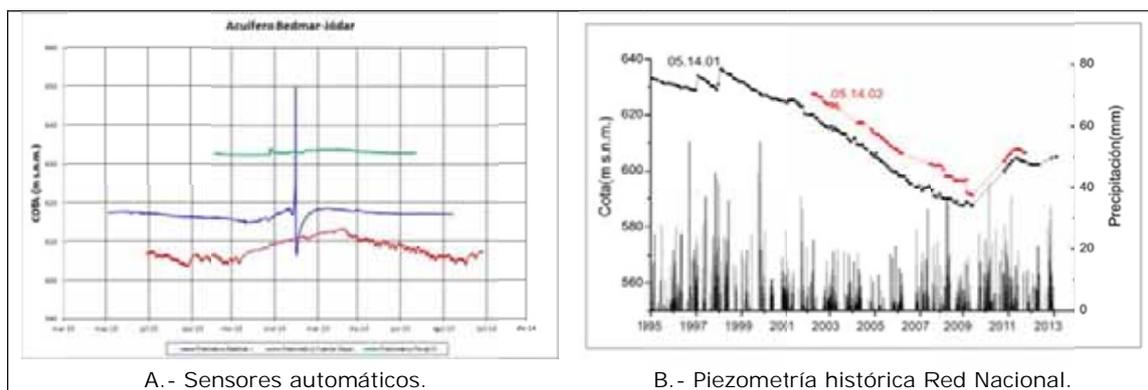


Figura 13: Evolución piezométrica del acuífero de Bedmar-Jódar

En régimen no influenciado por bombeos, existían numerosas descargas difusas en el núcleo de Jódar denominadas “Fuentes públicas de Jódar”, situadas a cotas próximas a 650 m s.n.m. En el núcleo de Bedmar se tiene constancia de dos zonas principales de descarga. Estas son la conocida fuente de Carratraca (203820009) a cota 650 m s.n.m. y un caudal en torno a 10 l/s y la fuente del Cortijo de Mahoma (203820011), a la misma cota y con un caudal de 5 l/s. Ambas funcionaron hasta 1977 y, de la primera, es la fotografía de la portada de este informe. Por otra parte, la Fuente de Garcéz (203760012) se localiza al norte del afloramiento de la Serrezuela, a cota 630 m s.n.m. y parece drenar un pequeño sector del acuífero aislado del resto por cuestiones tectónicas, lo que explicaría que no se haya visto afectada por la explotación. En el afloramiento de la Golondrina sólo se tiene constancia de un manantial significativo denominado Fuente Vieja (203830002) situado a 697 m s.n.m. que se secó en la misma época que los manantiales de la Serrezuela.

Las extracciones de agua subterránea que se producen en la Serrezuela corresponden a los sondeos de abastecimiento a Jódar denominados Serrezuela (203760001) y El Portillo (203820036), el sondeo Cuevas Negras (203820027) de apoyo al abastecimiento de Bedmar y el sondeo de las canteras de La Lancha (203820029). En el afloramiento de la Golondrina, las extracciones se producen en el sondeo Fuente Vieja (203820027), los sondeos de la C.R. La Tosquilla (203820034 y 203830015) y algunos de menor entidad, todos ellos para agricultura.

4.6 Hidroquímica y calidad del agua.

Según se desprende de los trabajos realizados en el proyecto “Investigaciones hidrogeológicas sobre Masas de Agua Subterránea con problemas de explotación en la cuenca del Guadalquivir. Propuesta de uso sostenible (Alto Guadalquivir). Convenio IGME-CHG”, referido en el epígrafe de Introducción y Antecedentes, la mayoría de las aguas del acuífero presentan facies bicarbonatada cálcico-magnésica con algunas muestras de facies bicarbonatada-sulfatada e incluso clorurada apareciendo también un caso de predominio del catión Na^+ . La conductividad eléctrica está comprendida entre 346 y 1331 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una media de 620 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los puntos de agua relacionados con los afloramientos de la Serrezuela y de la Golondrina tienen, en general, una composición química similar con algunas

excepciones. Los situados en el flanco noroccidental de la Serrezuela, en la zona de Bedmar, tienen menores contenido en sodio y en cloruro que los situados en el flanco suroriental, en la zona de Jódar lo que se podría reflejar la influencia de las margas miocenas marinas que recubren el acuífero en esa zona.

En el mencionado proyecto también se indica que, según la información de aquellos puntos de los que se tiene registro histórico, los más antiguos de la década de los 90 del pasado siglo, no existe un deterioro significativo de la calidad del agua si bien existen dos puntos, el sondeo Cuevas Negras II y el sondeo Tomillares, en los que existen variaciones. En el primero aparecen en 2006 significativos incrementos en el contenido en sulfato y sodio con respecto a los analizados en 2013, coincidiendo con un mínimo histórico del nivel piezométrico y en el segundo los valores en cloruro, sulfato y sodio son notablemente más elevados en 2006 que en las analíticas de los años noventa.

El contenido en isótopos naturales del agua de los puntos que corresponden a las aguas bombeadas en los sondeos Cantera, Serrezuela y Fuente Vieja es similar, lo que es un argumento más que apoya la existencia de relación hidrogeológica entre los afloramientos de la Golondrina y la Serrezuela.

4.7 Parámetros hidráulicos

La caracterización de la porosidad y la permeabilidad de las formaciones permeables del acuífero estudiado se ha determinado a partir de 21 muestras de campo cuya situación se presenta en la figura 14 sobre una base geológica.

La distribución estadística de los valores de porosidad abierta determinada por inmersión de las muestras en cámara de vacío se representa en la figura 15. La muestra estadística no se ajusta a una distribución normal y el valor medio de la porosidad abierta es del 5,17% con una desviación estándar de $\pm 4,66\%$. En la figura 12 se presenta el histograma en el que se observa la presencia de varias muestras con porosidades elevadas, mayores con el 14%, que están en relación con la naturaleza calcarenítica de las muestras.

En cuanto a la transmisividad esta alcanza los 1.000 m²/día según SGOP (1991). La interpretación de los ensayos de bombeo realizados en SGOP (1993) arroja unos valores de 6.640 m²/día para el sondeo realizado en el término municipal de Bedmar (203820022) y 6,3 m²/día para el del término municipal de Jódar (203820024). De algunos sondeos realizados por el I.N.C. en las proximidades de Jódar se pueden deducir valores de 3000 y 5000 m²/día (IGME-CHG, 2015).

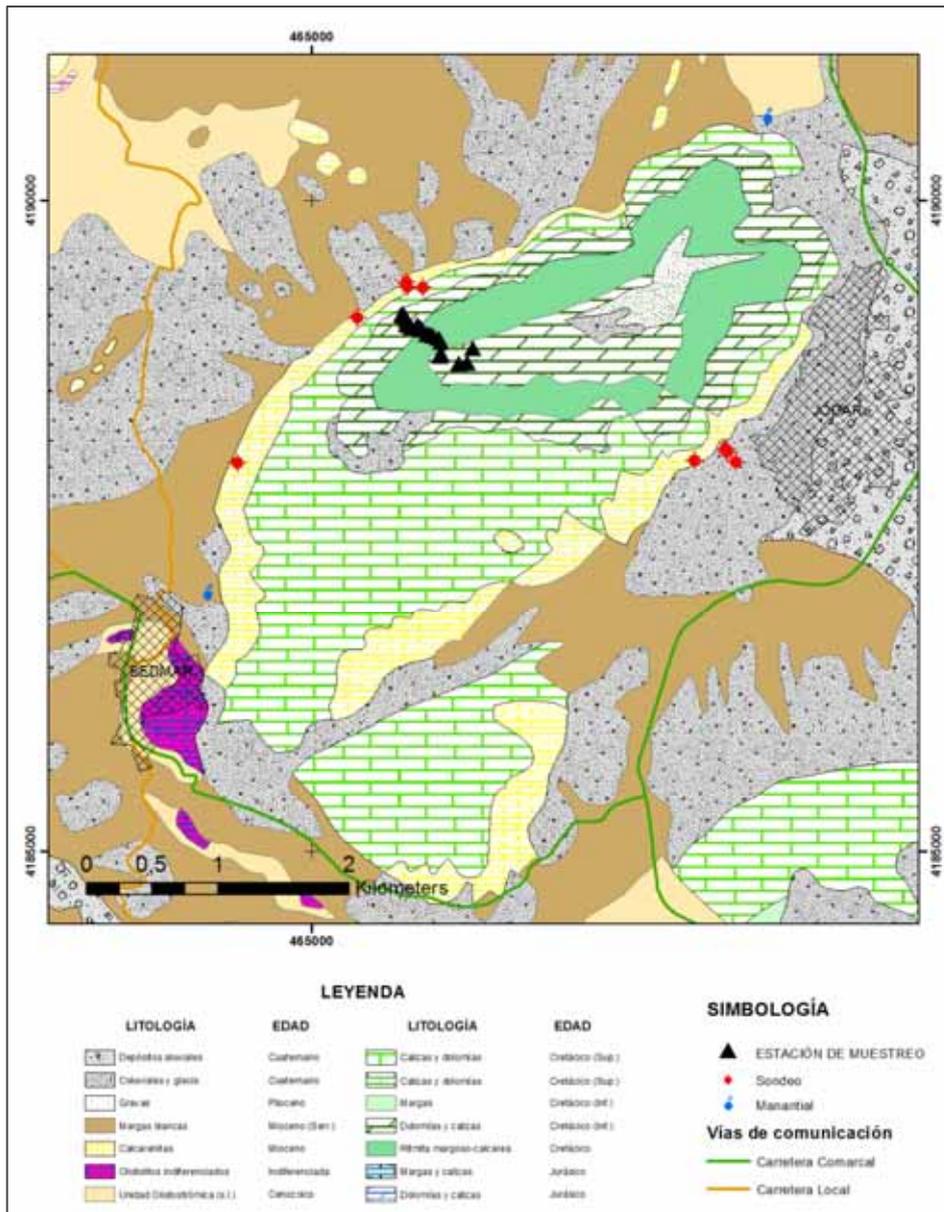


Figura 14: Localización de los puntos de muestreo para determinación de la porosidad y permeabilidad.

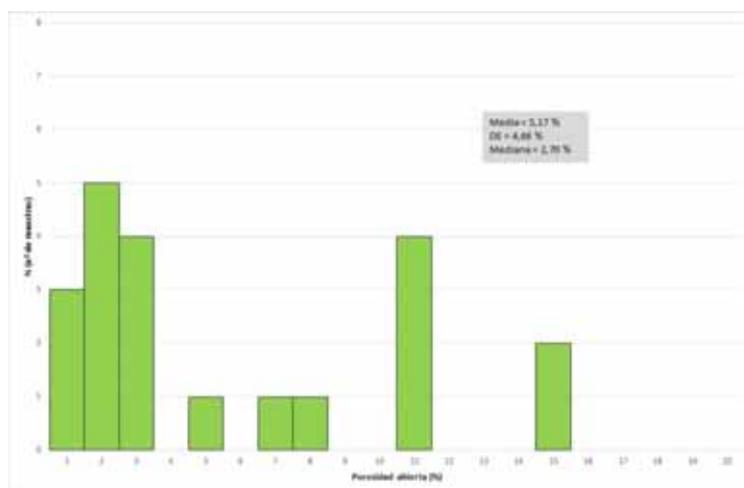


Figura 15: Histograma de los valores de porosidad abierta de las muestras de roca del acuífero Bedmar-Jódar.

Nº	REF.	Porosidad abierta (%)	Incert. (%)	Densidad aparente (kg/m ³)	Incert. (kg/m ³)	Kg (mD)	KI (mD)	Kagua (m/s)	log (Kagua)
BM-1	5164-01	1	0,01	2671	0,3	0,005	0,002	1,94E-11	-10,71
BM-2	5164-02	1,1	0,12	2672	1,7	0,007	0,003	2,90E-11	-10,54
BM-3	5164-03	1,7	0,01	2659	0,3	3,962	3,413	3,30E-05	-4,48
BM-4	5164-04	10,5	0,01	2540	0,3	102,329	90,877	8,80E-04	-3,06
BM-5	5164-05	10,4	0,01	2541	48,7	4,118	3,256	3,15E-05	-4,50
BM-6	5164-06	2,7	0,02	2691	0,3	54,063	47,013	4,55E-04	-3,34
BM-7	5164-07	14,1	0,01	2377	1,7	9,067	8,142	7,88E-05	-4,10
BM-8	5164-08	2,2	2,26	2771	0,3	35,134	32,731	3,17E-04	-3,50
BM-9	5164-09	7	0,24	2637	66,8	17,213	15,269	1,48E-04	-3,83
BM-10	5164-10	7,1	0,35	2636	7,1	0,085	0,05	4,84E-10	-9,32
BM-11	5164-11	0,7	0,01	2673	3,9	0,007	0,003	2,90E-11	-10,54
BM-12	5164-12	10,4	0,02	2537	0,3	2,095	1,684	1,63E-05	-4,79
BM-13	5164-13	0,7	0,01	2682	2,6	0,012	0,006	5,81E-11	-10,24
BM-14	5164-14	2,6	0,01	2634	0,3	3,17	2,774	2,69E-05	-4,57
BM-15	5164-15	1,4	0,01	2658	0,3	0,021	0,011	1,06E-10	-9,97
BM-16	5164-16	1,1	0,01	2660	0,3	5,304	4,539	4,39E-05	-4,36
BM-17	5164-17	4,5	0,01	2589	0,2	0,128	0,077	7,45E-10	-9,13
BM-18	5164-18	2,8	0,31	2625	0,3	0,117	0,07	6,78E-10	-9,17
BM-19	5164-19	2	0,01	2628	1,7	0,211	0,131	1,27E-09	-8,90
BM-20	5164-20	14,4	0,01	2422	0,5	18,487	17,096	1,65E-04	-3,78
BM-21	5164-21	10,1	0,01	2539,00	0,2	0,041	0,023	2,23E-10	-9,65
Media		5,17	0,16	2611,52	6,58	12,170	10,818	1,05E-04	-6,78
DE		4,66	0,49	91,92	17,33	24,813	22,054	2,14E-04	3,02
Mediana		2,70	0,01	2636,00	0,30	2,095	1,684	1,63E-05	-4,79
Percen. 10		1,00	0,01	2537,00	0,30	0,007	0,003	2,90E-11	-10,54
Percen. 90		10,50	0,31	2682,00	7,10	35,134	32,731	3,17E-04	-3,50
CV		0,90	2,98	0,04	2,64	2,039	2,039	2,04E+00	-0,45
Max.		14,40	2,26	2771	66,80	102,329	90,877	8,80E-04	-3,06
Min.		0,70	0,01	2377	0,20	0,005	0,002	1,94E-11	-10,71

Tabla 3: Estadísticos descriptivos de los valores de porosidad y permeabilidad de la matriz del acuífero de Bedmar-Jódar.

4.8 Volúmenes utilizables o disponibles en el acuífero (reservas útiles).

La evaluación de la recarga natural en el acuífero se ha llevado a cabo mediante la utilización de dos métodos: método APLIS y Balance de Agua en el Suelo (BAS)

4.8.1 Precipitación

En el área investigada existen 21 estaciones meteorológicas, de las que 18 pertenecen a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y 3 son estaciones agroclimáticas pertenecientes a la Junta de Andalucía. En todas las estaciones disponibles se realiza una medida diaria de precipitación en continuo. En la Tabla 1 se resumen los datos de las estaciones consideradas (código, denominación,

coordenadas, cota, periodo de registro y años completos), mientras que en la Figura 16 se representa su situación.

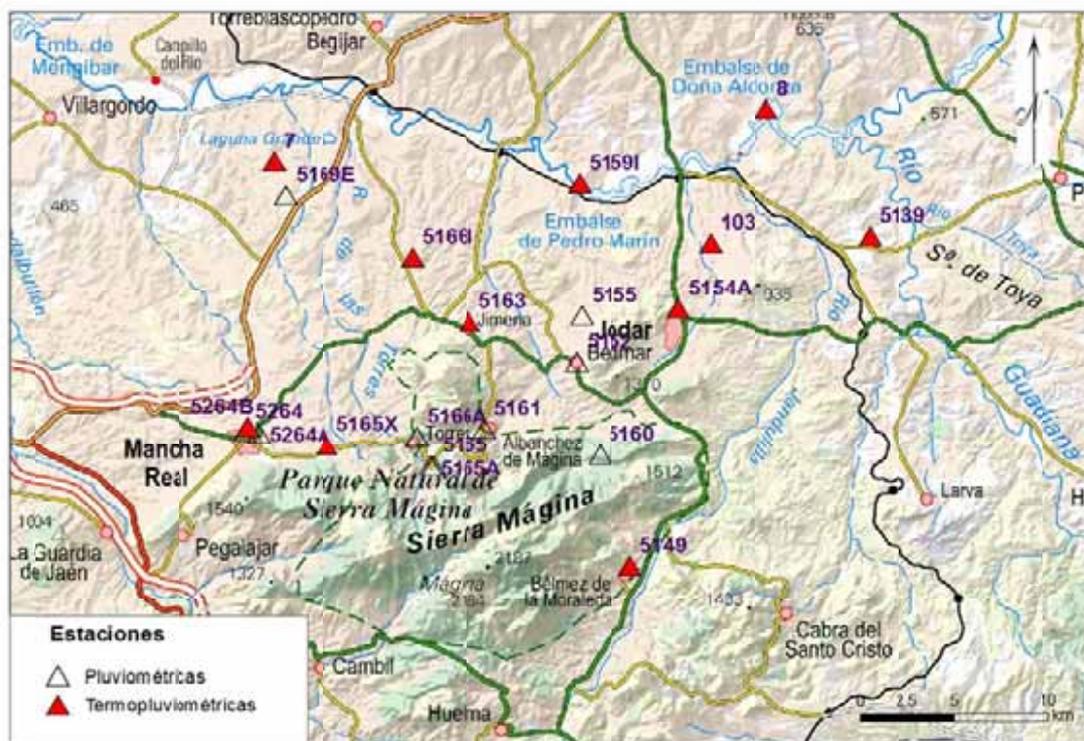


Figura 16: Estaciones meteorológicas del área de estudio

La distribución espacial de los observatorios es relativamente uniforme y el rango altitudinal está comprendido entre 310 m s.n.m. (Observatorio Pantano de Pedro Marín) y 1030 m s.n.m. (Observatorio Torres ICONA <CHG>).

La duración y calidad de las series de datos pluviométricos y el año en que comienzan sus registros son muy heterogéneas, de tal forma que hay estaciones con periodos de datos diarios que abarcan 61 años junto a otras con sólo 3 años. La elección del periodo de análisis se ha realizado mediante la comparación temporal de los datos disponibles (Figura 17). A partir de la misma, se ha elegido el periodo de análisis comprendido entre 1 de enero de 1991 y el 31 de diciembre de 2012. Consiste en un periodo de 21 años, que abarca la suficiente variabilidad meteorológica para la obtención de información representativa y en el que es posible completar las series de datos ausentes con un número de estaciones representativo.

Código Estación	Denominación	Cota (m.s.n.m)	Perido de registro	Nº de años completos	X (UTM)	Y (UTM)	Fuente
7	MANCHA REAL	436	2000-2012	8	447686	4196913	JUNTA DE ANDALUCIA
8	ÚBEDA	358	2000-2012	8	473694	4199725	JUNTA DE ANDALUCIA
103	JÓDAR	488	2006-2012	0	470716	4192610	JUNTA DE ANDALUCIA
5139	UBEDA (PROPIOS DEL GUADIANA)	420	1965-1990	24	479065	4192967	AEMET
5149	BELMEZ DE LA MORALEDA (CHG)	887	1952-2009	35	466536	4175441	AEMET

5154A	JODAR	660	1952-2000	28	469035	4189115	AEMET
5155	BEDMAR Y GARCIEZ-LA MATILLA	640	1952-1984	24	463901	4188705	AEMET
5159I	PANTANO DE PEDRO MARIN	310	1973-1998	17	463761	4195763	AEMET
5160	BEDMAR Y GARCIEZ (VALLE DE BEDMAR)	920	1951-1988	27	464847	4181304	AEMET
5161	ALBANCHEZ DE UBEDA	865	1954-2002	29	458861	4182718	AEMET
5162	BEDMAR Y GARCIEZ (BEDMAR)	683	1953-1984	19	463646	4186240	AEMET
5163	JIMENA	590	1950-2011	55	458034	4188424	AEMET
5165	TORRES ICONA (CHG)	1030	1968-2010	26	456037	4180730	AEMET
5165A	TORRES TIO HARO	1000	1968-1997	3	455915	4180730	AEMET
5165X	TORRES (AUTOMÁTICA THIES)	910	2008-2011	1	450515	4181840	AEMET
5166A	TORRES	885	1978-2010	28	455189	4182275	AEMET
5166I	BAEZA (LAS ESCUELAS)	535	1989-1993	1	454997	4191831	AEMET
5169E	MANCHA REAL BANDERAS	420	1969-2010	25	448299	4195106	AEMET
5264	MANCHA REAL (C.DE A.)	753	1951-1999	30	446189	4182545	AEMET
5264A	MANCHA REAL VIVEROS	795	1957-1988	16	446922	4182417	AEMET
5264B	MANCHA REAL SEA	765	1967-1996	23	446338	4182790	AEMET

Tabla 4. Características principales de las estaciones pluviométricas utilizadas. En negrita se resaltan las estaciones escogidas.

Además de establecer el periodo de análisis, mediante la Figura 16 se han elegido las estaciones más idóneas, en cuanto a proximidad a la zona de estudio y a la información meteorológica existente. De esta forma, el cálculo de los valores medios anuales y el análisis de la evolución temporal de la pluviometría se han realizado con la información pluviométrica correspondiente a las estaciones de Jimena (5163) y la serie generada mediante la agrupación de los datos de precipitación diaria de los observatorios IGN 5154A (Jódar) y la estación agroclimática de la Junta de Andalucía nº 103 (Jódar).

Analizadas y seleccionadas las series disponibles de datos diarios de precipitación, y definido el periodo a tratar, se procedió a realizar el contraste, la corrección, el completado y la restitución de la información pluviométrica.

Estos cálculos se han llevado a cabo mediante la aplicación TRASERO 2.1.0 (Padilla y Delgado, 2011). El completado se realizó mediante regresión lineal. La tabla 5 muestra la matriz de coeficientes de correlación obtenidos entre las estaciones completadas y el resto.

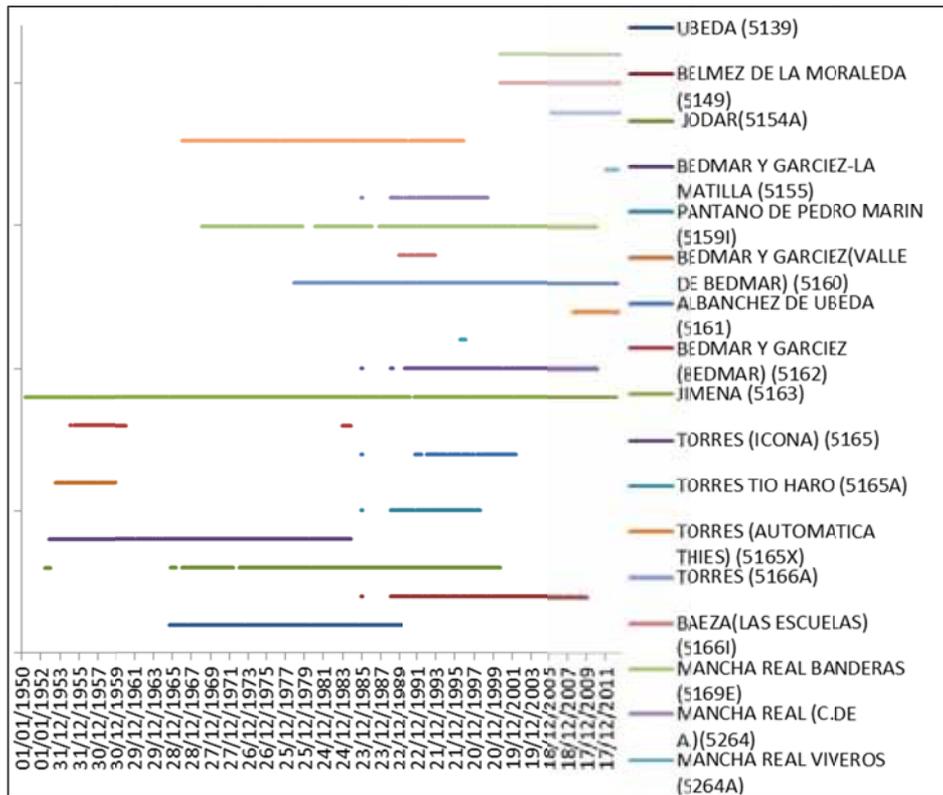


Figura 17: Comparación espacio-temporal estaciones meteorológicas.

Código Estación	Jódar (5154A)	Jimena (5163)
5139	0,116	0,078
5149	0,223	0,285
5154A	1	0,414
5155	0,293	0,418
5159I	0,426	0,425
5160	0	0,561
5161	0,148	0,101
5162	0,034	0,402
5163	0,414	1
5165	0,571	0,482
5165A	0,726	0,743
5165X	0	0,376
5166A	0,503	0,498
5166I	0,334	0,415
5169E	0,161	0,105
5264	0,282	0,305
5264A	0	0,382
5264B	0,474	0,533
7	0,752	0,319
8	0,181	0,32
103	0	0,353

Tabla 5. Matriz de correlación de las estaciones meteorológicas completadas y el resto.

En ocasiones, los coeficientes de correlación resultan elevados pero no son representativos. Esto es debido al escaso número de datos de algunas series. Por tanto, el completado de las series se ha realizado con la estación nº 5165 en el caso de la estación de Jimena, y con la estación nº 5166A en el de la estación agrupada de Jódar.

Mediante la agrupación de los datos diarios, se han generado las series de datos anuales de las estaciones escogidas. Estos valores se muestran en la Tabla 3, junto con algunos datos estadísticos significativos. El valor medio de precipitación anual del conjunto de las estaciones es de 414 mm y coincide aproximadamente con el del año 2009. El año más seco es 2005 con tan solo 206 mm y el más húmedo 2010 con una precipitación media de 856 mm.

Año	Jódar	Jimena	Media
1991	381,9	273,7	327,8
1992	424,8	361,5	393,1
1993	283,4	300,9	292,1
1994	350,5	343,5	347,0
1995	304,4	262,4	283,4
1996	696,0	575,7	635,9
1997	852,4	787,9	820,2
1998	341,0	332,9	336,9
1999	432,5	381,8	407,1
2000	386,4	330,5	358,4
2001	484,0	474,8	479,4
2002	311,0	332,2	321,6
2003	409,5	360,2	384,8
2004	267,8	264,9	266,3
2005	179,4	232,6	206,0
2006	203,7	342,0	272,9
2007	356,4	362,3	359,4
2008	477,8	273,2	375,5
2009	388,5	443,5	416,0
2010	754,1	958,9	856,5
2011	354,8	484,2	419,5
2012	500,6	611,3	555,9
Media	415,5	413,2	414,4
Desviación estándar	166,6	180,1	167,1
Coef. Variación	0,4	0,4	0,4
Mediana	384,1	351,9	367,4
Min	179,4	232,6	206,0
Máx	852,4	958,9	856,5
Coef. Asimetría	1,3	1,8	1,6

Tabla 6. Series pluviométricas anuales completadas y corregidas (mm/año) y algunos estadísticos descriptivos. En negrita se resaltan los años que ha sido necesario completar.

En cuanto a los estadísticos descriptivos, se observa como al tratarse de una variable como la precipitación se obtienen valores de desviación estándar, coeficientes de variación y coeficientes de asimetría altos.

La evolución de la precipitación anual registrada en los observatorios pluviométricos seleccionados de la zona de investigación está representada en la figura 18. Se ha incluido también la línea que marca la media anual de la serie en cada uno de los gráficos

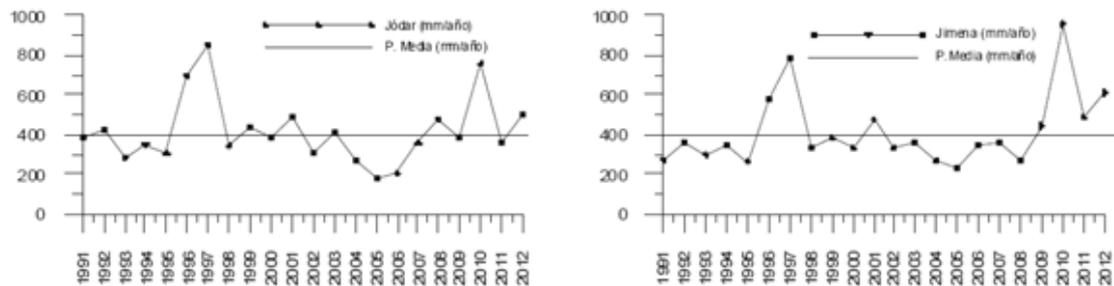


Figura 18: Distribución temporal de la media anual de las precipitaciones anuales (mm/año) para las estaciones Jimena y Jódar unificada durante el periodo comprendido entre 1991 y 2012.

En la Figura 18 se observa que el año 2005 ha sido el más seco. Asimismo, los periodos comprendidos entre 1995 y 1997, y entre 2009 y 2010, destacan por ser años con precipitaciones bastante por encima de la media.

Las desviaciones acumuladas de la precipitación mensual respecto a la media en los observatorios estudiados se han representado en la Figura 19. El análisis de este tipo de gráficas es de especial interés, debido a la marcada relación entre la desviación de la precipitación mensual con respecto a la media y la evolución piezométrica de los acuíferos carbonáticos de no muy grandes dimensiones (Lambán, 1998; Martos-Rosillo, 2005).

Se contempla que en ambas estaciones se producen las mismas tendencias. Se diferencian 9 tendencias, limitadas por 2 valores mínimos (años 1996 y 2010) y 3 máximos (años 1992, 1999 y 2011). Entre los dos valores mínimos destaca el correspondiente al año 2010, ocurrido tras 11 años de valores acumulados negativos. El valor acumulado más desplazado respecto a la media se mide en 2010, en el observatorio de Jimena, si bien destaca el importante incremento de la precipitación en el periodo comprendido entre 2010 y 2011, coincidiendo con la máxima preci En la Tabla 4 se presentan algunos estadísticos descriptivos en relación con la intensidad diaria de la precipitación. Asimismo, se presentan los resultados del tratamiento de los datos de precipitación diaria, del periodo 1991-2012, de las 2 estaciones consideradas. Una serie completa de ese periodo dispondría de 8036 registros.pitación registrada en todo el periodo.

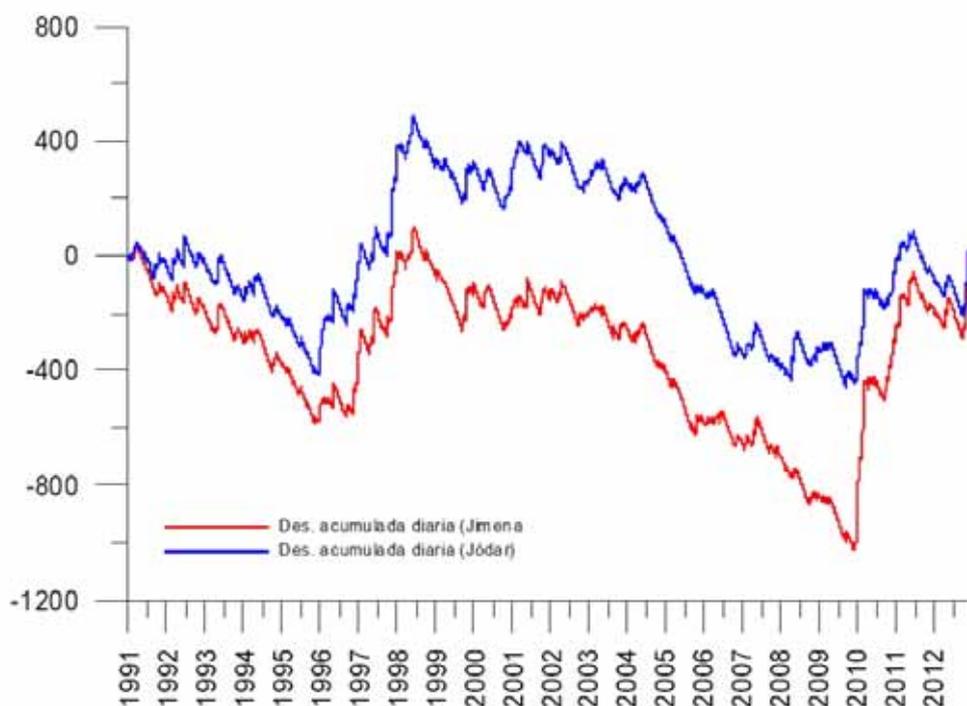


Figura 19: Desviación acumulada de la precipitación diaria respecto a la media (mm/día) en los observatorios de la unidad Bedmar-Jódar para el periodo comprendido entre 1991 y 2012.

	Jódar 5154A +103	Jimena 5153
N (número de datos)	5991	7760
Media (mm/día)	1,18	1,15
Desviación estándar (mm/día)	4,20	4,48
Máx. (mm/día)	55	81,5
Media en los días de lluvia (mm/año)	1,18	1,15
Nº días lluvia por año	66,4	62,20
Nº Días con P > 2 mm/día por año	39,9	38,00
Nº Días con P > 10 mm/día por año	13,4	12,40
Nº Días con P > 20 mm/día por año	3,8	4,10

Tabla 7: Estadísticos descriptivos de las series de precipitación diaria de las estaciones pluviométricas tratadas.

De la Tabla 7 se deduce que la pluviometría total anual se registra en menos del 20% de días del año, es decir, un número muy reducido de días. Este número queda comprendido entre 62 (Jimena) y 66 (Jódar) días.

La intensidad media de las precipitaciones diarias, resultante de dividir la precipitación total por el número total de días de lluvia, es muy similar. Está comprendida entre 6,2 mm/día (Jódar) y 6,5 mm/día (Jimena).

El número medio de días al año, en que la intensidad de la precipitación es mayor de 2 mm/año, es de 39 y está comprendido entre 40 y 38 días en las estaciones de Jódar y Jimena, respectivamente. El número medio de días se reduce al considerar

precipitaciones diarias más intensas, siendo los valores medios de 13 y 4 días para intensidades de precipitación mayor a 10 y 20 mm, respectivamente.

La intensidad de precipitación máxima diaria en el periodo considerado fue de 81,5 mm/día el 30/05/1997, medidos en el observatorio de Jimena, seguida de 55 mm/día el 11/09/1996, en el de Jódar.

Estos resultados indican que son poco numerosos los eventos lluviosos de relativa importancia a lo largo del año, cuestión de especial importancia en el proceso de recarga de los acuíferos carbonáticos en el ámbito mediterráneo. Este hecho evidencia la importancia que tiene en la recarga de estos acuíferos el reducido número de días en los que se reparte el total pluviométrico anual, la intensidad de la lluvia y el estado de saturación de suelo (Martos-Rosillo et al., 2013). En el ámbito de la zona investigada las precipitaciones con intensidades superiores a 10 mm/día suponen una lluvia del orden de 165 a 175 mm/año.

4.8.2 Temperatura

En el área estudiada, las estaciones meteorológicas en las que se disponen de datos de temperatura del aire son escasas y, además, los datos registrados de temperaturas son reducidos en el periodo escogido (01/01/1991 a 31/12/2012). En la Tabla 8 se resumen los datos de cada estación (código, denominación, coordenadas, cota, periodo de registro y años completos), mientras que la situación de estas puede observarse en la Figura 16.

Código Estación	Denominación	Cota (m.s.n.m)	Periodo de registro	Nº de años completos	X (UTM)	Y (UTM)	Fuente
7	MANCHA REAL	436	2000-2012	8	447686	4196913	JUNTA DE ANDALUCIA
8	ÚBEDA	358	2000-2012	8	473694	4199725	JUNTA DE ANDALUCIA
103	JÓDAR	488	2006-2012	0	470716	4192610	JUNTA DE ANDALUCIA
5139	UBEDA (PROPIOS DEL GUADIANA)	420	1965-1990	24	479065	4192967	AEMET
5152	UBEDA SERRANO	400	1968-1982	13	474671	4193904	AEMET
5154	JODAR (C.DE A.)	627	1953-1983	6	468789	4188685	AEMET
5154A	JÓDAR	660	1952-2000	28	469035	4189115	AEMET
5159I	PANTANO DE PEDRO MARIN	310	1973-1998	17	463761	4195763	AEMET
5163	JIMENA	590	1950-2011	55	458034	4188424	AEMET
5165X	TORRES (AUTOMÁTICA THIES)	910	2008-2011	1	450515	4181840	AEMET
5166I	BAEZA (LAS ESCUELAS)	535	1989-1993	1	454997	4191831	AEMET
5264B	MANCHA REAL SEA	765	1967-1996	23	446338	4182790	AEMET

Tabla 8: Estaciones termométricas utilizadas. En negrita se resaltan las estaciones elegidas.

La selección de las estaciones consideradas se ha basado en el análisis de la información disponible (Figura 20).

Ninguna de las estaciones disponibles abarca un periodo suficiente para la obtención de información coherente, por lo que se ha utilizado la agrupación de los datos térmicos de la estación Jódar (5154A), correspondiente a la AEMET y la de los datos de la estación agroclimática de Jódar (103).

El método utilizado para completar la serie de esta estación unificada se ha realizado mediante duplicación del año media para el periodo del 2/10/2002 al 5/4/2006, en donde hay una ausencia de datos. El completado para lagunas menores a dos meses se ha hecho con los datos del año consecutivo, en el mismo periodo de tiempo.

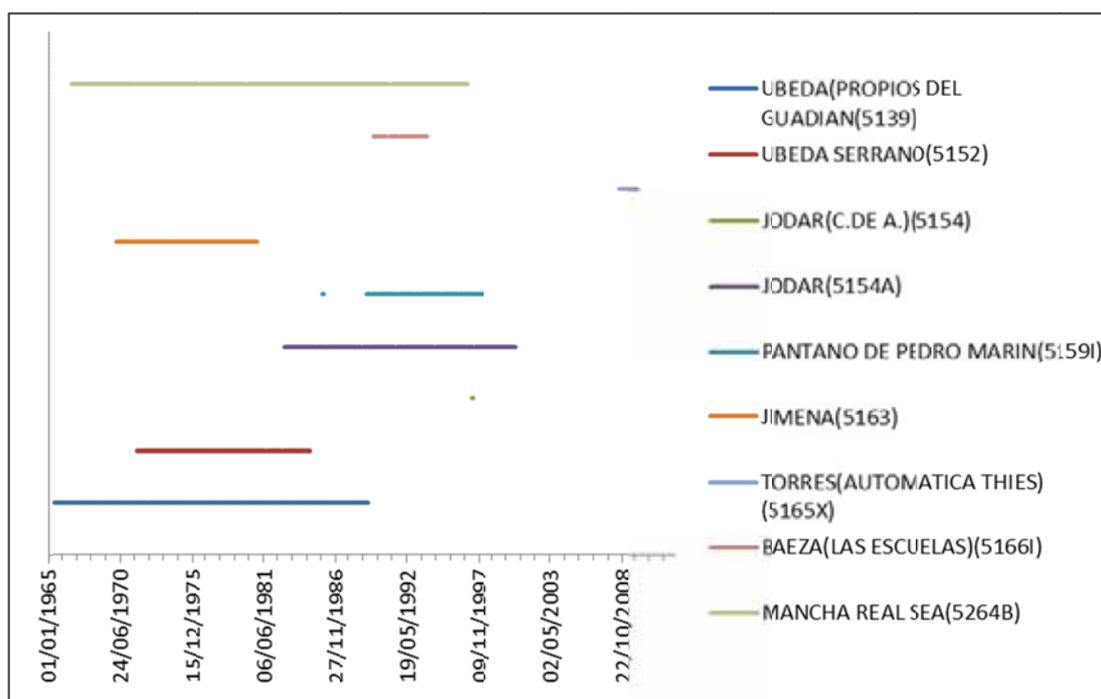


Figura 20: Comparación espacio-temporal estaciones meteorológicas.

La serie de temperatura media anual completada y depurada, juntos con algunos datos estadísticos significativos, se muestra en la Tabla 9. Dicha serie se ha generado mediante la agrupación de los datos diarios de la misma. Los valores que aparecen en **negrita** corresponden a aquellos años en los que ha sido necesario completar más de dos meses.

La temperatura media anual de la estación de Jódar es de 17,15 °C, con un máximo de 18,5°C en 2006 y un mínimo de 16,3 °C, en 2007.

Año	Jódar
1991	17,96
1992	17,98
1993	16,85
1994	17,54
1995	18,29
1996	16,48

1997	17,26
1998	16,45
1999	16,45
2000	17,06
2001	17,26
2002	17,26
2003	17,26
2004	17,23
2005	17,26
2006	18,46
2007	16,33
2008	16,38
2009	17,01
2010	16,62
2011	17,27
2012	16,64
<hr/>	
Media	17,15
Desviación estándar	0,62
Mediana	17,24
Mín.	16,33
Máx.	18,46

Tabla 9. Series de temperatura media anual (°C) completadas y corregidas y estadísticos descriptivos.

Los principales estadísticos descriptivos de los datos de temperatura máxima, media y mínima diaria de la estación de Jódar se resumen en la Tabla 10, en la que se comprueba que la media de temperatura máxima diaria es de 22,2 °C, la media diaria es de 17,15°C y la media de la mínima diaria es de 12,2°C.

	T máx	T med	T mín
Media	22,19	17,15	12,24
Desviación estándar	8,37	7,14	6,22
Coef. Variación	0,38	0,42	0,51
Mediana	21,40	16,50	12,00
Mín	1,9	-0,2	-6,60
Máx	43,2	35,1	30,00
Coef. Asimetría	0,2	0,19	0,06

Tabla 10: Estadísticos descriptivos de temperatura máxima, media y mínima diaria (°C) de la estación de Jódar.

La desviación estándar de las temperaturas máximas es menor que la de las mínimas, hecho que suele atribuirse a la menor variabilidad térmica que se produce durante la noche, cuando se registran los valores mínimos, frente a la mayor variabilidad que de la radiación solar por la nubosidad, durante el día, en el periodo en el que se registran los valores máximos (Martos-Rosillo, 2008).

Respecto a los coeficientes de asimetría, se observan valores muy bajos (igual o menores a 0,2) y son de signo positivo, lo que indica un desplazamiento preferente hacia valores superiores a su promedio.

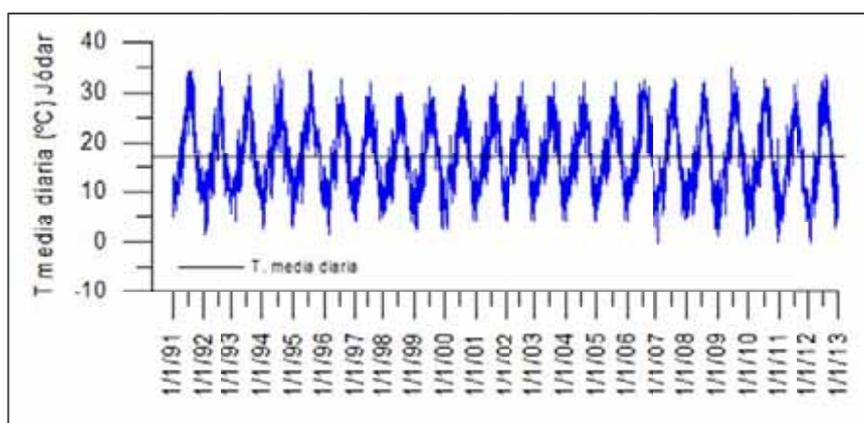


Figura 21: Evolución de la temperatura media diaria.

Por último, en la Figura 21 se muestra la evolución de la temperatura media diaria en la estación de Jódar. Se refleja una acusada amplitud térmica anual de las temperaturas medias diarias (34,9 ° C). Los valores máximos de la amplitud térmica diaria se miden en verano, fechas en la que es frecuente que esos valores sean mayores de 22 °C.

4.8.3 Evapotranspiración potencial

La estimación de la evapotranspiración de referencia o potencial (ET_o) se ha calculado mediante la expresión de Hargreaves (1994), con datos de temperatura máxima y mínima diaria la estación de Jódar. Se ha utilizado el código TRASERO 2.1.0 (Padilla y Delgado, 2011), desarrollado por el departamento del Ciclo Hídrico de la Excm. Diputación de Alicante, aplicando un valor del coeficiente KT de 0,15.

En la Tabla 11 se muestran los principales estadísticos de posición de las series de evapotranspiración diaria y anual.

	Anual	Diaria
Media	1046,2	2,9
Desviación estándar	106,4	1,7
Coef. Variación	0,1	0,6
Mediana	1020,2	2,6
Min	923,7	0
Máx	1214,3	7,7
Coef. Asimetría	0,44	0,45

Tabla 11: Estadísticos descriptivos de la evapotranspiración de referencia anual (mm/años) y diaria (mm/día).

La evapotranspiración potencial media diaria es de 2,9 mm. El promedio de ET_o media anual es de 1046 mm/año. Estos resultados son coherentes con los mapas de ET_o de Andalucía realizados por Vanderlinden (2002), en los que no fueron considerados los observatorios que se tratan en esta investigación.

En la Tabla 12 se muestran los estadísticos descriptivos de la ET_o anual, calculados con las expresiones de Thornthwaite, Penman y Hargreaves. Esta comparación se ha realizado en el periodo comprendido entre 2007 y 2012, periodo en el cual se tienen resultados mediante todas expresiones.

La ETO calculada por el método de Penman ha sido obtenida mediante el volcado de datos procedentes de la estación meteorológica de Jódar (nº103), perteneciente a la red de estaciones agroclimáticas de la Junta de Andalucía.

	Thornthwaite	Hargreaves	Hargreaves 0,15	Penman
Media	906,3	1274,5	1180,1	1134,6
D.E	24,3	31,8	29,4	27,8
C.Var	0	0	0	0
Mediana	913,6	1277,2	1182,5	1122,9
Min	875,5	1236,8	1145,2	1112,1
Máx	933,1	1311,5	1214,3	1186,8

Tabla 12. Estadísticos descriptivos de la evapotranspiración de referencia anual (mm/año) calculados mediante las expresiones Thornthwaite, Hargreaves, Hargreaves con coeficiente de corrección y Penman.

La comparación de los valores de ETo que resultan de aplicar la expresión propuesta por Hargreaves son muy similares a los obtenidos con la ecuación de Penman-Monteih, si bien, lo obtenidos por la fórmula de Hargreaves subestiman los que se obtienen con Penman, sin embargo al aplicar el factor de corrección la similitud es muy alta.

Los valores que resultan de aplicar las ecuaciones de Thornthwaite y Hargreaves ponen de manifiesto que existen entre ellas considerables diferencias respecto a los valores obtenidos por el método Penman, aspecto que ya ha sido comentado por otros autores tanto a nivel global (Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998) como a nivel regional (Vanderlinden et al., 2004; Gavilán et al., 2005).

4.8.4 Lluvia Útil y Evapotranspiración real

En esta investigación se ha realizado el balance de agua en el suelo en acuífero carbonático de Bedmar-Jódar con el modelo propuesto por Thornthwaite y Mather (1955), aplicado a los datos meteorológicos de los observatorios de Jimena y Jódar. Se han realizado distintos balances tomando una amplia gama de diferentes valores de reserva útil (RU) o capacidad de retención de agua en el suelo (CRAS): 10, 20, 30, 40, 60, 80 y 100 mm.

En las Tablas 13 y 14 se resumen los estadísticos descriptivos de las series de lluvia útil (LLU) y de evapotranspiración real (ETR) anual que resultan de aplicar el modelo.

La lluvia útil media anual está comprendida entre 57 mm/año (con una RU de 100 mm) y 209 mm/año (con una RU de 10 mm) cuando se consideran los datos meteorológicos de Jódar. En el caso del observatorio de Jimena, la lluvia útil que resulta está comprendida entre 216 mm/año (con una RU de 100 mm) y 63 mm/año (con una RU de 10 mm).

	Media	Desviación estándar	Coef. Variación	Mediana	Mín	Máx	C.Asi	Curtosis	Coef. Recarga
Precipitación									
P	413	180	0	352	233	959	1,84	3,37	
Evapotranspiración potencial									
ETP	1046	106	0	1020	924	1214	0,44	-1,49	
Lluvia Útil									
LLU 10	216	158	1	149	63	664	1,73	2,7	0,52
LLU 20	161	153	1	103	17	596	1,79	2,9	0,39
LLU 30	132	149	1	72	0	557	1,85	3,07	0,32
LLU 40	110	143	1	51	0	527	1,91	3,32	0,27
LLU 60	86	133	2	21	0	494	2,04	3,94	0,21
LLU 80	72	126	2	6	0	474	2,18	4,65	0,18
LLU 100	63	117	2	0	0	454	2,35	5,65	0,15
Evapotranspiración real									
ETR 10	198	35	0	198	131	294	0,52	1,77	
ETR 20	251	44	0	253	170	362	0,39	0,97	
ETR 30	280	51	0	282	195	401	0,25	0,29	
ETR 40	302	58	0	308	197	431	0,03	-0,07	
ETR 60	325	69	0	334	197	464	-0,13	-0,55	
ETR 80	337	79	0	354	197	484	-0,1	-0,85	
ETR 100	346	88	0	358	197	504	0,05	-0,9	

Tabla 13: Estadísticos descriptivos de la lluvia útil y de la evapotranspiración real anual (mm/año) de la estación de Jimena, calculados para el periodo 1991-2012.

	Media	Desviación estándar	Coef. Variación	Mediana	Mín	Máx	C.Asi	Curtosis	Coef. Recarga
Precipitación									
P	415	167	0	384	179	852	1,29	1,62	
Evapotranspiración potencial									
ETP	1046	106	0	1020	924	1214	0,44	-1,49	
Lluvia Útil									
LLU 10	209	143	1	166	50	642	1,67	3,09	0,5
LLU 20	156	138	1	112	10	581	1,82	3,56	0,38
LLU 30	127	132	1	83	0	541	1,96	3,89	0,31
LLU 40	108	127	1	71	0	501	1,99	3,76	0,26
LLU 60	84	119	1	39	0	449	2,02	3,79	0,2
LLU 80	67	110	2	11	0	409	2,12	4,09	0,16
LLU 100	57	100	2	0	0	378	2,25	4,85	0,14
Evapotranspiración real									
ETR 10	206	40	0	208	126	304	0,15	0,69	
ETR 20	259	46	0	265	165	369	0,11	0,62	
ETR 30	287	52	0	287	174	399	-0,22	0,4	
ETR 40	306	57	0	308	174	409	-0,59	0,28	
ETR 60	329	69	0	331	174	429	-0,62	0,07	
ETR 80	345	78	0	347	174	468	-0,51	-0,02	
ETR 100	355	85	0	356	174	504	-0,37	-0,06	

Tabla 14: Estadísticos descriptivos de la recarga y de la evapotranspiración real anual (mm/año) de la estación de Jódar, calculados para el periodo 1991-2012.

En la Figura 22 se resume la influencia de la capacidad de retención de agua en el suelo en el promedio de la lluvia útil y de la evapotranspiración real, en los dos observatorios considerados.

La evapotranspiración real es siempre mayor que la lluvia útil, con excepción de la serie de lluvia útil con un valor de la CRAS de 20 mm; superior en la estación de Jimena y muy similar en el observatorio de Jódar. La diferencia entre ambos componentes del balance de agua se hace mayor conforme aumenta la capacidad de almacenamiento del suelo.

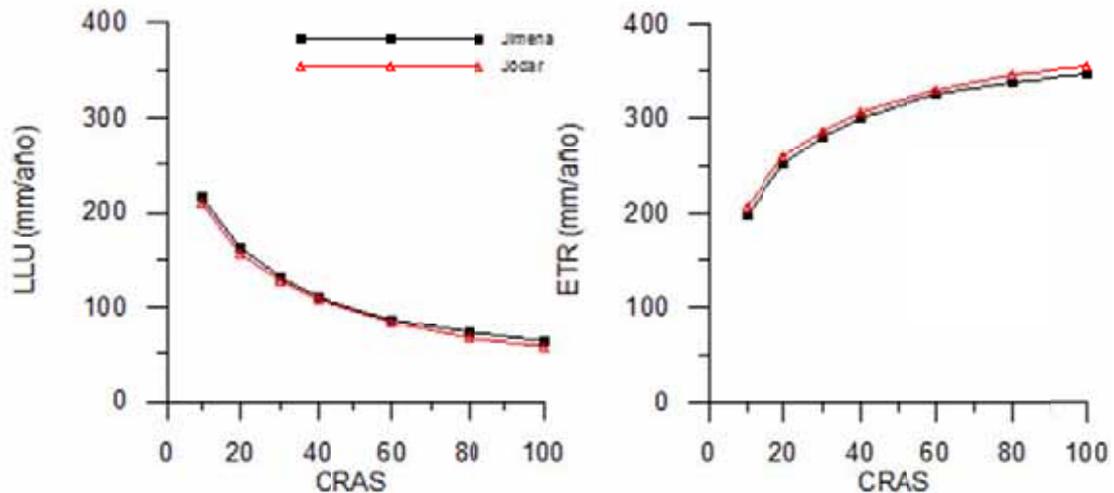


Figura 22: Influencia de la capacidad de retención de agua en el suelo en el promedio de la lluvia útil y la evapotranspiración real, en los observatorios de Jimena y Jódar.

En la Figura 22 se muestra que el aumento de la capacidad de almacenamiento de los suelos disminuye la lluvia útil. Por otro lado, la disminución más acusada de la lluvia útil se produce en el intervalo $10 \text{ mm} < \text{CRAS} < 40 \text{ mm}$, que es, precisamente, el intervalo más frecuente en suelos asociados a materiales carbonáticos (Sauter, 1993; Lambán, 1998). En ese mismo intervalo, la lluvia útil está comprendida entre 216 mm/año, que corresponden a un valor de la CRAS de 10 mm, en el observatorio de Jódar, y 108 mm/año, correspondientes a un valor de la CRAS de 40 mm en el observatorio de Jimena, lo que supone unos coeficientes de recarga medios de 0,28, en la estación de Jódar, y 0,29, en Jimena, en el supuesto de que toda la lluvia útil se transformase en recarga al acuífero.

4.8.5 Cálculo de la recarga natural del acuífero de Bedmar

En el modelo conceptual de recarga se considera que la recarga se produce por la infiltración de agua de lluvia que alcanza la superficie de los afloramientos carbonáticos cretácicos y miocenos.

La alta capacidad de infiltración de estos materiales se manifiesta en la ausencia de una red fluvial desarrollada sobre los mismos. En este sentido, sobre los afloramientos de margas y margocalizas el agua de lluvia escurre superficialmente y da lugar a pequeños arroyos de carácter temporal.

La inexistencia de aportes externos de escorrentía superficial que discurran sobre los materiales permeables que forman el acuífero impide la recarga por esta vía.

Por otro lado, las características geométricas y estructurales del acuífero, que definen unos límites de flujo concretos, formados por margas del Mioceno y materiales arcillosos triásicos, impide la transferencia lateral de recursos hídricos subterráneos procedentes de otros acuíferos.

Por último, debido a la actual situación hidrodinámica del acuífero, con su nivel piezométrico considerablemente por debajo de la cota de drenaje de los principales manantiales, se considera que toda la superficie de afloramientos permeables forma parte del área de recarga del acuífero.

4.8.5.1 Método APLIS (v.2)

La aplicación de la expresión matemática del método APLIS (v.2) (Andreo et al., 2004) ha permitido obtener el mapa de tasa de recarga de la Figura 23.

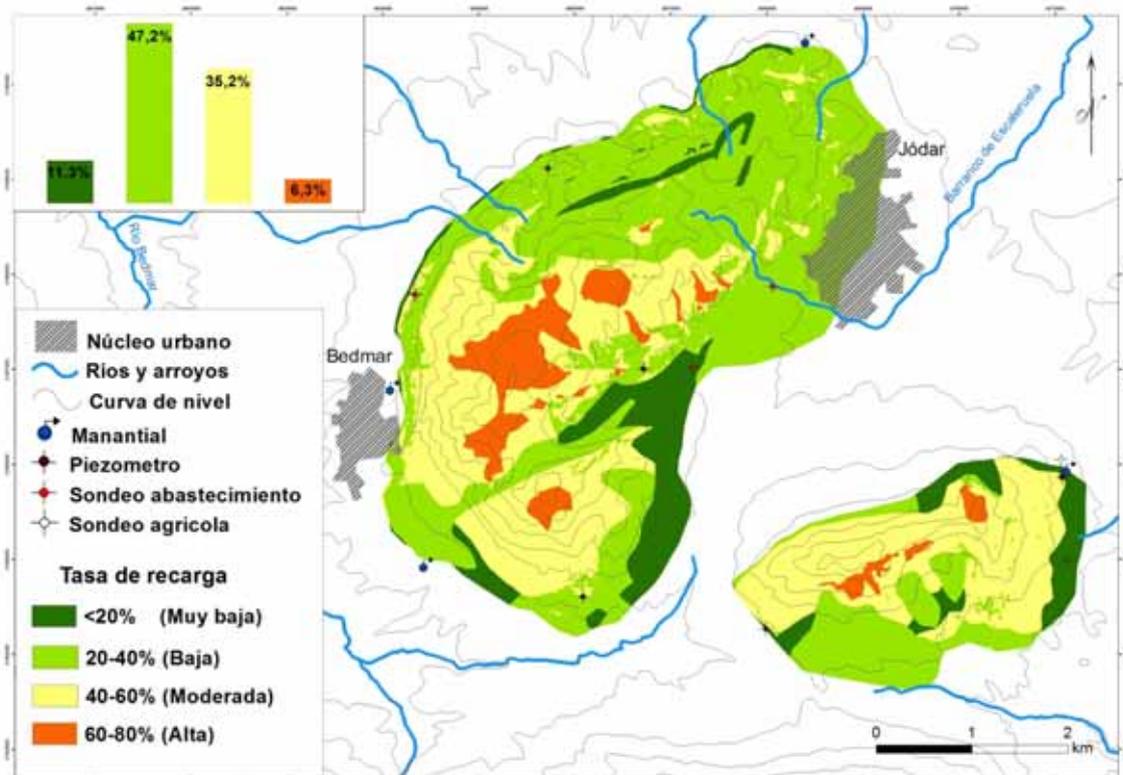


Figura 23. Distribución de la tasa de recarga en el acuífero de Bedmar-Jódar-La Golondrina.

Se comprueba que el método APLIS permite obtener un mapa de distribución espacial de la tasa de infiltración del acuífero en él se identifican de forma clara las principales zonas de recarga. Estas zonas más favorables para la recarga natural suelen coincidir con superficies prácticamente planas en las que abundan las formas exokársticas.

La tasa de recarga media calculada con método APLIS modificado es del 36%. Si entramos en detalle, la mayor parte del acuífero (47,2% de la superficie) presenta una tasa de recarga Baja (entre 20 y 40% de la precipitación). Las zonas con mayor tasa de recarga (clase Alta), ocupan un porcentaje reducido de la superficie (6,3%). Estas zonas coinciden con zonas de absorción preferencial, como lapiaces y dolinas, que se encuentran a mayor altitud y que presentan una menor pendiente, características óptimas para que la recarga sea mayor. La variable I del método

(formas de infiltración preferencial) tienen un peso importante, siendo prácticamente determinante, aunque no lo suficiente para incrementar la tasa de recarga hasta el 80% (clase Muy Alta).

La precipitación media es de 415 (mm/año). Su combinación con el porcentaje medio de recarga da lugar a una tasa de recarga anual de 156 mm. Esta tasa unida a una superficie de afloramientos carbonáticos de 17 km² implica una recarga media anual de 2.54 hm³/año.

4.8.5.2 Método del balance de agua en el suelo (BAS)

La recarga media anual obtenida por este método está comprendida entre 156 mm/año (con una RU de 20 mm) y 108 mm/año (con una RU de 40 mm) cuando se consideran los datos meteorológicos de la estación de Jódar. Estas tasas de recarga supondrían unas entradas del orden de 1,8-2,6 hm³/año. En la tabla 15 se resumen los estadísticos descriptivos de las series diarias de recarga que resultan tras aplicar un BAS con una reserva útil de 20 y de 40 mm.

	Media	Desviación estándar	Coef. Variación	Mediana	Mín	Máx	C.Asi	Curtosis	Coef. Recarga
Precipitación									
P	415	167	0	384	179	852	1,29	1,62	
Recarga									
LLU 20	156	138	1	112	10	581	1,82	3,56	0,38
LLU 30	127	132	1	83	0	541	1,96	3,89	0,31
LLU 40	108	127	1	71	0	501	1,99	3,76	0,26

Tabla 15. Estadísticos descriptivos de la recarga y de la evapotranspiración real anual (mm/año) de la estación de Jódar, correspondientes al periodo 1991-2012.

4.9 Usos, demandas y consumos de agua.

La explotación del agua del acuífero Bedmar-Jódar es de vital importancia para los municipios de Bedmar y Jódar.

El principal uso, si consideramos el volumen extraído, es el abastecimiento urbano de Jódar. Este supone un volumen anual medio de 1,1 hm³/año de los sondeos Serrezuela (203760001), El Portillo (201820036), La Lancha (20380037) y Fuente Vieja (203830013). En el caso de Bedmar, la explotación en años de pluviometría media es anecdótica ya que el sondeo de Cuevas Negras II (203820027) solamente funciona para el mantenimiento del propio equipo de bombeo unos pocos minutos al mes.

En cuanto a las concesiones para regadío, mayormente para el riego de olivar, el volumen otorgado según el proyecto ALBERCA de la CHG es de 0,58 hm³/año para sondeos que se concentran en su mayoría en la zona de la Golondrina. Además, en dicha zona existe un sondeo denominado Fuente Vieja II (203830013) perteneciente al Ayuntamiento de Jódar cuya explotación ha podido calcularse en CHG-IGME (2014) y supone entre 0,21 y 0,25 hm³/año. Estos datos, sumados suponen unos 0,8 hm³/año de explotación total para regadío (IGME-CHG, 2015).

Por lo tanto, la explotación total por bombeo del acuífero se estima en 1,9 hm³/año.

4.10 Balance hídrico

El balance de agua del acuífero, para una precipitación media calculada de 415 mm/año, es el siguiente:

ENTRADAS		
	Según APLIS	2,54 hm ³ /año
	Según BAS	1,8-2,6 hm ³ /año
SALIDAS		
	BOMBEO	1,9 hm ³ /año
	DRENAJE NATURAL	0,24 hm ³ /año
	TOTAL	2,14 hm ³ /año
DÉFICIT		entre -0,34 y +0,46 hm ³ /año

Este balance, con un déficit positivo o negativo en función del coeficiente de infiltración considerado en el cálculo de la recarga natural presenta un equilibrio que, si observamos la evolución piezométrica es irreal por lo que cabe pensar que las extracciones por bombeo superan en gran medida las concesiones otorgadas.

5 AGUA DE RECARGA

Para la realización de una eventual recarga artificial en el acuífero de Bedmar-Jódar, la opción considerada como más viable en estudios anteriores ha sido la del agua excedentaria de los manantiales de Sistillo, de la vecina masa de agua subterránea de Almadén-Carluco.

Los recursos de esa MASb suponen, según el balance contemplado en el Plan Hidrológico actualmente vigente son de 6 hm³/año. Gran parte de esos recursos se drenan por los mencionados manantiales de los que el denominado Sistillo II (203820004) es utilizado para el abastecimiento a Bedmar y el Sistillo I (203820005) para regadío, además de representar el punto más importante en el mantenimiento, con diferencia, del caudal del río Cuadros.

Este último manantial pertenecía a la red de control del IGME por lo que se dispone de un registro de caudales desde 1983 hasta 2001, fecha en que dicha red dejó de ser controlada por ese organismo, y desde 2004 a 2006 con caudales aforados por la CHG. En este proyecto se han realizado dos aforos, uno en aguas altas (03/04/2014) y otro en aguas bajas (16/10/2014) con caudales de 371 l/s y 91 l/s, respectivamente. Los valores de caudal aforados se han representado en la figura 24. Como se puede observar, el manantial tiene unos picos de caudal significativos con caudales que han llegado a alcanzar los 2.800 l/s y periodos en los que está prácticamente seco.

Con estos registros, cuya continuidad no es completa, se han podido estimar los volúmenes drenados que se presentan en la tabla 16.

Año hidrológico	Volumen aforado (hm ³ /año)
1985-86	11,12
1986-87	5,29
1988-89	9,24
1992-93	7,20
2004-05	9,29
2005-06	4,71

Tabla 16: Volúmenes aforados en el manantial de Sistillo I

Al respecto de la calidad química del agua, el manantial de Sistillo I presenta una facies bicarbonatada cálcica con conductividades muy variables según la época del año entre 421 y 1.423 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los principales parámetros analizados procedentes de la base de datos histórica del IGME se incluyen en los Anexos y en la tabla 17 se presentan los estadísticos principales.

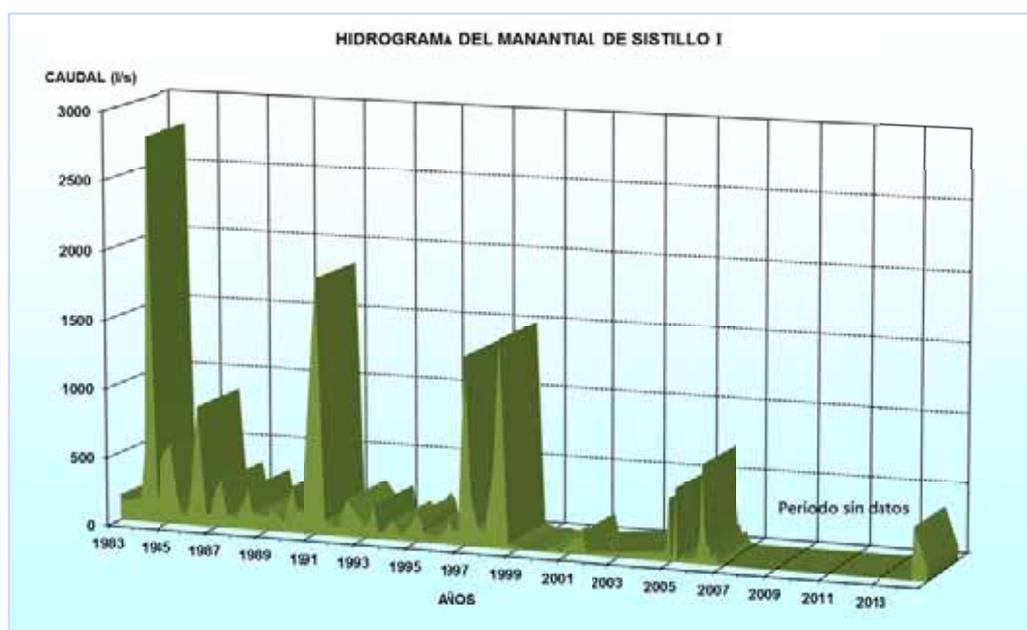


Figura 24: Hidrograma del manantial de Sistillo I

Parámetro	Ud.	Media	Máximo	Mínimo
Cl	(mg/L)	155,2	340	28
SO ₄	(mg/L)	59,9	112	7
HCO ₃	(mg/L)	223,7	900	106
CO ₃	(mg/L)	0,9	7	0
NO ₃	(mg/L)	3,6	15	0
Na	(mg/L)	98,3	238	2
Mg	(mg/L)	16,7	28	5
Ca	(mg/L)	70,0	93	43
K	(mg/L)	1,7	8	0
PH		7,9	8,23	7,4
C.E. (20°C)	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	851,1	1423	421

DQO	(mg/L O2)	0,9	2,5	0
NO2	(mg/L)	0,0	0,05	0
NH4	(mg/L)	0,0	0,81	0
SiO2	(mg/L)	5,5	18	0
PO4	(mg/L)	0,0	0,01	0

Tabla 17: Principales parámetros analizados en el manantial Sistillo II

6 PROPUESTA DE RECARGA ARTIFICIAL

6.1 Captación

Como se ha indicado anteriormente, el agua para una eventual recarga artificial del acuífero de Bedmar-Jódar podría proceder del manantial de Sistillo II situado a una cota en torno a 650 m s.n.m. Es destacable que existe una toma de acequia en las proximidades de la surgencia que conduce el agua a las balsas de riego existentes en el valle del río Cuadros a cotas 611 y 633 m s.n.m. El caudal que puede circular por esa acequia se estima, según las observaciones y aforos realizados, en 100 l/s y podría usarse en los periodos en que las balsas están llenas y no se riega, que muy probablemente coincidan con los de aumentos significativos de caudal del manantial como respuesta a precipitaciones anormalmente altas.

6.2 Zonas de recarga

Siguiendo la línea indicada en SGOP (1991) ampliada con las observaciones llevadas a cabo en el presente proyecto, las zonas para la realización de una posible recarga artificial serían las siguientes:

1. Norte de la carretera de Bedmar, entre los p.k. 32 y 33. Aquí existe un sondeo (Bedmar I) en el que el ensayo de bombeo realizado en la fecha de su construcción indicaba buenas perspectivas en cuanto a caudales admisibles (SGOP, 1993).
2. Zona de Carratraca, entre el sondeo de Carratraca (203760021) y el de Pollo Valero (203760015).
3. Camino del Portillo, cerca de Jódar. En esta zona se perforó el sondeo Jodar I y el ensayo de bombeo no indicaba una capacidad de admisión significativa. No obstante, sería interesante la investigación en esa zona debido a su posición más centrada en el acuífero.
4. Zona del puerto entre el cruce de Bedmar y Jodar. En esta zona, no investigada mediante sondeos mecánicos, podría tener interesantes posibilidades ya que está situada entre los afloramientos de la Serrezuela y La Golondrina y, por lo tanto, centrada en el acuífero y más próxima a una zona de importantes extracciones que estaría previsiblemente vacía después de la campaña de riego, lo que facilitaría el llenado.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este informe debe considerarse como una primera fase y ha supuesto un gran avance en lo referido a la mejora del conocimiento geológico, definición de estructura y geometría a través de las campañas de prospección geofísica, definición de parámetros hidráulicos, mejora del balance hídrico, etc. No obstante, se considera imprescindible para evaluar la posible recarga artificial como elemento de gestión, proceder a evaluar la capacidad de admisión de agua en el acuífero mediante ensayos reales. Esto requerirá la realización previa de una infraestructura de transporte, almacenamiento intermedio, decantadores, sondeos de inyección y control, entre otros aspectos, que de considerarse de interés por parte de la administración hidráulica, podrían abordarse en una segunda fase.

La investigación realizada apoya la idea de que los afloramientos de las serrezuelas de Bedmar y Jódar y el de La Golondrina funcionan como un único acuífero. Esto se apoya en los datos aportados por la piezometría, prospección geofísica, geología e hidroquímica.

El valor medio de la porosidad abierta de los materiales acuíferos es de 5,17% con un máximo del 14% en los niveles de calcarenitas.

La transmisividad presenta valores del orden de entre 1.000 y 6.640 m²/día pero puntualmente se han calculado mínimos de del orden de 6 m²/día, lo que da una idea de la heterogeneidad de este tipo de acuíferos.

La recarga natural por infiltración de la precipitación sobre los 17 km² de superficie de afloramiento calculada es de entre 1,8 y 2,6 hm³/año.

El principal uso del agua subterránea es el abastecimiento al municipio de Jódar (1,1 hm³/año). En el caso de Bedmar, se limita a los periodos en los que el caudal de los manantiales de Sistillo disminuyen significativamente.

Las concesiones administrativas para las extracciones en el acuífero se cumplen en lo que se refiere al abastecimiento (Jódar) y es muy probable que en el caso de los sondeos para regadío, las extracciones sean muy superiores a las autorizadas, lo que se refleja en la evolución piezométrica del acuífero.

Al respecto de la sostenibilidad del uso de este acuífero, parece recomendable proceder a una evaluación real de la explotación para regadío así como incrementar el control de las extracciones de aguas subterráneas. Asimismo, se recomienda continuar con el control piezométrico y ampliar el conocimiento para la elaboración de un modelo geológico 3D que sería tomado como base para un modelo de flujo. Esta herramienta permitirá una mejor gestión de los recursos hídricos del acuífero.

Finalmente, de llevarse a cabo las operaciones de recarga como una herramienta de gestión para el futuro del acuífero, cambiaría sustancialmente la situación del mismo, que en la actualidad podría considerarse como sobreexplotado, pudiendo pasar a acuífero en buen estado y garantizar para el futuro los abastecimientos y los regadíos de la zona.

8 REFERENCIAS

Álvaro López, M., Hernández Samaniego, A., y del Olmo Zamora, P. (1992): Mapa Geológico de España 1:50.000, Hoja nº 948 (Torres). IGME, Madrid.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56, Roma.

Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J. A., Carrasco, F., Durán, J. J. y Jiménez, P. (2004). Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero*, 115(2), 177-186.

CHG-IGME (2001). *Norma de explotación de la unidad hidrogeológica 05.14 (Bedmar-Jódar)*

Gavilán, P., Tornero, S., Lorite, I. y Berengena, J. 2005. Precisión de la ecuación de Hargreaves en el Sur de España. VI *Simposio del Agua en Andalucía*, 227-236.

González-Hernández L, González-Ramón A (2002) Los acuíferos de Bemar-Jódar y Torres-Jimena. In: Lopez-Geta J, Rubio-Campos J (eds) *Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardenete*: 245-251.

IGME-CHG (2015): "Recomendaciones para la explotación sostenible de la Masa de Agua Subterránea 05.14 Bedmar-Jódar". Proyecto: Investigación hidrogeológica sobre Masas de Aguas Subterráneas con problemas de explotación en la Cuenca del Guadalquivir. Propuesta de uso sostenible (Alto Guadalquivir). 2014-2015. Fase 1.

IGME-Diputación Provincial de Jaén (2012): "Atlas Hidrogeológico de la provincia de Jaén".

INE (2015): Nomenclátor. Población del Padrón continuo por Unidad Poblacional. Instituto Nacional de Estadística. Página web: <http://www.ine.es/nomen2/index.do>.

ITGE-DPJ (1997). *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Jaén*. Diputación de Jaén-ITGE, 1997. Jaén

Jensen, M. E., Burman, R. D. y Allen, R. G. 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. American Society of Civil Engineers, New York, 360 pp.

Lambán, L. J. 1998. *Estudio de la recarga y del funcionamiento hidrogeológico de la Unidad de Anoia (Cordillera Prelitoral Catalana)*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 300 pp.

Martos-Rosillo, S. 2005. *Contribución al conocimiento hidrogeológico del acuífero carbonático de la Sierra de Estepa (Sevilla)*. Trabajo de Investigación Tutelada. Universidad de Granada, Granada, 166 pp.

Martos-Rosillo, S (2008). *Investigación hidrogeológica orientada a la gestión racional de acuíferos carbonáticos sometidos a un uso intensivo del agua subterránea. El caso de la Sierra de Estepa (Sevilla)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 537 pp.

- Martos-Rosillo S, Rodríguez-Rodríguez M, Pedrera A, Cruz-Sanjulián J, Rubio J (2013). Groundwater recharge in semi-arid carbonate aquifers under intensive use: the Estepa Range aquifers (Seville, southern Spain). *Environmental Earth Sciences*: 1-16
- Padilla A y Delgado J (2011). *Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas*. Diputación Provincial de Alicante, Alicante.
- Peinado Parra, T, Lupiani Moreno, E, Rubio Campos, JC y Castillo Pérez, E (1989) Estado de explotación de los acuífero prebéticos de Bemar-Jódar y Castillo-La Ímora (Jaén). *La sobreexplotación de acuíferos*: 117-132. Almería
- Roldán , FJ, Lupiani, E y Villalobos, M (1992). *Mapa geológico de España 1:50.000, hoja nº 927 (Baeza)*. ITGE, Madrid.
- Sanz de Galdeano, C, García-Tortosa, FJ, Pelaez, JA (2013). Estructura del Prebético de Jaén. Sector de Bemar. Su relación con el avance del Subbético y con fallas en el basamento. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 26(1): 55-68.
- Sauter, M. (1993). *Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in karstic aquifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany)*. Universität Tübingen, pp.
- Scanlon BR, Healy RW, Cook PG (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 18-39
- SGOP (1991): "Estudio de los recursos hidráulicos para la recarga artificial del acuífero de Bedmar-Jódar. Jaén." Servicio Geológico de Obras Públicas. Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Informe Interno.
- SGOP (1993): "Sondeos de investigación hidrogeológica para el estudio de las zonas de recarga artificial del acuífero de Bedmar-Jódar (Jaén). Servicio Geológico de Obras Públicas. Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Informe Interno.
- Thornthwaite, C.W., and Mather, J.R. 1955. The water balance. *Publications in climatology, The Johns Hopkins University, Laboratory of Climatology* 9: 59-117.
- Vanderlinden, K. 2002. *Análisis de procesos hidrológicos a diferentes escalas espacio- temporales*. Universidad de Córdoba, Córdoba, 303 pp.
- Vanderlinden, K., Giráldez, J. V. y Van Mervenne, M. 2004. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265-267.

ANEXOS

ANEXO 1: ESTUDIO PETROGRÁFICO DE LAS MUESTRAS PERTENECIENTES AL
PREBÉTICO DE JAÉN, UNIDAD SIERRA DE JÓDAR

**ESTUDIO PETROGRÁFICO DE LAS MUESTRAS PERTENECIENTES AL
PREBÉTICO DE JAÉN, UNIDAD SIERRA DE JÓDAR**

Concepción Fernández Leyva

Instituto Geológico y Minero de España
Unidad de Granada
Julio 2015

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. TÉCNICAS DE ESTUDIO DE ROCAS CARBONATADAS:
PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y EQUIPO PETROGRÁFICO
3. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS PERTENECIENTES A LA ZONA DE
ESTUDIO
4. RESULTADOS
 - 4.1. Tabla de resultados
 - 4.2. Estudios petrográficos
5. CONCLUSIONES
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INTRODUCCIÓN

En el actual informe se recogen los estudios petrográficos para la caracterización de las microfacies en los afloramientos carbonatados de la Unidad Sierra de Jódar (Prebético Interno Septentrional) MAGNA nº 927 (Baeza). Está formada por materiales de edad cretácica, en facies fundamentalmente neríticas, con intercalaciones de arenas silíceas de tipo Facies Utrillas. El muestreo se ha llevado a cabo siguiendo el barranco del Perejil, en la Serrezuela de Bedmar. Se han tomado 21 muestras entre dolomías, calcarenitas y calizas, todas ellas cretácicas, y posteriormente se ha procedido a su clasificación de acuerdo a su mineralogía, textura, composición y parámetros físicos como la porosidad, según los esquemas de Dunham (1962) y Lucia (1999). Para tales determinaciones se ha utilizado un Microscopio Óptico de Polarización LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada.

2. TÉCNICAS DE ESTUDIO DE ROCAS CARBONATADAS: PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y EQUIPO PETROGRÁFICO

Existen ciertos **parámetros petrográficos** que resultan fundamentales para establecer las relaciones entre las características petrográficas y las propiedades físicas de las rocas. En cada una de las muestras estudiadas se han determinado los **cuatro componentes principales de la fábrica** propuestos por Dürrast and Siegesmund (1999) (Figura 1) que permite establecer la correlación entre la fábrica y las propiedades físicas de las rocas (Figura 2):

- (a) Constituyentes principales: aloquímicos/ortoquímicos
- (b) Espacio poroso y tipo de poros
- (c) Fracturas
- (d) Estilolitos

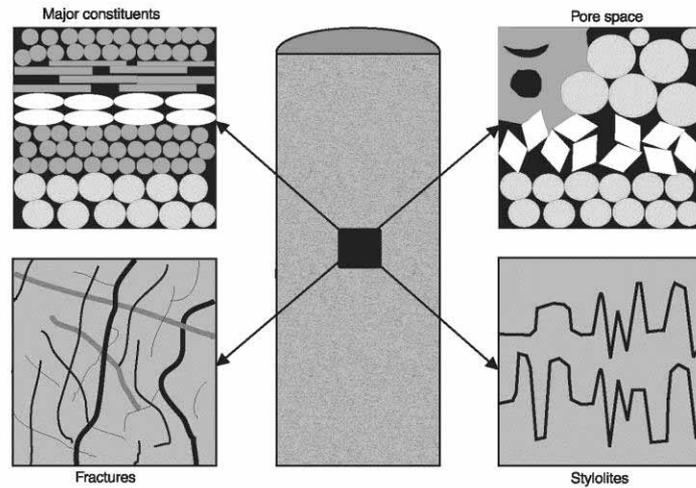


Figura 1. Elementos de la microfábrica en rocas carbonatadas según Dürrast and Siegesmund (1999)

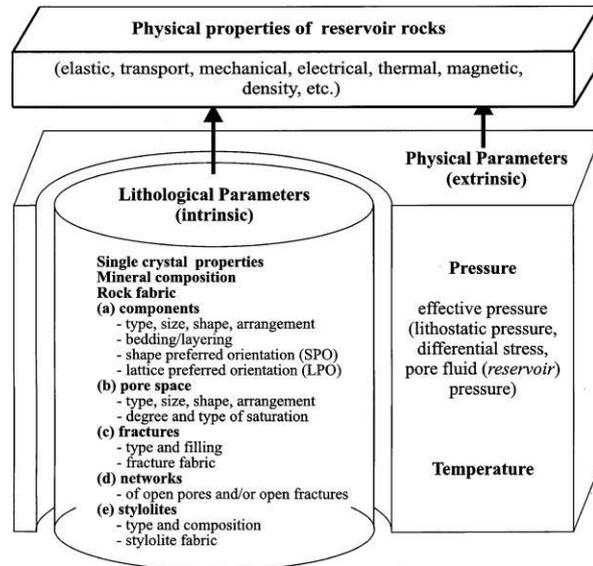


Figura 2. Factores que controlan las propiedades físicas de las rocas carbonatadas reservorio (Dürrast and Siegesmund, 1999).

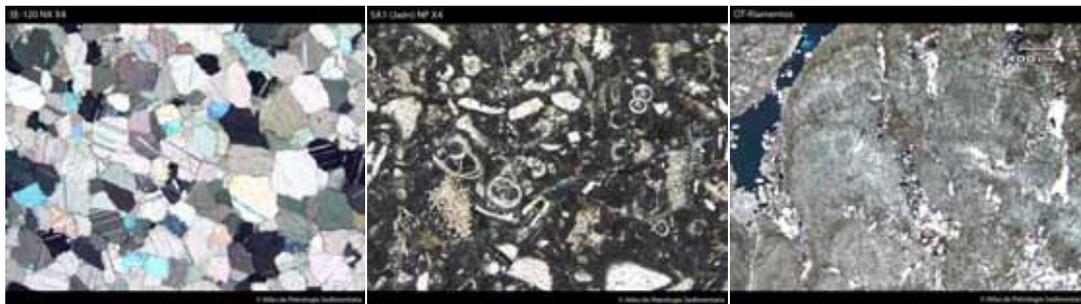
Previo al análisis de los diferentes **componentes texturales**, definiremos los tipos de fábrica que existen en este tipo de rocas:

TIPOS DE FÁBRICA

Fábrica cristalina (Fig. 3.a): constituida por cristales generados por procesos de precipitación directa, recristalización o reemplazamiento (calizas esparíticas, pseudoesparitas, dolomías cristalinas, etc.).

Fábrica clástica (Fig. 3.b): Es la constituida por clastos carbonáticos, tanto intracuencales como extracuencales. Este tipo de fábrica es la común de las calcarenitas, donde los clastos son granos carbonáticos intracuencales (IC). Las rocas detríticas integradas por granos carbonáticos extracuencales (EC) corresponden a sedarenitas calcilita (Folk, 1963).

Fábrica organógena (Fig. 3.c): Es la constituida por bioconstrucciones desarrolladas por organismos coloniales (arrecifes de coral, estromatolitos, etc.)



(a) Fábrica cristalina

(b) Fábrica clástica

(c) Fábrica organógena

Figura 3. Tipo de fábricas en rocas carbonatadas

(a) Constituyentes principales: aloquímicos/ortoquímicos

Los constituyentes principales en las rocas carbonatadas se agrupan en aloquímicos (intraclastos, ooides, granos esqueléticos y peloides) y ortoquímicos (matriz y cemento).

La asociación y distribución de los componentes en determinados lechos está controlado básicamente por la deposición y la sedimentación. Estos rasgos están caracterizados por su estructura y textura: variación en composición, tamaño, forma y orientación de las partículas y componentes, así como su empaquetamiento. Además, las asociaciones y la distribución de los componentes pueden ser modificadas por procesos secundarios.

En este estudio se ha realizado la determinación y caracterización de los elementos texturales en las diferentes muestras y se ha procedido a la clasificación de las mismas según el esquema propuesto por *Dunham (1962)* basado en la proporción relativa de los elementos texturales y diagenéticos en la roca (partículas, cemento, matriz y poros) así como las características de las partículas versus la matriz.

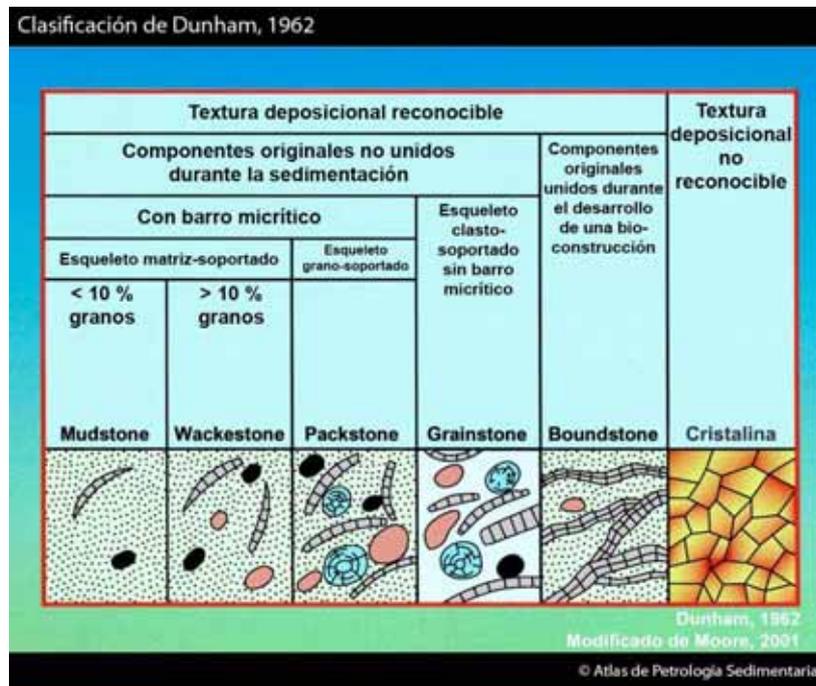


Figura 4: Clasificación de rocas carbonatadas según esquema propuesto por Dunham (1962)

Dunham (1962) distingue dos tipos generales de carbonatos (rocas y sedimentos carbonáticos): (1) los que presentan textura deposicional reconocible, y (2) los que presentan textura cristalina, no siendo posible reconocer la textura deposicional (Figura 4).

(b) Espacio poroso y tipos de poro

En este estudio se ha determinado igualmente la morfología y el tamaño medio de los poros. Como apuntábamos anteriormente, para tales determinaciones se ha utilizado un Microscopio Óptico de Polarización LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada. La observación se ha realizado con luz natural y polarizada mediante la técnica microscópica de transmisión.

El término **porosidad**, en sentido amplio, engloba distintos conceptos relacionados con los espacios vacíos: el **volumen poroso** (cuando se considera la porosidad como una

propiedad física) y el **sistema poroso** (atendiendo a la configuración de los espacios vacíos como un componente petrográfico o textural más de la roca).

Su estudio puede ser abordado por distintos procedimientos, agrupados en dos categorías: *métodos directos*, orientados a la visualización del sistema poroso (microscopía óptica de polarización y microscopía electrónica de barrido), y *métodos indirectos*, basados en técnicas instrumentales que permiten cuantificar determinadas características de los espacios vacíos (cuantificación del volumen poroso y de elementos del sistema poroso).

La porosidad de la roca se puede clasificar dependiendo del grado de interconexión con el exterior. Se define *porosidad abierta, interpartícula o conectada*, como el volumen de poros que presentan un cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través. Por el contrario, la *porosidad cerrada*, aislada o no comunicada, se refiere al volumen de poros de una roca que no presenta ningún tipo de comunicación con el exterior (Dullien, 1992). La suma de la porosidad conectada y no conectada se denomina *porosidad total*, parámetro de gran importancia en la caracterización de materiales pétreos y sin duda, el más influyente en las propiedades físicas de los mismos.

Según varios autores (Archie, 1950; Bertrand, 1969; Elf-Aquitaine, 1977; Selley, 1982; Bourbie et al, 1987) la porosidad constituye el parámetro petrográfico fundamental cuando se trata de establecer relaciones entre las características petrográficas y las propiedades físicas de la roca, lo que se conoce como *análisis petrofísico*. Lucia (1983, 1995, 1999) añade un nuevo punto de vista petrofísico a la clasificación del espacio poroso: la distribución de los tamaños de poro controla la porosidad, permeabilidad y saturación de la roca, y está relacionado con la fábrica de la misma. Para relacionar la fábrica con la distribución del tamaño de poro es importante determinar si el espacio poroso pertenece a una de las tres clases principales de tipo de poro que establece Lucía, que se basan en distinguir si el poro está entre las partículas o dentro de las mismas: (a) Espacio poroso interpartícula; (b) Vuggy pore space: separate vug pores y touching-vug pores.

(a) Espacio poroso interpartícula

Se define también como porosidad abierta, conectada o efectiva de la roca y representa el volumen de poros con cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través. En ausencia de vuggy porosity, la distribución de tamaños de poro en rocas carbonatadas puede ser descrita en términos de tamaño de partícula, clasificación y porosidad interpartícula (Figura 5). En vez de dividir la fábrica en grano-soportada o lodo-soportada según la clasificación de Dunham (1962) se divide en fábrica grano-dominado y lodo-dominado. Los atributos más importantes de la fábrica grano-dominada son la presencia de la porosidad interpartícula abierta o cerrada y una textura grano-soportada. El atributo más importante de la fábrica lodo-dominada es que las áreas entre los granos están rellenas con lodo incluso si los granos parecen formar una estructura de soporte.

Lucía (1999) determinó tres clases petrofísicas definidas por la permeabilidad y la saturación en agua.

(b) Vuggy pore space: separate vug pores y touching-vug pores.

La adición del vuggy pore space al espacio poroso interpartícula altera las características petrofísicas por la alteración en la manera en que el espacio poroso está conectado. Separate vug pore space se define como el espacio poroso dentro de las partículas o que es significativamente más grande que el tamaño de partícula (generalmente dos veces el tamaño de partícula) e interconectado sólo a través del espacio poroso interpartícula. Touching-Vug Pore Space es el espacio poroso que es significativamente mayor que el tamaño de partícula y forma un sistema poroso interconectado de extensión considerable (Figura 6).

Para relacionar la fábrica de las rocas carbonatadas con la distribución del tamaño de poros es importante determinar si el espacio poroso pertenece a uno de los tres tipos principales de poros según Lucia (1983, 1999): interpartícula, separate-vug and touching vug. Para el primer grupo Lucia (1995) determinó tres clases petrofísicas (Clase 1, Clase 2, Clase 3) definidos por ciertos campos según la permeabilidad y la porosidad interpartícula (Figura 7).

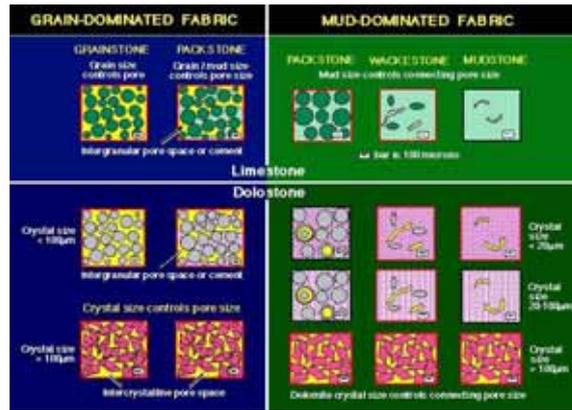


Figura 5: Clasificación geológica/petrofísica del espacio poroso interpartícula en rocas carbonatadas basada en el tamaño y clasificación de granos y cristales. El volumen del espacio poroso interpartícula es importante porque se relaciona con la distribución tamaño-poro

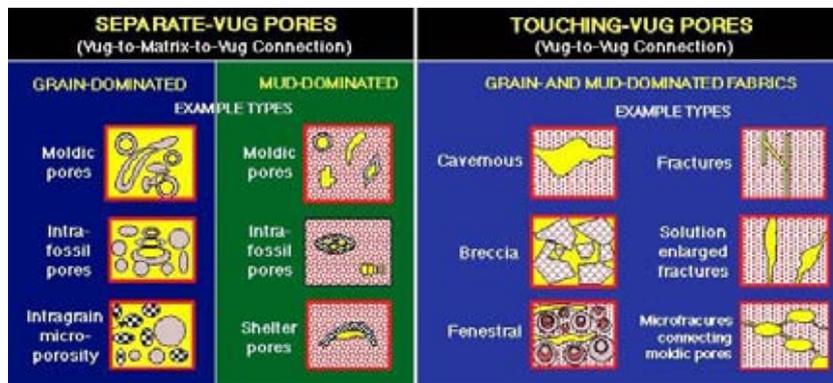


Figura 6: Clasificación geológica/petrofísica del vuggy pore space vasado en la interconexión vug espacio.

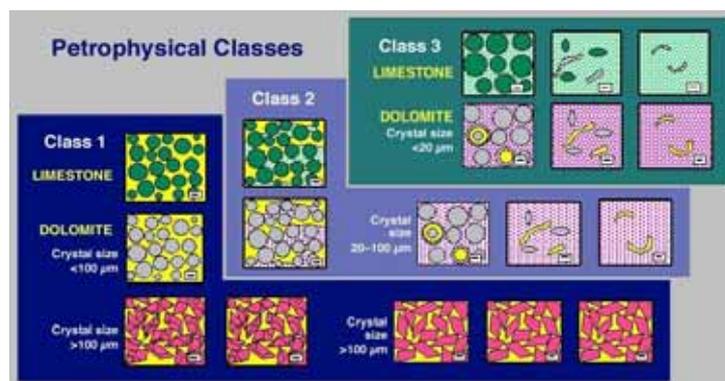


Figura 7: Bloque diagrama que ilustra la relación entre la fábrica de la roca y las clases petrofísicas

Los cambios sistemáticos en la porosidad interpartícula por procesos de cementación, compactación y disolución producirán a su vez cambios sistemáticos en la distribución del tamaño de poro, resultando finalmente en cambios sistemáticos en la permeabilidad (Figura 8).

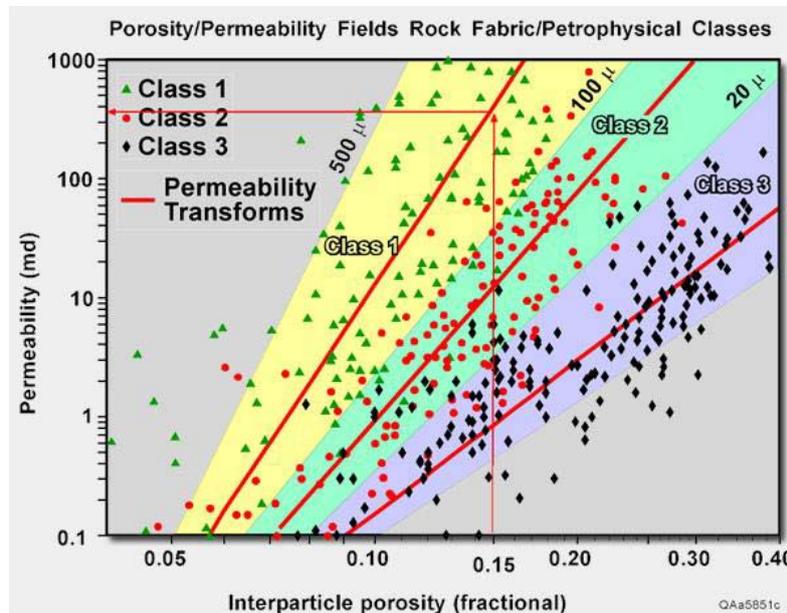


Figura 8: Gráfico para la estimación de la permeabilidad a partir de la porosidad interpartícula de la roca y las clases petrofísicas de Lucía (1999).

(c) Fracturas

En la clasificación de Lucia (1995) las fracturas son un tipo de touching-vug pores puesto que contribuye notablemente a la permeabilidad en muchos reservorios carbonatados y, por tanto, en la clasificación petrofísica del espacio poroso. Golf-Racht (1996) presenta una clasificación descriptiva de las fracturas en las siguientes categorías: (a) fracturas abiertas/cerradas; (b) micro-/macro- fracturas; y (c) facturas inducidas/naturales. En este estudio se sacan de la porosidad porque pueden igualmente contribuir a la anisotropía como a la porosidad y la permeabilidad.

(d) Estilolitos

En rocas carbonatadas los estilolitos son rasgos diagenéticos comunes, y su origen es independiente de la facies y de la edad geológica (Nelson 1985; van Golf-Racht 1996). Generalmente son planos irregulares de discontinuidad con una orientación de la vertical a la horizontal. Está aceptado de forma general que los estilolitos son el resultado de los procesos de presión-concentración o de presión-disolución. Ambos

procesos están controlados principalmente por la solubilidad de los componentes y partículas en la roca, y por los campos regionales de stress (Nelson, 1985).

Existe una clasificación de estilolitos de Logan and Semeniuk (1976) respecto a la configuración, paragénesis, fábrica y estructura de los fenómenos de disolución.

3. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS PERTENECIENTES A LA ZONA DE ESTUDIO

Los estudios petrográficos realizados sobre 21 muestras de la Unidad Sierra de Jódar (Prebético Interno Septentrional), se basan fundamentalmente en el análisis de láminas delgadas mediante microscopía óptica de polarización. En este estudio se ha utilizado un equipo LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada, perteneciente a la Unidad de Granada del Instituto Geológico y Minero de España. A continuación se recogen los datos de localización, litología, edad y código según MAGNA nº 927 de cada muestra.

Id	X_UTM	Y_UTM	Litología muestreada	Edad	Código_ MAGNA nº 927
Bm01	465689	4189121	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm02	465697	4189119	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm03	465708	4189113	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm04	465725	4189082	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm05	465727	4189056	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm06	465757	4189022	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm07	465804	4189042	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm08	465831	4189019	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm09	465842	4189004	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm10	465879	4188971	Dolomías masivas	Cenomaniense	7
Bm11	465903	4188970	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas	Albiense	6
Bm12	465927	4188960	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas	Albiense	6
Bm13	465964	4188938	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas	Albiense	6
Bm14	465983	4188910	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas	Albiense	6
Bm15	465984	4188821	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas	Albiense	6
Bm16	465980	4188801	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas	Albiense	6
Bm17	466122	4188742	Calizas en bancos	Aptiense	4
Bm18	466186	4188753	Calizas en bancos	Aptiense	4
Bm19	466230	4188864	Dolomías arenosas	Aptiense inferior	2
Bm20	465729	4189049	Dolomías arenosas	Aptiense inferior	2
Bm21	465729	4189038	Calizas en bancos	Aptiense	4

La observación se ha realizado con luz natural y polarizada mediante la técnica microscópica de transmisión de acuerdo con la naturaleza y la preparación de las muestras. Las láminas delgadas han sido parcialmente teñidas con rojo de alizarina a fin de discriminar la naturaleza del carbonato (calcita o dolomita): el rojo de alizarina tiñe de rojo el calcio de la calcita.

Como datos de partida tenemos los valores de porosidad interconectada (%) y la densidad (kg/m^3) de cada una de las muestras tomadas.

El análisis petrográfico consiste en la determinación de la litología de la roca, lo que incluye tanto la identificación de los componentes como de la mineralogía, además de la proporción relativa de los elementos texturales y diagenéticos en ella (partículas, cemento, matriz y poros). A partir de esta información determinamos la Fábrica de la roca según el esquema de facies propuesto por Dunham (1962) y la Clase Petrofísica según el esquema propuesto por Lucia (1999).

4. RESULTADOS

A continuación se expondrán los resultados que han derivado del estudio de las muestras en lámina delgada por la técnica de microscópica de luz transmitida con microscopio de polarización:

ANEXO A. Tablas resultado, en las cuales se incluyen tanto las litologías según observaciones de campo y con microscopía de luz transmitida y

ANEXO B. Estudios petrográficos de las muestras más representativas de las formaciones muestreadas.

ANEXO A

Tablas Resultado

MUESTRA	LITOLOGÍA MAGNA	POROSIDAD observada	LITOLOGÍA A OBSERVAR	POR. ABIERTA (%)	FÁBRICA ROCA	CLASE PETROFÍSICA	FRACTURAS	OBSERVACIONES
Bm01	Dolomías masivas	Ausente	Caliza	1,00	Wackestone/ Packstone bioclástico	Clase 3	Selladas con precipitados tardíos	Algún grano de Q, por aporte de terrígenos
Bm02	Dolomías masivas			1,1				
Bm03	Dolomías masivas	Ausente	Caliza	1,7	Packstone bioclástico (abundantes nummulites)	Clase 3	Fracturas selladas casi en su totalidad	Algún grano de Q, por aporte de terrígenos
Bm04	Dolomías masivas	No observada	Caliza	10,5	Packstone bioclástico	Clase 2	Fracturas abiertas	Granos de Q accesorios
Bm05	Dolomías masivas	Presente, accesoria	Dolomía	10,4	Dolowackestone	Clase 2	Ausentes	
Bm06	Dolomías masivas	Presente, accesoria	Dolomía	2,7	Dolowackestone	Clase 2	Alguna fractura sellada	"Sombras" de orbitolimitados
Bm07	Dolomías masivas			14,1	Dolograinstone	Clase 1	No fracturada	
Bm08	Dolomías masivas	Muy accesoria	Dolomía grano fino	2,2	Dolograinstone	Clase 1	Escasas y selladas con calcita	
Bm09	Dolomías masivas	Gran cantidad de espacios abiertos heterométricos	Dolomía	7	Dolograinstone	Clase 1	Parcialmente selladas con calcita	
Bm10	Dolomías masivas	Gran cantidad de espacios abiertos heterométricos	Dolomía	7,1	Dolograinstone	Clase 1	Presencia de algunas fracturas con precipitado de calcita	
Bm11	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas		Caliza algo dolomitizada	0,7	Wackestone/ Packstone bioclástico	Clase 2	Varias generaciones, selladas parcialmente	Dolomitización parcial
Bm12	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas	Intercristalina	Dolomía	10,4	Dolowackestone	Clase 1	Accesoria	

Bm13	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas		Caliza algo dolomitizada	0,7	Wackestone/ Packstone bioclástico	Clase 2	Ausentes	
Bm14	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas	Presencia de separate vug pore space	Caliza algo dolomitizada	2,6	Wackestone/ Packstone bioclástico	Clase 2	Presencia de fracturas parcialmente selladas.	
Bm15	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas		Caliza algo dolomitizada	1,4	Wackestone/ Packstone bioclástico	Clase 2	Varias generaciones, selladas parcialmente	
Bm16	Calcarenitas parcialmente dolomitizadas		Caliza algo dolomitizada	1,1	Wackestone	Clase 3	Varias generaciones, selladas parcialmente	
Bm17	Calizas en bancos	Ausente	Caliza	4,5	Packstone con miliólidos	Clase 3	Fracturas abiertas pequeñas	
Bm18	Calizas en bancos	Ausente	Caliza	2,8	Packstone con orbitolinas	Clase 3		
Bm19	Dolomías arenosas	Ausente	Caliza	2,00	Mudstone	Clase 3	Fractura tardía sellada	Algo de dolomita
Bm20	Dolomías arenosas	Ausente	Dolomía	14,4	Dolomía de gran tamaño de cristal	Clase 1	No	Algo de caliza
Bm21	Calizas en bancos	Abundante	Dolomía	10,1	Dolomía de gran tamaño de cristal	Clase 1	No	Algo de caliza

ANEXO B

Estudios petrográficos

DOLOMIÁS MASIVAS (Cenomaniense)

De esta formación fueron tomadas 10 muestras (Bm01-Bm10). Según los datos de campo pertenecen a un paquete de dolomías masivas que corresponden al techo de toda la sucesión estratigráfica aflorante en la Hoja de Baeza. Presentan un espesor de unos 140 metros, donde se aprecian “sombras” de orbitolínidos hacia la base (IGME, 1992). Las muestras Bm01-Bm05 (Figura 9 A y B) pertenecen a ciertos niveles calizos integrados en las masas dolomitizadas (Figura 10 A y B).

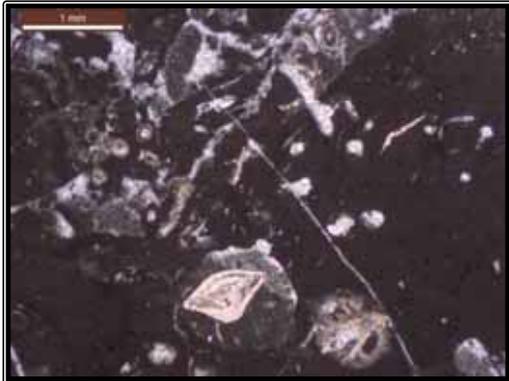


Figura 9A



Figura 9B

Las muestras pertenecientes al paquete dolomítico (Bm05-Bm10) muestran signos de diferentes grados de dolomitización; así tenemos aquellas que muestran una dolomitización parcial (como es el caso de la Bm-07) como otras donde el proceso de dolomitización está muy avanzado. Igualmente son muestras que exhiben tamaño de grano dispar y, aunque predominan las de grano medio-grueso (Figura 10A) también se observan aquellas en las que predomina el tamaño fino o muy fino (Bm-10; Figura 10B).



Figura 10A



Figura 10B

CALCARENITAS PARCIALMENTE DOLOMITIZADAS (Albiense)

Estas calcarenitas parcialmente dolomitizadas se incluyen en el paquete de “Calizas y dolomías estratificadas y arenas silíceas” del Albiense, habiéndose tomado 6 muestras en total (Bm11-Bm16).



Figura 11A

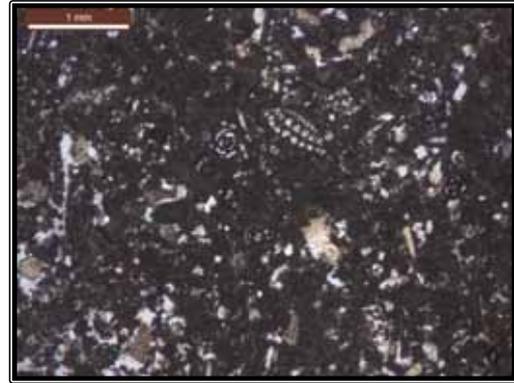


Figura 11B



Figura 11C



Figura 11B

Concretamente se trata de facies con una dolomitización parcial, a veces muy sectorial (muestras B-11, Bm13-Bm15, Figura 11A y B), otras la dolomitización afecta a los lodos que forman la matriz (muestra Bm-16, Figura 11C) y el resto, por el contrario, pertenecen a dolomías calcáreas con unos tamaños de cristal más fino que las observadas en las muestras del Aptiense (muestra Bm-12, Figura 10D).

CALIZAS EN BANCOS (Aptiense)

Se trata, según lo que recoge el MAGNA (IGME, 1992), de un conjunto de 100 a 110 m de espesor de calizas nodulosas margosas, con intercalaciones de calizas en bancos. Concretamente han sido tomadas tres muestras, de las cuales dos son calizas (Bm-17 y Bm-18). Concretamente la muestra Bm-17 (Figura 12A) es un packstone con miliólidos y bioclastos y la Bm-18 es una “orbitolinita” (Figura 12B), es decir, una calcarenita con una alta abundancia local de orbitolínidos, de ahí el nombre que se le asigna. Por el contrario, la muestra Bm-21 (Figura 12C) es una dolomía parecida a la muestra Bm-20, salvo que en la primera no se observan cristales de calcita entre los de dolomita y sí el espacio poroso; entre los cristales de dolomita quedan huecos bastante irregulares, muy heterogéneos en cuanto al tamaño (línea roja marcando las dimensiones de uno de ellos).



Figura 12A

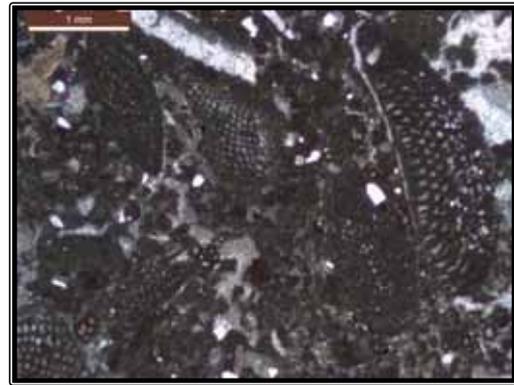


Figura 12B



Figura 12C

DOLOMÍAS ARENOSAS (Aptiense inferior)

Según la información recogida en el MAGNA (IGME, 1992) estas dolomías están incluidas en un paquete de 60-80 m de arenas silíceas amarillentas, situadas en el extremo oriental de la estructura anticlinal, que hacia el OSO de la misma, pasan lateralmente a dolomías arenosas masivas, de dolomitización tardía.

Las muestras tomadas son dos, una pertenece a un mudstone con restos de bioclastos (muestra Bm19, Figura 13A) y la otra una dolomía con cristales de calcita previa que aún no han sido reemplazados por los de dolomita (muestra Bm20, Figura 13B).

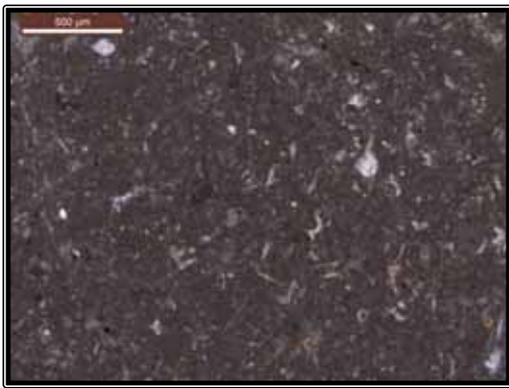


Figura 13A

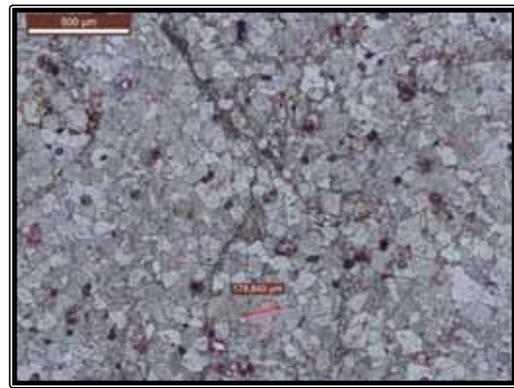


Figura 13B

5. CONCLUSIONES

En el actual informe se recogen los estudios petrográficos de 21 muestras pertenecientes a los afloramientos carbonatados de edad cretácica con intercalaciones de arenas silíceas de tipo Facies Utrillas (Unidad Sierra de Jódar). El muestreo se ha llevado a cabo siguiendo el barranco del Perejil, en la Serrezuela de Bedmar. Las facies muestreadas comprenden dolomías, calcarenitas y calizas, todas ellas cretácicas, y posteriormente se ha procedido a su clasificación de acuerdo a su mineralogía y textura, así como la definición de ciertos parámetros físicos en las mismas (como fracturación y porosidad) utilizándose un Microscopio Óptico de Polarización LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada.

Las **dolomías masivas cenomanienses** (según MAGNA 7) representan un paquete dolomítico con ciertas intercalaciones calcíticas (generalmente de menor porosidad que las dolomías). Los afloramientos dolomíticos presentan diferentes grados de dolomitización y tamaños de grano variado, existiendo cierta correlación entre tamaño de grano grueso y mayor porosidad. Mientras que las calizas pertenecen a la Clase petrofísica 2 y 3, las dolomías se mueven entre las Clases 1 y 2.

Las **calcarenitas parcialmente dolomitizadas del Albiense**, (según MAGNA 6) albergan calizas parcialmente dolomitizadas que exhiben una porosidad baja, salvo algunos ejemplares donde el grado de dolomitización es alto y en ellas se detecta mayor porosidad. La fracturación en todas ellas está presente aunque generalmente son fracturas que tardíamente están selladas por precipitados calcíticos. Pertenecen a las Clases petrofísicas 1 y 2.

Las calizas en bancos del Aptiense muestreadas (según MAGNA 4) son dos calizas pertenecientes a la Clase 3, bastante compactas, de porosidad baja y no fracturadas; también tenemos una muestra que pertenece a una dolomía y cuya porosidad, comparada con las anteriores, es mayor (del orden de las dolomías masivas cenomanienses).

Por último **las dolomías arenosas muestreadas del Aptiense inferior** (según MAGNA 2) son una caliza de porosidad baja y una dolomía con porosidad del 14,4%. Las clases petrofísicas son 3 y 1 respectivamente.

Podemos decir, por tanto, que los materiales más porosos suelen corresponder a materiales dolomitizados total o parcialmente, dependiendo de los casos. Mientras que

los materiales calcílicos están en torno al 1,5% (salvo alguna excepción), las dolomías están generalmente por encima de 10% de porosidad. La fracturación, aunque frecuente en las diferentes muestras estudiadas, aparecen selladas con precipitados tardíos de calcita.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archie, G.E., 1950.** Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. *Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 36: 278-298.
- Bertrand, J.P., 1969.** Cours de petrography, apliquee a l'etude des problemas petroliers. Tome 1: Etude des roches. Technip, Paris, 130 p.
- Bourbie, T., Coussy, O. y Zinszner, B., 1987.** Acoustic of porous media. Technip, Paris, 334 p.
- Dullien F.A.L. (1992).** Porous Media Fluid Transport and Pore Structure. Academic Press, San Diego, 574 p.
- Dunham, R.J., 1962.** Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem 1*: 108-121.
- Elf-Aquitaine, 1977.** Essai de caracterisation sedimentologique: des depats carbonates. 2. Elements d'interpretation. Elf-Aquitaine, Boussens et Pau, 230 p.
- IGME, 1991.** Mapa geológico de Baeza. Escala 1:50.000
- Lucia, F. J., 1983.** Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space. *J. Petrol Tech.*, 35: 626-637.
- Lucia, F. J., 1995.** Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 79: 1275-1300.
- Lucia, F. J., 1999.** Carbonate reservoir characterization. *Springer, Berlin Heidelberg New York*, pp 1-226.
- Selley, R. C., 1982.** *An introduction to sedimentology.* Academic Press, London, 417 pp.

ANEXO 2: DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE Y LA POROSIDAD
ABIERTA DE LAS MUESTRAS DE ROCA DE LA SERREZUELA DE BEDMAR Y JÓDAR

LABORATORIO DEL IGME

C/ LA CALERA, 1. 28760 –TRES CANTOS (MADRID) Tf. 91 7286166. FAX 91 7286150

Correo electrónico: laboratorios@igme.es

INFORME DE LABORATORIO Nº 14/0367	Hoja 1 de 10
Solicitante: Crisanto Martín Montañés (Unidad del IGME en Granada) Dirección: Urb Alcázar del Genil, 4, Edificio Zulema bajo 18006 Granada Correo electrónico: c.martin@igme.es Teléfono: 958 183 143 Fax:	
Fecha recepción: 15/12/2014	Fecha/s de ensayo: 22/12/2014 a 22/01/2015
Muestreo: A cargo del solicitante	
Procedimiento/s de ensayo: <ul style="list-style-type: none">Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta. UNE-EN 1936: 2007Apdo. 8.1 (PTE-ET-041 ED.8) (*),(PTE-ET-041-A ED.1) (*).	
Observaciones: La actividad marcada (*) no está incluida en el alcance de la acreditación de ENAC nº 62/LE127 rev.12 por no cumplir la norma correspondiente en todos sus apartados.	
Realizado por: 	
Fdo: Ana Gimeno García (Responsable del Laboratorio de Piedra Natural y Ensayos Tecnológicos)	
Fecha: 26/01/2015	

Los resultados expuestos afectan en exclusiva a las muestras sometidas a ensayo. Este informe no podrá reproducirse, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del Laboratorio. Las muestras quedarán a disposición del solicitante durante un periodo de tres meses siguientes a la emisión y entrega de este informe, a partir de los cuales podrán ser eliminadas.

SEDE CENTRAL:
Ríos Rosas, 23
28003 MADRID
Teléfono 91 349 5700
Fax 91 442 6216



1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA.

Se han recepcionado en el centro de laboratorios del IGME 21 muestras identificadas por el solicitante con la siguiente referencia.

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO
BM-1	5164-01
BM-2	5164-02
BM-3	5164-03
BM-4	5164-04
BM-5	5164-05
BM-6	5164-06
BM-7	5164-07
BM-8	5164-08
BM-9	5164-09
BM-10	5164-10
BM-11	5164-11
BM-12	5164-12
BM-13	5164-13
BM-14	5164-14
BM-15	5164-15
BM-16	5164-16
BM-17	5164-17
BM-18	5164-18
BM-19	5164-19
BM-20	5164-20
BM-21	5164-21



2. MÉTODOS DE ENSAYO PARA PIEDRA NATURAL. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE Y LA POROSIDAD ABIERTA. UNE-EN 1936:2007 Apartado 8.1. (PTE-ET-041 ED.8 y PTE-ET-041-A ED.1)¹

Tipo de probeta	Irregular²
Tamaño de grano	No aplica
Acabado superficial	Corte con sierra
Acondicionamiento antes de ensayar	Secado en estufa

REFERENCIA SOLICITANTE ³	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-1	5164-01	2671	0,3	1,0	0,01
BM-2	5164-02	2672	1,7	1,1	0,12
BM-3	5164-03	2659	0,3	1,7	0,01
BM-4	5164-04	2540	0,3	10,5	0,01
BM-5	5164-05	2541	48,7	10,4	0,01
BM-6	5164-06	2691	0,3	2,7	0,02
BM-7	5164-07	2377	1,7	14,1	0,01
BM-8	5164-08	2771	0,3	2,2	2,26
BM-9	5164-09	2637	66,8	7,0	0,24
BM-10	5164-10	2636	7,1	7,1	0,35
BM-11	5164-11	2673	3,9	0,7	0,01
BM-12	5164-12	2537	0,3	10,4	0,02
BM-13	5164-13	2682	2,6	0,7	0,01
BM-14	5164-14	2634	0,3	2,6	0,01
BM-15	5164-15	2658	0,3	1,4	0,01
BM-16	5164-16	2660	0,3	1,1	0,01
BM-17	5164-17	2589	0,2	4,5	0,01
BM-18	5164-18	2625	0,3	2,8	0,31
BM-19	5164-19	2628	1,7	2,0	0,01
BM-20	5164-20	2422	0,5	14,4	0,01
BM-21	5164-21	2539	0,2	10,1	0,01

¹ No incluido en el alcance de la acreditación de ENAC nº 62/LE 127 rev.10 por no cumplir la norma correspondiente en todos sus apartados.

² Debido a las características de las muestras suministradas, se han cortado probetas irregulares de similar relación superficie/volumen.

³ De las muestras BM-2, BM-5, BM-7, BM-9, BM-10, BM-11, BM-13, BM-19 y BM-20 se han obtenido dos probetas. Los resultados de densidad aparente y porosidad que aparecen en la tabla corresponden al promedio de los dos resultados. Los valores individuales se incluyen en el apartado 2.1.

**2.1. Muestras en las que se han ensayado dos probetas:**Muestra BM-2 (5164-2):

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-2	5164-2-a	2673	0,3	1,0	0,01
	5164-2-b	2671	0,3	1,1	0,01
	Valor medio	2672		1,1	
	Incert. Valor medio	1,7		0,1	

Muestra BM-5 (5164-5):

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-5	5164-5-a	2517	0,3	11,3	0,01
	5164-5-b	2565	0,4	9,6	0,01
	Valor medio	2541		10,4	
	Incert. Valor medio	48,7		1,73	

Muestra BM-7 (5164-7):

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-7	5164-7-a	2378	0,3	14,1	0,01
	5164-7-b	2376	0,3	14,1	0,01
	Valor medio	2377		14,1	
	Incert. Valor medio	1,7		0,02	

Muestra BM-9 (5164-9):

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-9	5164-9-a	2604	0,3	8,2	0,01
	5164-9-b	2671	0,5	5,9	0,02
	Valor medio	2637		7,0	
	Incert. Valor medio	66,8		2,26	

Muestra BM-10 (5164-10):

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-10	5164-10-a	2633	0,3	7,2	0,01
	5164-10-b	2640	0,3	6,9	0,01
	Valor medio	2636		7,1	
	Incert. Valor medio	7,1		0,24	

Muestra BM-11 (5164-11):

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-11	5164-11-a	2675	0,3	0,5	0,01
	5164-11-b	2671	0,3	0,9	0,01
	Valor medio	2673		0,7	
	Incert. Valor medio	3,9		0,35	

Muestra BM-13 (5164-13):

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-13	5164-13-a	2681	0,3	0,7	0,01
	5164-13-b	2683	0,3	0,7	0,01
	Valor medio	2682		0,7	
	Incert. Valor medio	2,6		0,02	

Muestra BM-19 (5164-19):

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-19	5164-19-a	2629	0,3	1,9	0,01
	5164-19-b	2627	0,3	2,2	0,01
	Valor medio	2628		2,0	
	Incert. Valor medio	1,7		0,31	

Muestra BM-20 (5164-20):

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
BM-20	5164-20-a	2422	0,3	14,4	0,01
	5164-20-b	2422	0,3	14,4	0,01
	Valor medio	2422		14,4	
	Incert. Valor medio	0,5		0,01	

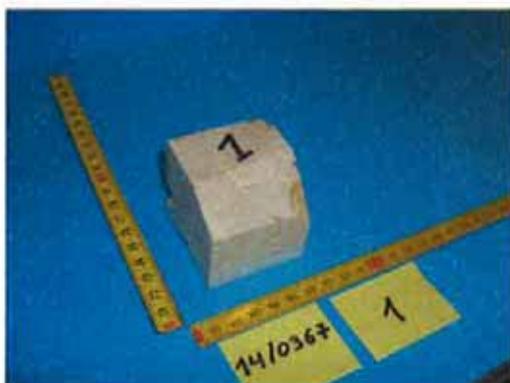
2.2.- Probetas ensayadas:

Figura 1.- Muestra BM-1 (5164-1)

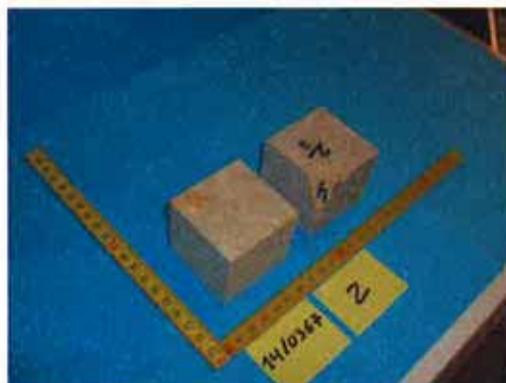


Figura 2.- Muestra BM-2 (5164-2)

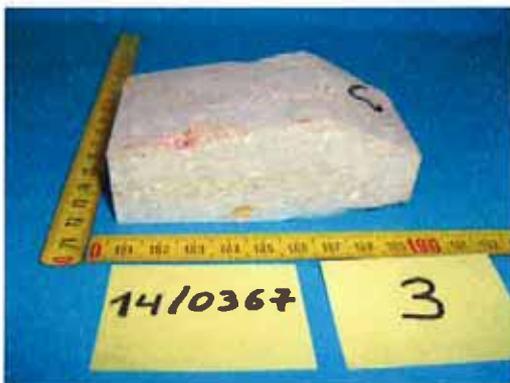


Figura 3.- Muestra BM-3 (5164-3)



Figura 4.- Muestra BM-4 (5164-4)

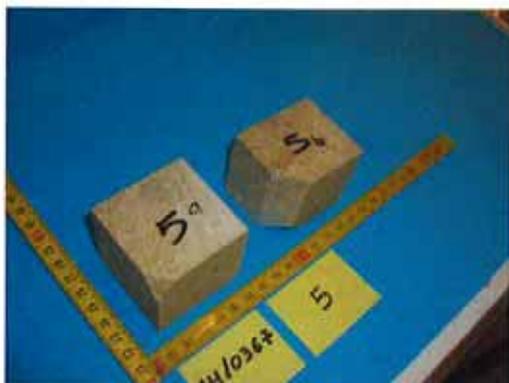


Figura 5.- Muestra BM-5 (5164-5).



Figura 6.- Muestra BM-6 (5164-6)



Figura 7.-Muestra BM-7 (5164-7)



Figura 8.-Muestra BM-8 (5164-8)



Figura 9.-Muestra BM-9 (5164-9)

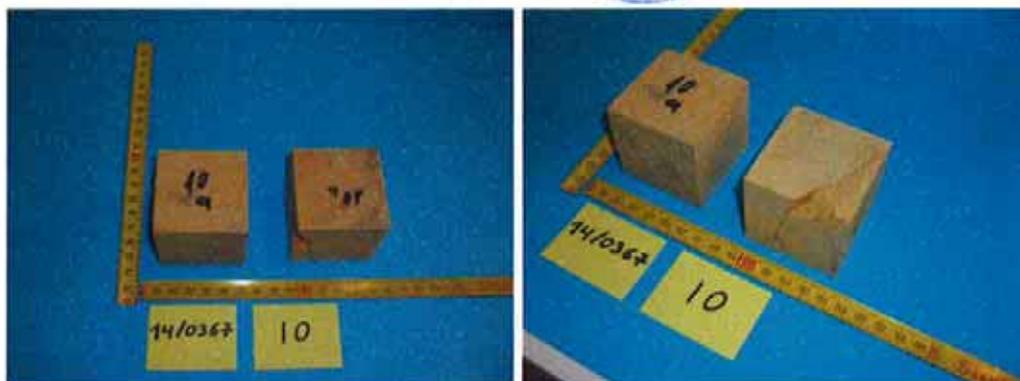


Figura 10.-Muestra BM-10 (5164-10)

La probeta 10b presenta grietas abiertas y le falta un trozo de una arista.

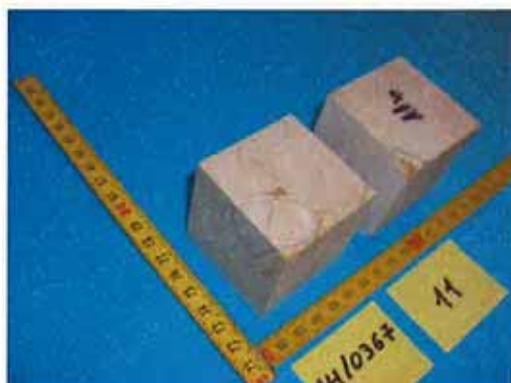


Figura 11.-Muestra BM-11 (5164-11)

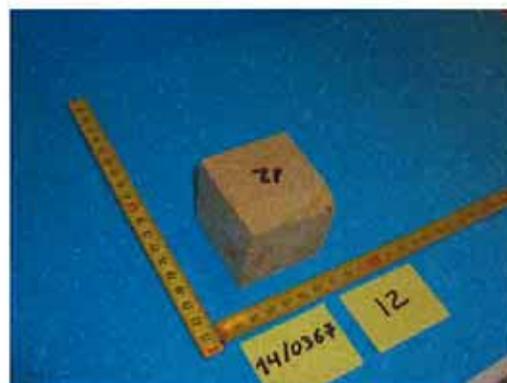


Figura 12.-Muestra BM-12 (5164-12)



Figura 13.-Muestra BM-13 (5164-13)

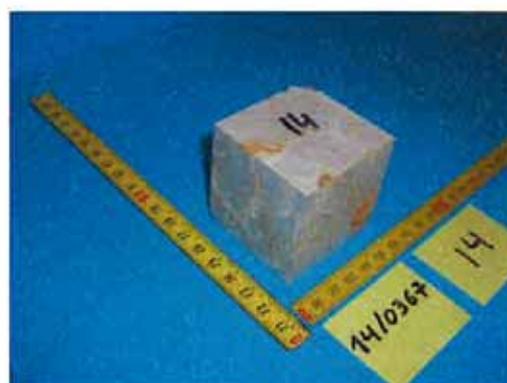


Figura 14.-Muestra BM-14 (5164-14)



Figura 15.-Muestra BM-15 (5164-15)

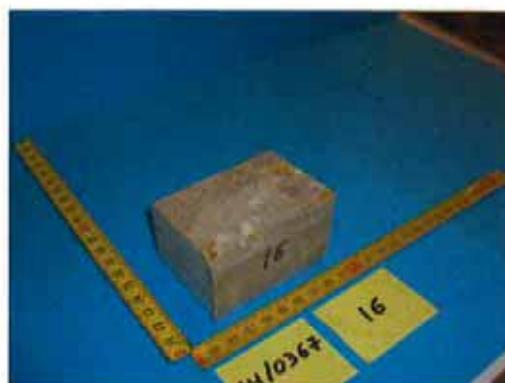


Figura 16.-Muestra BM-16 (5164-16)



Figura 17.-Muestra BM-17 (5164-17)

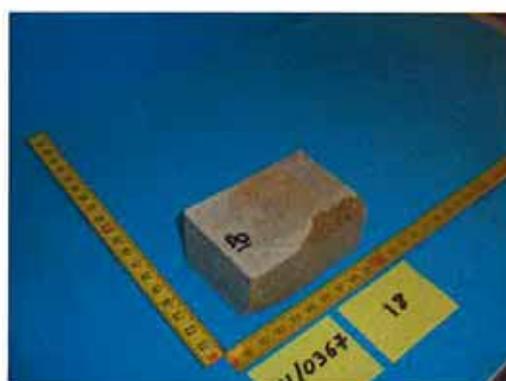


Figura 18.-Muestra BM-18 (5164-18)

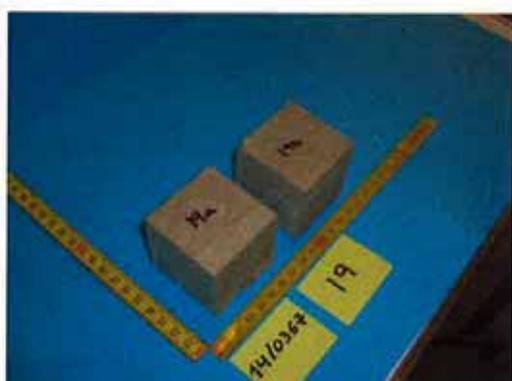


Figura 19.-Muestra BM-19 (5164-19)



Figura 20.-Muestra BM-20 (5164-20)

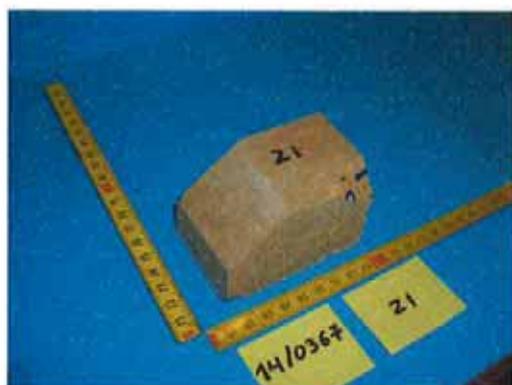


Figura 21.-Muestra BM-21 (5164-21)

ANEXO 3: INFORME TÉCNICO DE POROSIDAD Y PERMEABILIDAD DE LAS
MUESTRAS DE ROCA DE LA SERREZUELA DE BEDMAR Y JÓDAR



INFORME TÉCNICO

POROSIDAD Y PERMEABILIDAD

Fundación Instituto Petrofísico
Parque Científico y Tecnológico de la UPM (TECNOGETAFE)
C/ Eric Kandel nº 1 , Edificio FGP
28906 Getafe, Madrid
Tel.: 91 491 81 53

 Fundación Instituto Petrofísico C/Eric Kandel nº 1 28906 Getafe (Madrid) Telf.: 91 491 81 53 Fax: 91 491 81 55	Informe Técnico	Número de informe 121-2014
	Archivo : 121/2014	Referencia del peticionario IGME
<p>Peticionario:</p> <p>...</p> <p>Nombre: Crisanto Martín</p> <p>Dirección: Instituto Geológico y Minero de España. Delegación de Granada. Urb. Alcázar del Genil, 4 Edif. Zulema, bajo, 18006 Granada.</p> <p>Número de teléfono: 958183143</p> <p>E-mail : c.martin@igme.es</p> <hr/> <p>FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS Y ENSAYOS:</p> <p>Fecha de recepción de muestras: 19/12/2014</p> <p>Fecha de finalización de ensayos : 19/12/2014</p> <hr/> <p>DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS:</p> <p>Tipo de muestras: Muestras de afloramiento de carbonatos</p> <p>Cantidad de muestras: 21</p> <hr/> <p>IDENTIFICACION:</p> <p>Número de identificación de muestras:</p> <p>BM1, BM2, BM3, BM4, BM5, BM6, BM7, BM8, BM9, BM10, BM11, BM12, BM13, BM14, BM15, BM16, BM17, BM18, BM19, BM20, BM21</p> <hr/> <p>TIPO DE ENSAYOS:</p> <p>Corte de plugs de las muestras de afloramiento, secado de las muestras y permeabilidad al gas.</p> <hr/>		



1.- METODOLOGÍA EMPLEADA

En el laboratorio se recibieron 21 muestras de afloramiento sin orientación. De todas ellas se intentaron obtener plugs de 1,5" de diámetro (salvo la BM17 que tiene 1") y entre 1,5" y 2" de longitud (salvo la BM17 que tiene 1" también). Se intentó que todas las muestras tuviesen 1,5" de diámetro y 2" de longitud, siendo las medidas estándar a utilizar en el laboratorio, pero no se ha podido en muchas por tener menor longitud. Al no tener la orientación de las muestras y no verse claramente en muchas de ellas la estratificación, no se sabe si los plugs se han obtenido horizontales a la estratificación o verticales a la misma.

Dichos plugs se obtuvieron con un testigero de laboratorio que utilizó una corona de diamante con un diámetro interior de 1,5" utilizando como fluido refrigerante el agua.

Para obtener las caras de todos los plugs totalmente paralelas se utilizó una sierra de disco de diamante obteniendo la longitud final de cada plug.

Los plugs obtenidos con sus medidas fueron los siguientes:

Nº Muestra	Medidas	
	Longitud (mm)	Diametro (mm)
BM1	37,33	38,06
BM2	40,27	38,06
BM3	45,21	38,09
BM4	50,95	38,08
BM5	50,91	38,04
BM6	50,93	38,03
BM7	50,91	38,07
BM8	51,02	38,11
BM9	47,81	38,08
BM10	50,94	38,08
BM11	50,92	38,03
BM12	39,11	38,12
BM13	41,11	38,09
BM14	44,99	38,09
BM15	50,90	38,07
BM16	50,94	38,00
BM17	23,41	25,49
BM18	51,06	38,04
BM19	50,99	38,08
BM20	39,38	38,05
BM21	50,97	38,05

Una vez cortados los plugs se secaron en una estufa a 110°C y luego se pasó a la etapa de realización de ensayos de permeabilidad como sigue:

Permeabilidad al gas y Klinkenberg.

La permeabilidad al gas se calcula siguiendo unas condiciones de ensayo determinadas:

- Tipo de gas inyectado: Nitrógeno.
- Presión de confinamiento: 400 psig.

- Muestras con más de 0.1 mD:
Método usado: multi punto(KI)
Corrección Klinkenberg: cálculo analítico (entre 3-5 puntos de medida).

- Muestras con menos de 0.1 mD:
Método: punto único. (psi)
Presión media de poro: 100 psig
Corrección de Klinkenberg: cálculo empírico.

La ecuación de Darcy para un flujo laminar y horizontal tratándose de un gas bajo unas condiciones de tipo permanente viene escrita en el documento API RP 27 como:

$$K_g = \frac{2\mu Z T P_b Q_b L}{A T_b (P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

K_g = permeabilidad al gas (D)
 Z = factor de compresibilidad del gas
 T = temperatura del gas que fluye (°C)
 P_b = presión atmosférica (Atm)
 Q_b = flujo del gas (cm³/s) a presión P_b
 T_b = temperatura (ambiente) (°C)
 P_1, P_2 = presiones absolutas a entrada y salida (Atm)

Simplificando la expresión, obtenemos la ecuación que se usa para calcular la permeabilidad al gas de los plugs, bajo condiciones de flujo laminar:

$$K_g = \frac{\mu P_b Q_b L}{A P_m \Delta P} \quad (2)$$

P_m = presión media del gas en la muestra (Atm)

Esta ecuación se usa para calcular la permeabilidad al nitrógeno bajo las condiciones de un flujo laminar.

La corrección Klinkenberg muestra que la permeabilidad al gas decrece a medida que la presión del gas inyectado se incrementa, y se tiene que la permeabilidad al gas de un plug es siempre mayor que su permeabilidad para un líquido inerte.

Si la permeabilidad al gas obtenida a diferentes presiones de poro se grafica respecto a la recíproca de la presión media ($1/P_m$), la línea recta que se pudiera dibujar debería ser capaz de pasar por cada uno de esos puntos (o acercarse lo máximo posible a ellos). Si extrapolamos esta línea hasta unas presiones infinitas se puede obtener una intersección con respecto al eje de permeabilidad al gas (eje Y). El punto de intersección corresponde en realidad a la permeabilidad al líquido y puede calcularse por medio de la expresión matemática siguiente:

$$K_{liquido} = \frac{K_{gas}}{1 + \frac{b}{P_m}} \quad (3)$$

K_L = permeabilidad al líquido teórica (D)

b = factor de corrección Klinkenberg. La curva de la línea viene dada por bK_L

El factor b varía dependiendo del tipo de gas empleado, y decrece a medida que la permeabilidad aumenta.

2.- RESULTADOS

Nº Muestra	Medidas		Permeabilidad		
	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Kg (mD)	Kl (mD)	Tipo de Kl
BM1	37,33	38,06	0,005	0,002	psi
BM2	40,27	38,06	0,007	0,003	psi
BM3	45,21	38,09	3,962	3,413	Kl
BM4	50,95	38,08	102,329	90,877	Kl
BM5	50,91	38,04	4,118	3,256	Kl
BM6	50,93	38,03	54,063	47,013	Kl
BM7	50,91	38,07	9,067	8,142	Kl
BM8	51,02	38,11	35,134	32,731	Kl
BM9	47,81	38,08	17,213	15,269	Kl
BM10	50,94	38,08	0,085	0,05	psi
BM11	50,92	38,03	0,007	0,003	psi
BM12	39,11	38,12	2,095	1,684	Kl
BM13	41,11	38,09	0,012	0,006	psi
BM14	44,99	38,09	3,17	2,774	Kl
BM15	50,90	38,07	0,021	0,011	psi
BM16	50,94	38,00	5,304	4,539	Kl
BM17	23,41	25,49	0,128	0,077	psi
BM18	51,06	38,04	0,117	0,07	psi
BM19	50,99	38,08	0,211	0,131	psi
BM20	39,38	38,05	18,487	17,096	Kl
BM21	50,97	38,05	0,041	0,023	Kl

Las muestras que tienen permeabilidad alta suelen tener fracturas asociadas o poros de gran tamaño en la superficie que deben estar interconectados. Las muestras que tienen baja permeabilidad también suelen tener fracturas, pero están selladas.

En las siguientes imágenes se pueden ver las muestras y las posiciones seleccionadas para obtener los plugs.

ANEXO I.

IMÁGENES DE LOS PLUGS



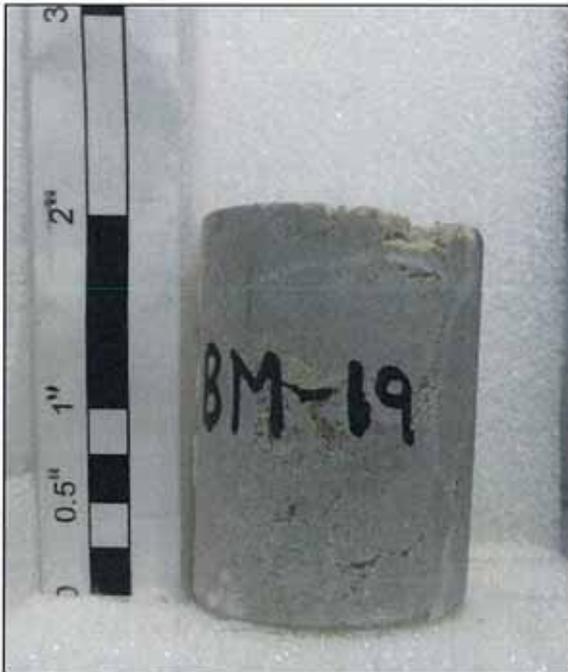














IMÁGENES DE LA POSICIÓN DE LOS PLUGS DENTRO DE LA MUESTRA

BM1



BM2



BM3



BM4



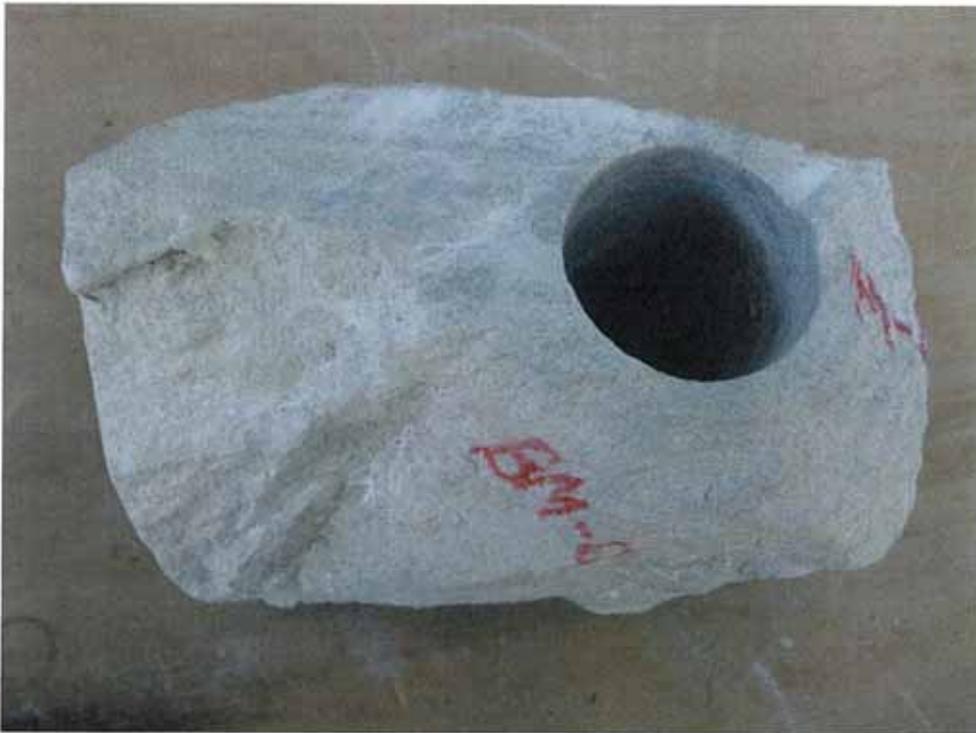
BM5



BM6



BM7



BM8



BM9



BM10



BM11



BM12



BM13



BM14



BM15



BM16



BM17



BM18



BM19



BM20



BM21



ANEXO 4: ANÁLISIS QUÍMICOS DEL MANANTIAL DE SISTILLO

ANÁLISIS QUÍMICOS DEL MANANTIAL DE SISTILLO I (203820005)

Fecha	Cl	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	CO3 (mg/l)	NO3 (mg/l)	Na (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	K (mg/l)	PH	C.E. (20°C) (µS/cm)	DQO (mg/102)	NO2 (mg/l)	NH4 (mg/l)	SiO2 (mg/l)	PO4 (mg/l)
dd/mm/aaaa																
11/05/1967	99	38	900	0	0	64	5	68	0		580	0	0	0	0	0
21/02/1989	103	44	179	5	3	59	14	61	1	8,2	690	0,6	0	0	3,5	0,01
21/10/1990	220	77	206	0	2	132	16	82	2		1090	0	0	0,21	0	0
04/10/1991	161	57	184	6	2	101	20	63	1	8,2	856	0,8	0	0	5,8	0
24/10/1991	161	57	184	6	2	101	20	63	1	8,2	856	0,8	0	0	5,8	0
20/05/1992	93	36	230	0	2	55	17	65	1	7,8	750	0,4	0	0	5,1	0
26/01/1993	160	75	237	0	4	120	23	68	2	7,7	886	0,6	0	0	7,3	0
26/05/1993	91	57	216	0	3	63	18	65	1	7,4	659	2,5	0,02	0,03	7,4	0
15/10/1993	213	108	227	0	3	2	28	71	3	7,7	935	1,2	0	0	6,8	0
01/06/1994	144	61	255	0	4	100	18	70	1	7,7	845	1	0	0	18	0
29/04/1995	221	86	215	0	2	151	15	92	2	7,6	1103	0,9	0	0	7,2	0
14/09/1995	211	79	285	0	3	137	26	82	2	7,6	1042	0,9	0	0	8,3	0
29/10/1996	138	48	106	7	1	52	24	43	1	8,2	659	0,5	0	0	5,9	0
23/04/1997	168	60	183	0	3	111	15	70	1	8,0	882	1,1	0	0	4,5	0
27/05/1998	28	20	187	0	1	15	9	59	1	7,8	421	1,8	0	0	4,7	0
16/09/1998	194	105	228	0	6	125	18	83	2	8,0	998	0,8	0	0	5,5	0
09/04/1999	114	74	188	0	3	78	15	67	1	8,1	717	1,3	0	0	4,4	0
12/08/1999	208	112	227	0	3	138	22	91	2	7,9	1101	1,1	0	0	5,4	0
18/11/1999	95	44	201	0	7	56	12	68	1	7,9	646	0	0	0	4,1	0
10/05/2000	61	24	186	0	2	37	8	62	1	7,8	540	1	0	0	4,3	0
18/05/2000	100	7	199	0	2	55	11	66	1	8,1	617	1	0,05	0	4,2	0
21/09/2000	214	25	166	0	2	132	10	64	2	7,9	1068	1,3	0	0	5	0
02/04/2001	97	41	141	0	3	51	10	54	8	8,0	539	0,9	0	0	4,5	0
31/08/2001	220	81	135	0	15	155	23	93	0	7,6	1324	0,7	0	0	5,3	0
03/04/2014	181	63	108	0	13	238	13		4	8,2	902			0,81		
12/11/2014	340	79	242	0	2	228	24	81	3	7,9	1423			0	5,3	0
MÁXIMO	340	112	900	7	15	238	28	93	8	8,2	1423	2,5	0,05	0,81	18	0,01
MÍNIMO	28	7	106	0	0	2	5	43	0	7,7	421	0	0	0	0	0
MEDIA	155,2	59,9	223,7	0,9	3,6	98,3	16,7	70,0	1,7	7,9	851,1	0,9	0,0	0,0	5,5	0,0

Nota: Los análisis de fecha 2014 han sido realizados en este proyecto.