

Junta de Explotación 3 - CUENCA DEL IREGUA		% MASb en Junta	Recursos NO comprometidos MASb (RNC) (hm ³ /a)	Parte RNC proporcional a MASb (hm ³ /a)	Índice de calidad (Ic)	
Masas de Agua Subterránea					Serie histórica	Serie Actual
090.048	ALUVIAL DE LA RIOJA- MENDAVIA	26,2 %	14,61	3,83	Bueno	Malo (Nitratos)
090.065	PRADOLUENGO- ANGUIANO	54,5 %	6,44	3,51	Bueno	Bueno
090.069	CAMEROS	20,3 %	21,13	4,29	Bueno	Malo (Sulfatos, Magnesio, Sodio, Conductividad)

Tabla 4. Recursos Hídricos e Índices de Calidad en la Junta de Explotación del Iregua de la CH del Ebro

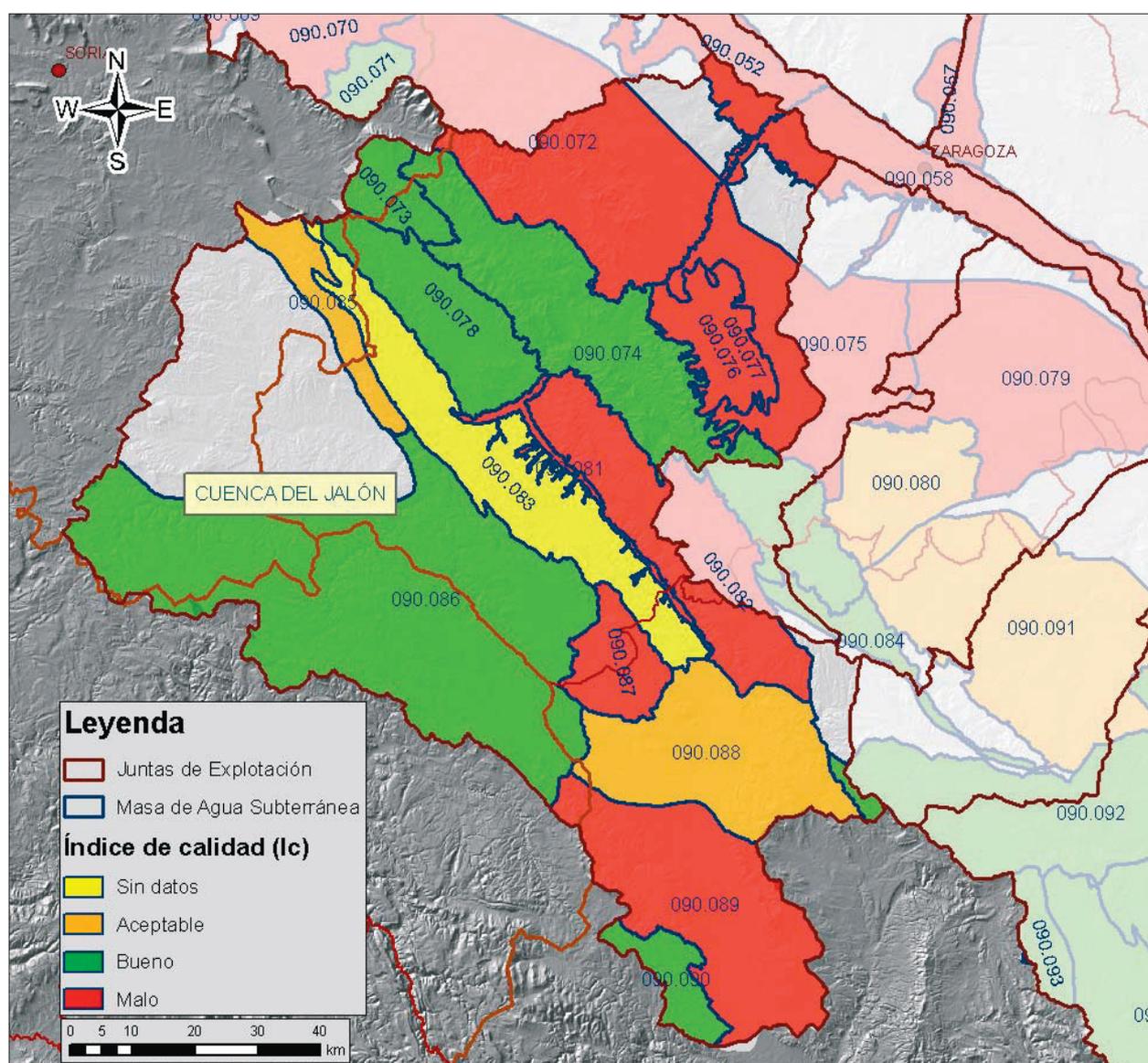


Figura 16. Índice de calidad de la Junta de Explotación de la Cuenca del Jalón. de la CH del Ebro

- Cuenca del Iregua en la tabla 4. También se presenta, en la figura 16, el mapa de la Junta de Explotación.
- Cuenca del Jalón de la Demarcación del Ebro

Zonas sensibles ante la explotación intensiva

Para el análisis de zonas sensibles se han tenido en cuenta, fundamentalmente, las figuras de protección existentes en la Demarcación Hidrográfica. Los resultados óptimos se obtendrían mediante un análisis de aquellas zonas que muestran dependencia directa o indirecta de las aguas subterráneas, pero por desgracia, se dispone parcialmente de tal información. En los PES existentes, se analiza la vulnerabilidad de las zonas de alto valor ambiental frente a situaciones de sequía, pero no se determina la dependencia de las mismas de las aguas subterráneas.

Como ejemplo se presenta, en la figura 17, el mapa de la Demarcación Hidrográfica del Tajo, que recoge de forma resumida las zonas que se deben analizar en una situación de sequía.

En todas estas zonas, debería de existir un análisis de la vinculación a las aguas subterráneas. Para efectuar su valoración únicamente se ha dispuesto de los resultados obtenidos en la "Identificación y caracterización de la interrelación entre aguas subterráneas,

cursos fluviales, descargas por mananciales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico", uno de los trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas del acuerdo para la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua, al Instituto Geológico y Minero de España.

Zonas sensibles por sistemas de explotación.

Como ejemplo de la presentación de resultados en la tabla 5, aparecen las zonas protegidas situadas en el Sistema de Explotación 02-Tiétar, de la Demarcación Hidrográfica del Tajo.

La tabla recoge las masas de agua subterránea que existen en el sistema de explotación, indicado para cada una de ellas el tipo de figura, su nombre y la superficie que ocupa.

Para presentar gráficamente los resultados se recoge el resumen del Sistema de Explotación Bajo Tajo-Extremadura en la figura 18, con los resultados obtenidos en el Índice de Explotación (Ie), y con las zonas protegidas existentes. En este sistema no existen MASb con explotación intensiva (disponibilidad de recursos condicionada), en la que existan figuras de protección definidas.

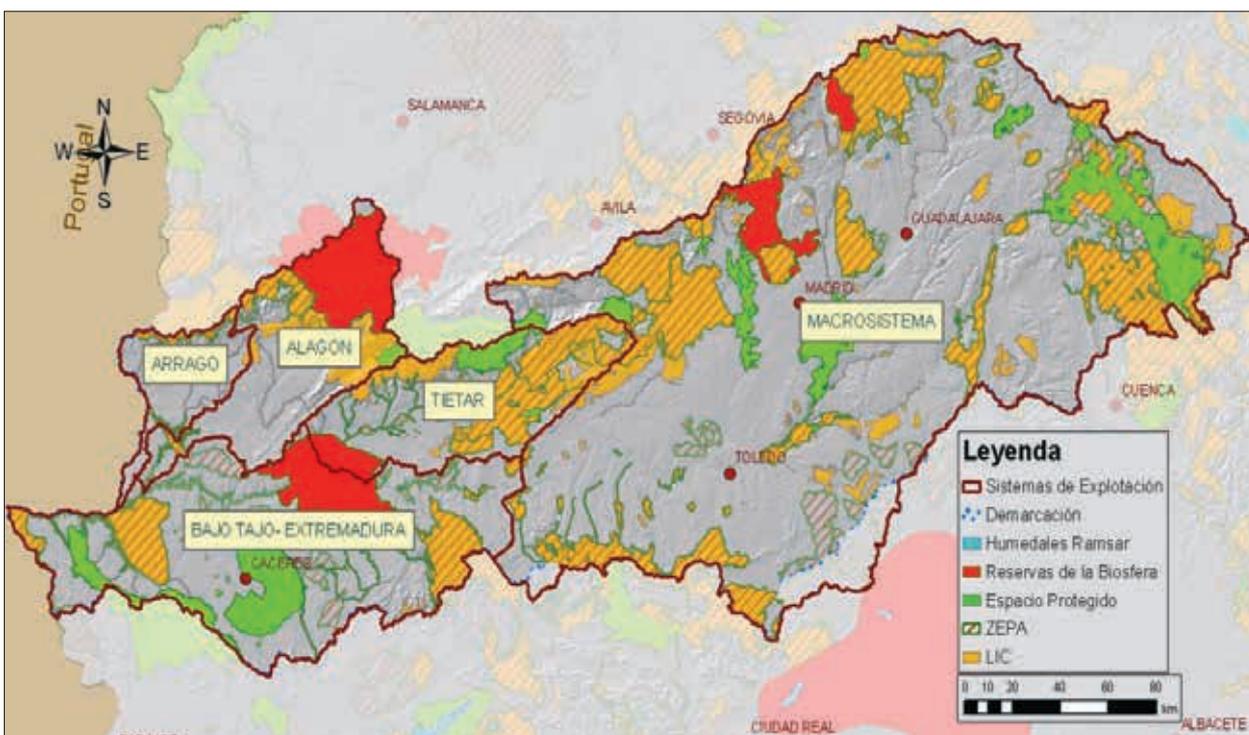


Figura 17. Figuras de Protección en la Demarcación Hidrográfica del Tajo

MASb	FIGURA	NOMBRE	SUPF en MASb en ha
030.015 (TALAVERA)	LUGAR DE INTERÉS COMUNITARIO (LIC)	LLANURAS DE OROPESA, LAGARTERA Y CALERA Y CHOZAS (ES0000168)	278
		SIERRA DE SAN VICENTE Y VALLES DEL TIÉTAR Y ALBERCHE (ES4250001)	2.077
	ZONA DE ESPECIAL PROTECCIÓN PARA LAS AVES (ZEPA)	LLANURAS DE OROPESA, LAGARTERA Y CALERA Y CHOZAS (ES0000168)	311
		VALLE DEL TIÉTAR Y EMBALSES DE ROSARITO Y NAVALCÁN (ES0000089)	2.077
030.022 (TIÉTAR)	ÁRBOLES SINGULARES	ENCINA LA MARQUESA	3
	LUGAR DE INTERÉS COMUNITARIO (LIC)	MONFRAGÜE (ES4320077)	625
		CAÑADA DEL VENERO (ES4320062)	2.187
		RIO TIETAR (ES4320031)	4.249
		LLANURAS DE OROPESA, LAGARTERA Y CALERA Y CHOZAS (ES0000168)	9.032
		VALLE DEL TIÉTAR (ES4110115)	11.322
		SIERRA DE SAN VICENTE Y VALLES DEL TIÉTAR Y ALBERCHE (ES4250001)	39.422
	PARQUE NATURAL	MONFRAGUE (E4329302)	625
	RESERVA DE LA BIOSFERA	MONFRAGUE	14.008
	RESERVA FLUVIAL	SOTOS DEL RÍO GUADYERBAS Y ARENALES DEL BALDÍO DE VELADA	1.455
	ZONA DE ESPECIAL PROTECCIÓN PARA LAS AVES (ZEPA)	CHARCA DEHESA BOYAL NAVALMORAL (ES0000411)	9
		COMPLEJO LAGUNAR EJIDO NUEVO (ES0000409)	29
		RIO Y PINARES DEL TIETAR (ES0000427)	7.585
		LLANURAS DE OROPESA, LAGARTERA Y CALERA Y CHOZAS (ES0000168)	9.069
		VALLE DEL TIÉTAR (ES0000184)	12.111
		MONFRAGÜE Y LAS DEHESAS DEL ENTORNO (ES0000014)	14.008
	VALLE DEL TIÉTAR Y EMBALSES DE ROSARITO Y NAVALCÁN (ES0000089)	39.076	

Tabla 5. Espacios naturales protegidos en el Sistema de Explotación Tiétar de la DH del Tajo

Recursos disponibles en situaciones extremas

A continuación, se sintetizan los resultados obtenidos a nivel de Demarcación, en agrupándolos en tres categorías:

- Aspectos cuantitativos: disponibilidad de recursos.
- Aspectos cualitativos: calidad de los recursos para uso en abastecimiento urbano (aunque no es descartable la posible utilización para otros usos).
- Aspectos mixtos: combinación de los dos aspectos an-

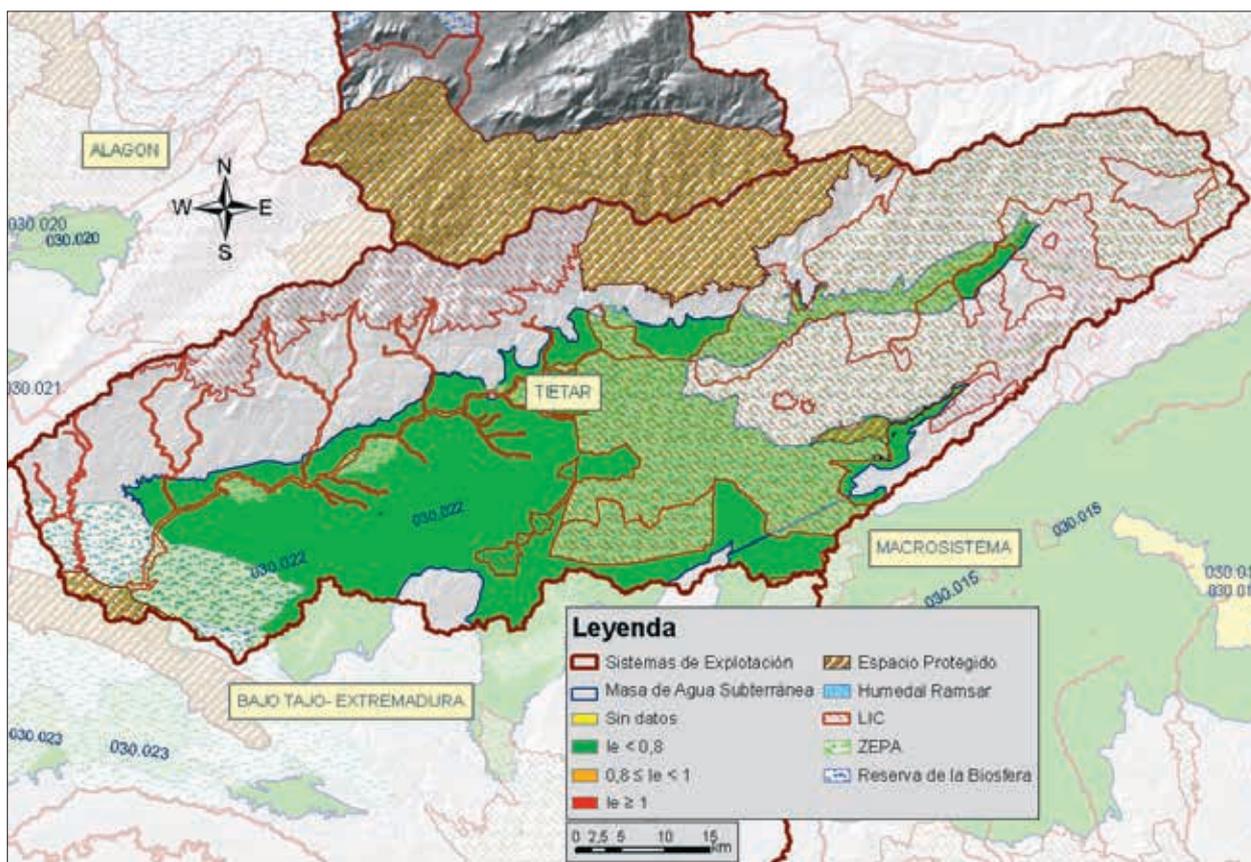


Figura 18. Espacios naturales protegidos en el Sistema de Explotación Bajo Tajo-Extremadura

teriores para la selección de los recursos disponibles más adecuados.

Disponibilidad de recursos

Los datos calculados de recursos no comprometidos de cada demarcación se agrupan por Sistemas de Ex-

plotación, presentándose en tres formatos (diagramas de barras, cuadros y mapas) según se desee sintetizar o presentar más ampliamente la información obtenida.

A continuación se recogen los obtenidos en la Demarcación Hidrográfica del Duero (figura 19).

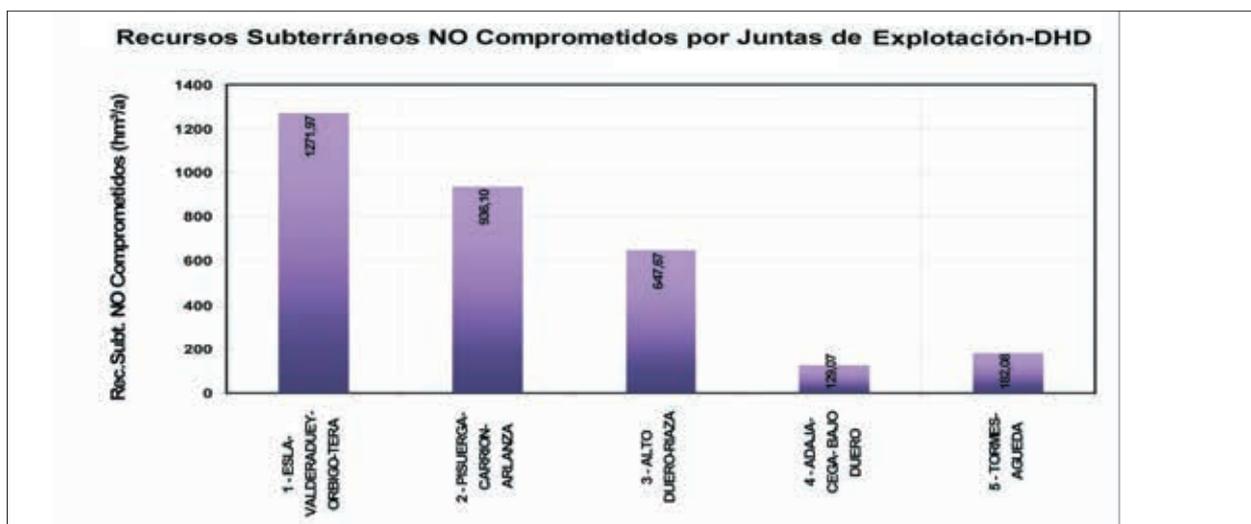


Figura19. Recursos Subterráneos no Comprometidos en la DH del Duero

Sistema de Explotación	Nº MASb	Nº MASb completas	Nº MASb compartidas	Recursos Renovables (RREN) (hm ³ /a)	Requerimientos Ambientales (RMED) (hm ³ /a)	Recursos Disponibles (RDIS) (hm ³ /a)	Extracciones (B) (hm ³ /a)	Recursos NO comprometidos (RNC) (hm ³ /a)	Índice de Explotación (Ie)
1 - ESLA-VALDERADUEY- ORBIGO-TERA	17	16	1	1669,14	255,17	1413,97	148,39	1271,97	0,21
2 - PISUERGA-CARRION- ARLANZA	16	10	6	1207,43	212,28	995,15	59,05	936,10	0,09
3 - ALTO DUERO-RIAZA	19	11	8	854,03	156,70	697,33	49,66	647,67	0,09
4 - ADAJA- CEGA- BAJO DUERO	13	1	12	497,23	70,21	427,01	394,91	129,07	0,57
5 - TORMES-AGUEDA	9	9	0	329,08	53,00	276,08	94,00	182,08	0,16
SUMA	74,00	47,00	27,00	4556,91	747,37	3809,54	746,00	3166,89 ⁽¹⁾	0,23

Tabla 6. Evaluación de Recursos Hídricos Subterráneos Disponibles y NO Comprometidos por Sistemas de Explotación en la DH

¹ La relación RDIS – B = RNC no es aplicable de forma directa a la síntesis de datos, puesto que en los Sistemas de Explotación existen MASb en las que las extracciones (B) son superiores a los Recursos Disponibles (celdas sombreadas). En esos casos RNC = 0 (no puede tomar valores negativos).

En las tablas, un ejemplo de ellas es la tabla 6, en ella se muestran los recursos NO comprometidos agrupados por sistema de explotación, los cuales estarían disponibles para su posible utilización. Se ha sombreado aquellos casos en los que existen MASb donde RNC=0, debido a que sus extracciones (B) superan al recurso disponible (RDIS). Además, algunas MASb son compartidas entre sistemas

de explotación, por lo que el recuento global de MASb es superior al real (84 en vez de 60 MASb reales).

La representación cartográfica (figura 20) presenta la situación de los recursos en cada masa de agua de la Demarcación, en función de su índice de explotación, agrupadas por sistemas de explotación.

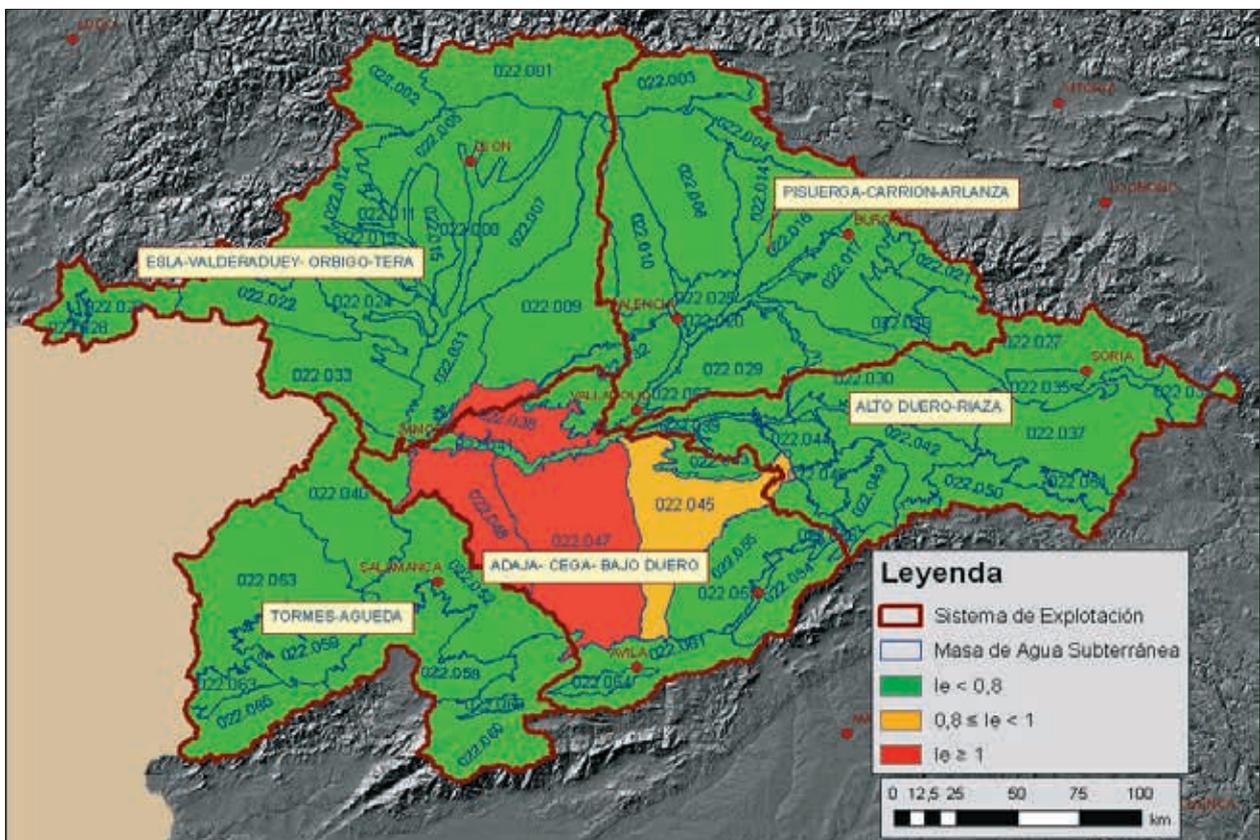


Figura 20. Índices de Explotación de las Masas de Agua Subterránea en la DH del Duero

Calidad de los recursos para abastecimiento urbano

Atendiendo a la calidad de los recursos disponibles para su utilización en abastecimientos urbanos, y considerando que:

- Cuando se dice que la calidad para abastecimiento urbano es *buena*, lo es porque *ninguno de los parámetros analizados* (conductividad, nitratos, sulfatos, sodio y magnesio) superan el 75% del contenido máximo permitido por la legislación para cada uno de ellos (R.D. 140/2003), en la última campaña medida.
- Cuando se dice que la calidad para abastecimiento urbano es *aceptable*, lo es porque alguno de los parámetros analizados (o todos) supera el 75% del contenido máximo permitido, pero *ninguno supera el citado límite*, en la última campaña medida.
- Cuando se dice que la calidad para abastecimiento urbano es *mala*, lo es porque alguno de los parámetros analizados (o todos) *supera el contenido máximo permitido* en la última campaña medida, fijando la calidad el peor valor de los obtenidos.

Aunque se ha dicho anteriormente la calidad se ha cuantificado mediante el cálculo del Índice de calidad (*Ic*) para la última campaña disponible, quedando clasificadas las MASb según el peor de los valores obtenidos. También se recalca en el hecho de que obtener una calidad mala para utilización como abastecimiento urbano, no significa que el agua no pueda ser utilizada en otros usos (por ejemplo agricultura).

Los resultados se han resumido en tablas y mapas. Así en la tabla 7 y figura 21 aparecen como ejemplo la síntesis de los resultados obtenidos para la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. Indicando el Índice de Calidad de las masa de agua subterránea y el sistema de explotación al que pertenece

Disponibilidad de los recursos en función de su utilización

El análisis de la disponibilidad de recursos en función de su utilización para abastecimiento urbano, se presenta combi-

Sistema de Explotación	Nº MASb	Nº MASb completas	Nº MASb compartidas	Índice de calidad (Ic)				
				Bueno	Aceptable	Malo	Sin datos	Parámetros fuera de límite
01-SALADO DE MORON	1	0	0	0	0	1	0	nitratos, sodio
02-CAMPIÑA SEVILLANA	4	1	3	0	0	3	1	nitratos, sulfatos, magnesio, sodio, conductividad
03-ALTO GENIL	14	8	6	10	1	3	0	nitratos, sulfatos, magnesio, sodio
04-GUADAJOZ	8	2	6	5	1	2	0	nitratos, magnesio, sulfatos
05-JAEN	8	4	4	7	0	1	0	sulfatos
06-HOYA DE GUADIX	6	2	4	4	0	2	0	sulfatos, magnesio, sodio
07-ALTO GUADIANA MENOR	9	7	2	5	1	2	1	sulfatos, magnesio
08-RUMBLAR	1	1	0	1	0	0	0	
09-GUADALMELLATO	1	0	1	0	0	1	0	nitratos
10-BEMBEZAR-RETORTILLO	1	0	1	1	0	0	0	
11-RIVERA DE HUESNA	1	0	1	1	0	0	0	
12-VIAR	1	0	1	1	0	0	0	
13-SEVILLA	1	0	1	1	0	0	0	
14-ALMONTE- MARISMAS	3	1	2	1	0	2	0	nitratos
15-REGULACION GENERAL	25	13	12	10	2	12	1	nitratos, sulfatos, magnesio, sodio, conductividad
SUMA	84	39	44	47	5	29	3	

Tabla 7. Calidad por Sistemas de Explotación en la DH del Guadalquivir

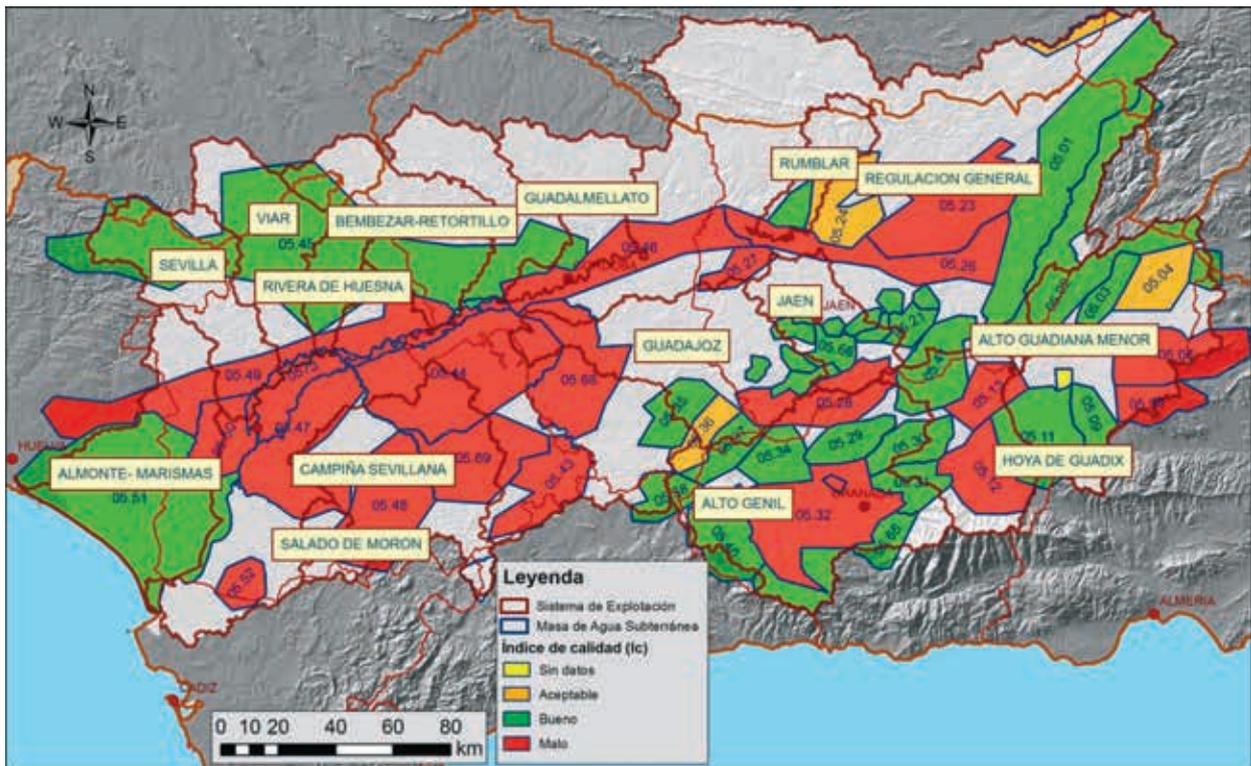


Figura 21. Sistemas de Explotación de Recmsos Hídricos e Índice de calidad de las MASb en la DH del Guadalquivir

nado los resultados obtenidos de tal forma que se obtenga una visión de la distribución cuantitativa y cualitativa de las MASb de la demarcación, como ejemplo se recogen los obtenidos en la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

En la figura 22 se sintetizan gráficamente los recursos subterráneos no comprometidos en cada sistema de explotación, indicando la calidad que tienen para su utilización en el abastecimiento urbano

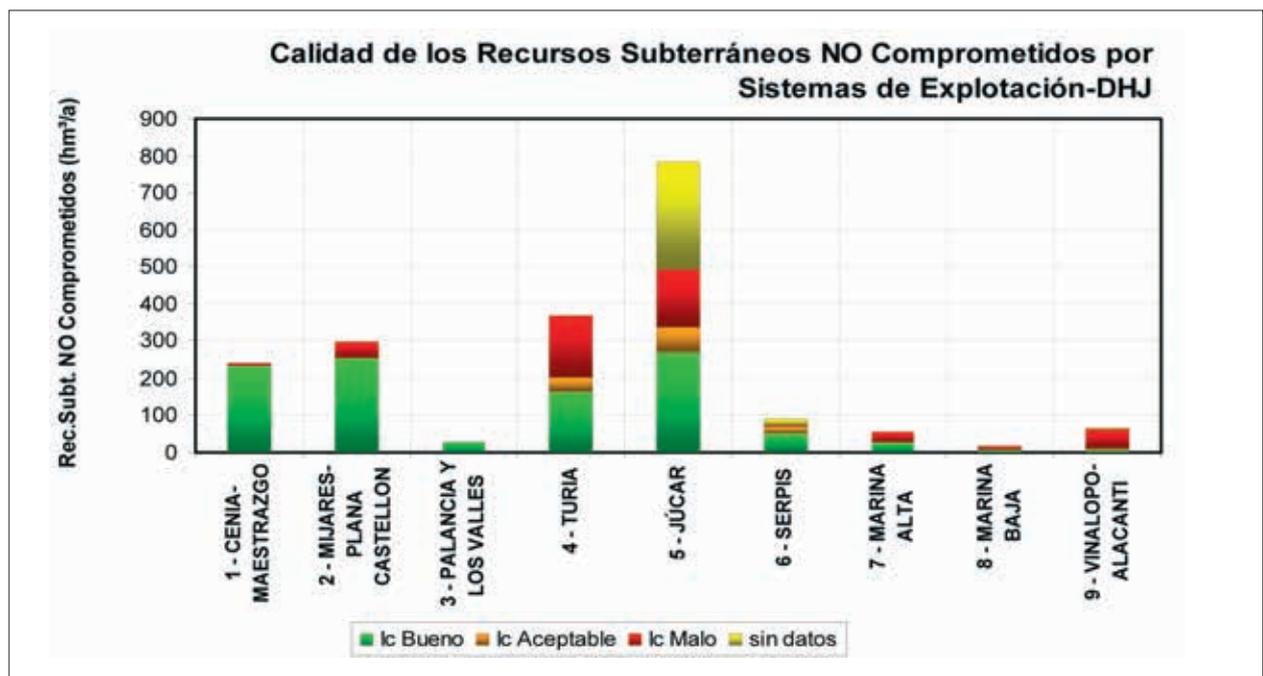


Figura 22. Calidad de los Recursos NO Comprometidos en la DH del Júcar

Sistema de Explotación	Nº MASb	Nº MASb completas	Nº MASb compartidas	Índice de Explotación (Ie)	Recursos NO comprometidos totales (RNC) (hm³/a)	Recursos NO comprometidos totales (RNC) según Índice de calidad (Ic) (hm³/a)				
						Bueno	Aceptable	Malo	Sin datos	Parámetros fuera de límite
01 - CENIA-MAESTRAZGO	6	5	1	0,40	240,70	234,84	0	5,86	-	nitratos, sodio
02 - MIJARES-PLANA CASTELLON	9	4	5	0,25	297,46	256,25	0	41,21	-	nitratos, sulfatos, magnesio
03 - PALANCIA Y LOS VALLES	3	1	2	0,40	29,54	28,39	0	1,15	-	nitratos, sulfatos, magnesio
04 - TURIA	16	9	7	0,37	367,85	163,51	40,70	163,64	-	nitratos, sulfatos, magnesio
05 - JÚCAR	29	24	5	0,37	783,67	270,71	66,13	158,46	288,38	nitratos, sulfatos, magnesio, conductividad
06 - SERPIS	10	5	5	0,37	90,35	51,14	20,60	0,64	17,96	nitratos
07 - MARINA ALTA	10	7	3	0,64	57,22	29,02	0	26,40	1,80	nitratos, magnesio, sodio, conductividad
08 - MARINA BAJA	4	2	2	0,53	17,52	6,20	0	11,32	-	nitrito, sulfatos, magnesio, sodio, conductividad
09 - VINALOPO-ALACANTI	20	16	4	1,79	66,19	7,54	1,38	53,48	3,79	nitratos, sulfatos, magnesio, sodio, conductividad
SUMA	107	73	34	0,57	1950,50	1047,60	128,81	462,16	311,93	

Tabla 8. Recursos Hídricos Subterráneos Disponibles, NO Comprometidos y calidad de los mismos por Sistemas de Explotación en la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

La presentación de número de MASb, el índice de explotación, volumen de recursos no comprometidos y la clasificación de su calidad, indicando los parámetros que se sitúan fuera del límite se detalla en la tabla 8.

La síntesis final de los trabajos se ha plasmado en el plano "Disponibilidad de Recursos en función de su utilización" en el cual mediante una matriz de colores y tramas, se presenta la disponibilidad de recursos y su calidad para el abastecimiento (figura 23).

CONCLUSIONES

La experiencia adquirida durante estos episodios de sequía pasados, ha demostrado como la explotación controlada de recursos subterráneos de determinadas Masas de Agua Subterránea, puede contribuir a paliar los efectos nocivos de la sequía (merma en los recursos

disponibles), ofertando recursos hídricos complementarios para solventar los déficit. Su explotación se ha efectuado sin que se produzcan alteraciones sensibles, ni en el funcionamiento hidrodinámico de los sistemas hidrogeológicos explotados de forma temporal, ni en los sistemas ecológicos vinculados con éstos. Desarrollándose, por tanto, en estos supuestos, las actuaciones en un marco de gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

La planificación hidrológica española ha establecido en su legislación de Gestión de Sequías, la necesidad de realizar una serie de actuaciones que culminan con el Plan Especial de Alerta y Eventual Sequía de cada Demarcación Hidrográfica. Esto ha motivado el trabajo realizado para cada demarcación, con el título de "Actuaciones en Aguas Subterráneas para la Revisión de los Planes de Sequía", pretendiendo que en futuras actualizaciones de los Planes se unifiquen los criterios para optimizar su utilización.

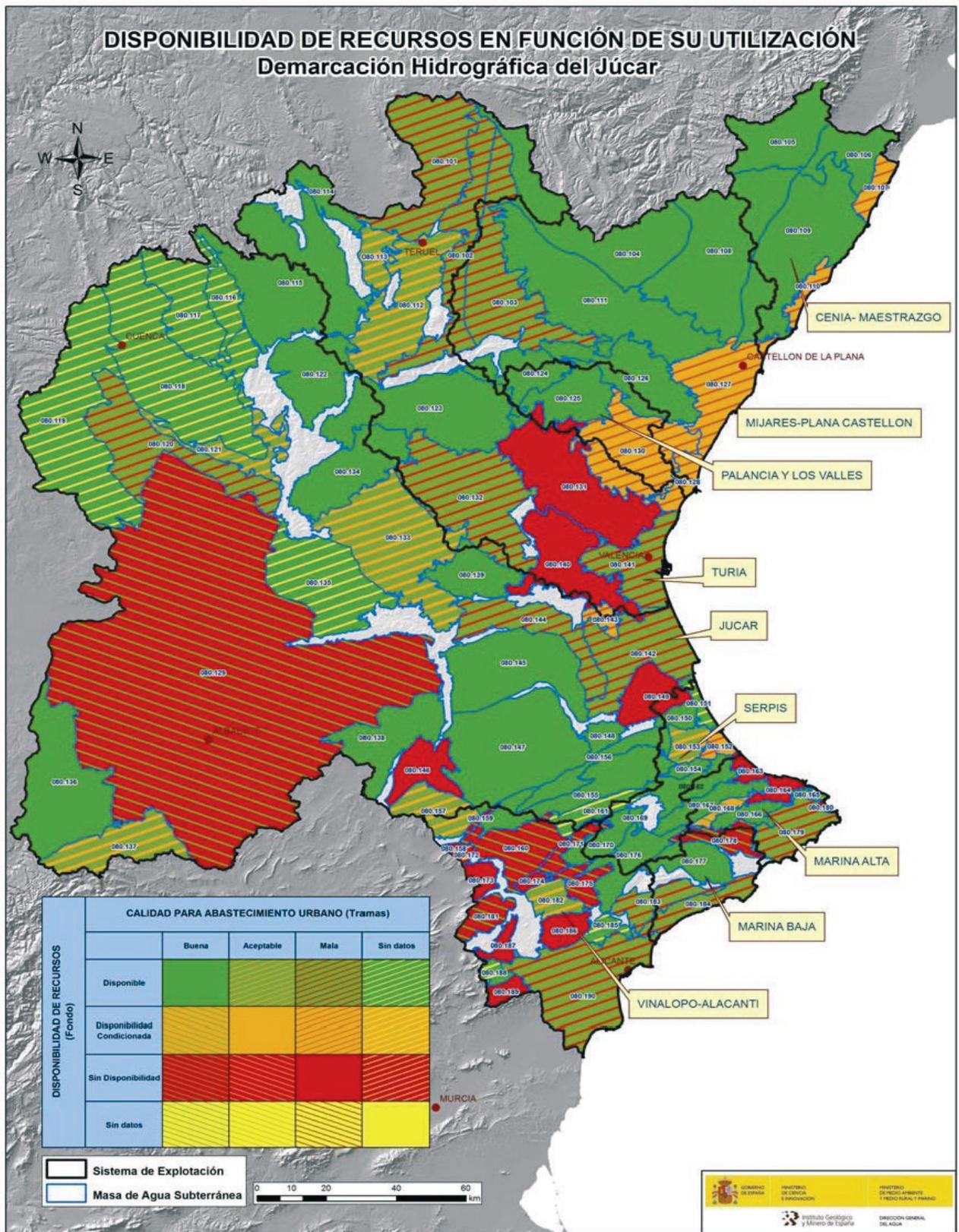


Figura 23. Disponibilidad de recursos en función de su utilización. D. H. del Júcar

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pernia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Duero*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.
- Pernia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Tajo*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.
- Pernia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.
- Pernia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Segura*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.
- Pernia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Júcar*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.
- Pernia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Ebro*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.
- Pernia, J.M.; Ruiz-Hernández, J.M.; Castaño, S.; Herrero, J.L. (2010): *Sustainable use of groundwater for prolonged droughts*. European Groundwater Conference. Groundwater Protection in the UE. Proceedings, p. 121. Madrid.

INCORPORACIÓN DE FUENTES DE DATOS, MÉTODOS Y CRITERIOS
GEOLÓGICOS EN EL ANÁLISIS Y LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS
INUNDABLES POR AVENIDAS TORRENCIALES

Andrés Díez-Herrero,
Julio Garrote Revilla
M^a Guillermina Garzón Heydt
Luís Laín Huerta
Miguel Llorente Isidro
Carlos G. Morales Rodríguez
José Antonio Ortega Becerril
María Teresa Ortega Villazán
Ángel Salazar Rincón

INCORPORACIÓN DE FUENTES DE DATOS, MÉTODOS Y CRITERIOS GEOLÓGICOS EN EL ANÁLISIS Y LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS INUNDABLES POR AVENIDAS TORRENCIALES

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD

El desarrollo de esta actividad tiene como objetivo fundamental el de servir de asesoramiento científico-técnico a la Dirección General del Agua (DGA), y en particular a las labores llevadas a cabo por el denominado "Grupo de Inundaciones", equipo de trabajo espejo nacional del Grupo F europeo, que la DGA constituyó en el año 2005 para el seguimiento de la implantación de la Directiva Marco del Agua y posteriormente el seguimiento y transposición de la Directiva de Gestión del Riesgo de Inundaciones; y al cual el IGME se había incorporado a inicios del año 2008 por invitación de su presidente (Figura 1).

Originalmente, el encargo a los científicos y técnicos del IGME fue realizar una recopilación de los antecedentes más relevantes y el estado del arte sobre metodologías y criterios geológicos y geomorfológicos susceptibles de ser incorporados en el análisis y la cartografía de las zonas inundables por avenidas torrenciales, tal y como reza el título de la actividad. Pretendía ser un complemento y alternativa de los estudios realizados a través de las encomiendas y acuerdos firmados por la DGA con otras instituciones (CEDEX, Dirección General de Costas, Dirección General de Protección Civil y Emergencias, INDURROT...) para la incorporación de métodos y criterios hidrológicos, hidráulicos, históricos, ecológicos, etc.

El IGME cuenta con una dilatada y contrastada experiencia en la incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el estudio de las avenidas torrenciales e inundaciones (ver al respecto los artículos de Díez y Laín, 1998; y Llorente *et al.*, 2006). Desde los antecedentes remotos de los primeros trabajos de la Comisión del Mapa Geológico de España a cargo de Casiano de Prado, pasando por las recopilaciones de las descripciones provinciales, hasta la época reciente (último cuarto de siglo) en la que se han publicado infinidad de guías, estudios y mapas que incorporan, integran y

validan dichos métodos y criterios; entre ellos la edición del libro "Geología y prevención de daños por inundaciones" (Ayala, 1985), auténtico antecedente de estos trabajos; o la reciente publicación de libro "Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración", publicada en castellano y en inglés (Díez-Herrero *et al.*, 2008 y 2009b). La experiencia del IGME se centra fundamentalmente en criterios geológicos y geomorfológicos en la cartografía de áreas inundables y estudios de estimación de carga sólida transportada, obtenida por la experiencia acumulada y proyectos de investigación como Paleotagus, Georiada, Albuñol, Metavenidas, Dendro-Avenidas, RICAM, etc.; pero mantiene fluidos contactos y colaboraciones con otros grupos de investigación nacionales y extranjeros especializados en la incorporación de datos paleohidrológicos, y en la estimación de la variabilidad asociada al cambio global.

Por ello, tras examinar los requerimientos de la DGA, el equipo responsable del IGME decidió estructurar la actividad original en cuatro, que se corresponden con otros tantos aspectos en los que las ciencias geológicas y geomorfológicas pueden aportar métodos y criterios aplicados:

1. Incorporación de fuentes de datos paleohidrológicos
2. Incorporación de métodos de estimación de la carga sólida transportada
3. Incorporación de criterios geológicos y geomorfológicos en la cartografía de áreas inundables
4. Asesoramiento sobre la estimación de la variabilidad en la frecuencia y magnitud de avenidas asociada al cambio climático

Para llevarlo a cabo se consideró imprescindible contar en el equipo de trabajo con el grupo de investigación en Geomorfología Fluvial del Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas (UCM), de reconocido prestigio y dilatada experiencia en estos temas. También se solicitó la participación del equipo del IGME

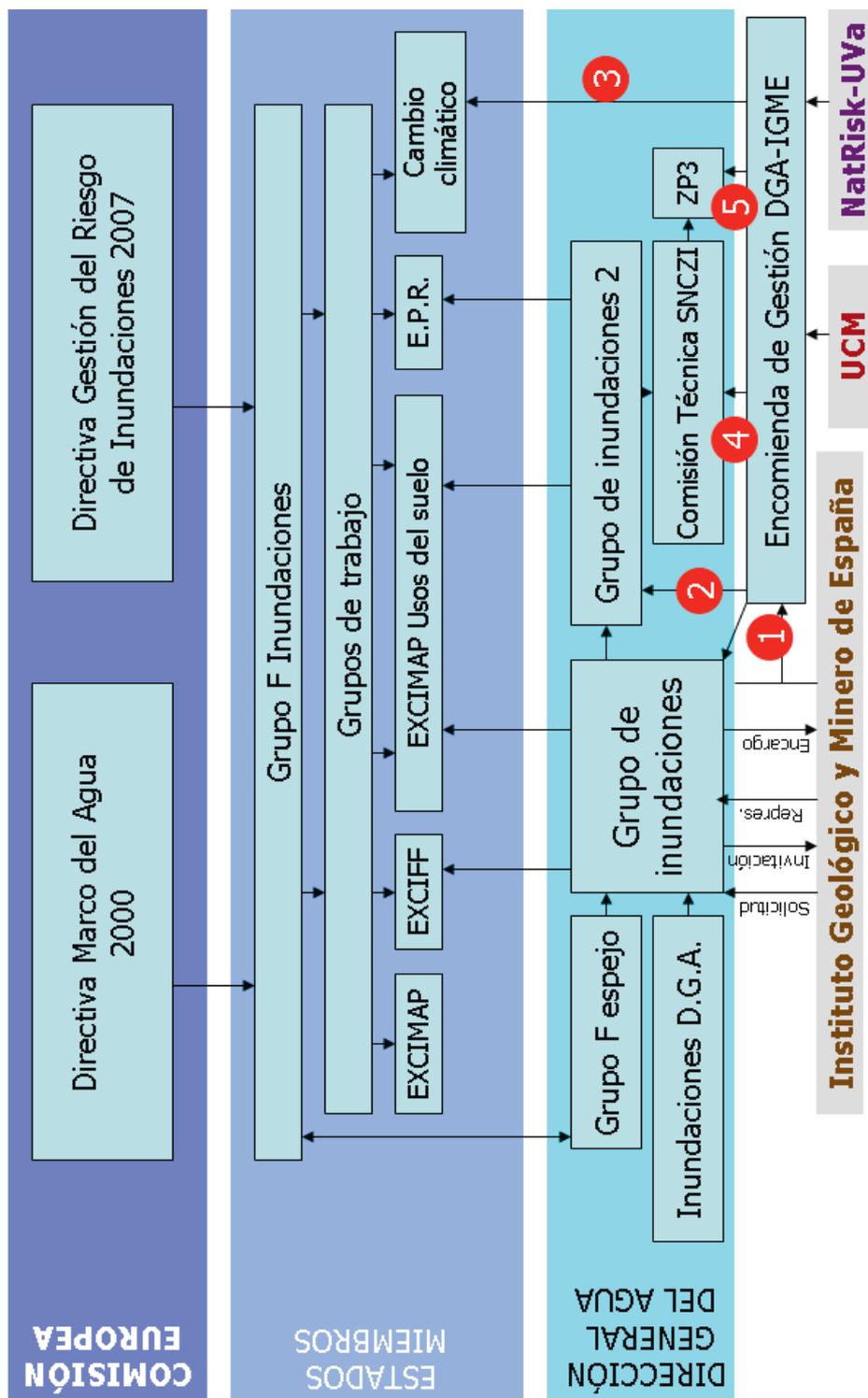


Figura 1. Marco conceptual en el que se ha desarrollado la Actividad 14 de la Encomienda, con indicación de los organismos e instituciones involucradas. Los números en los círculos rojos señalan tareas realizadas y documentos generados; su numeración corresponde al orden de los epígrafes de este artículo.

en la representación española dentro del grupo de trabajo sobre "Cambio Climático e Inundaciones", para la elaboración de los documentos de intercambio y discusión, y la presentación del estado de conocimientos en el *Thematic workshop on Climate Change and Flooding* del *Working Group F on Floods*, celebrado entre los días 8 y 10 de septiembre de 2009 en la localidad sueca de Karlstad.

Durante el proceso de gestación de la Encomienda se produjo además la publicación y entrada en vigor de la nueva modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, y la creación del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI). Ello supuso dos nuevos encargos complementarios al IGME por parte de la DGA a través del Grupo de Inundaciones: participar en la Comisión Técnica del Grupo en la que se elaborarían las guías metodológicas y las recomendaciones técnicas; y hacerse cargo de la ejecución de uno de los tres estudios piloto (ZP3, tramo medio-bajo del río Carrión) para la calibración y validación de dichas guías y métodos. Para este nuevo encargo se decidió contar con otro equipo de trabajo con experiencia en la zona de estudio, el grupo NatRisk de la Universidad de Valladolid.

RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE SOBRE LAS APLICACIONES DE LA GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA AL RIESGO DE INUNDACIONES

En primer lugar se llevó a cabo una amplia y exhaustiva recopilación bibliográfica sobre todo lo publicado respecto a criterios y métodos geológicos y geomorfológicos de aplicación al estudio de las avenidas torrenciales y sus riesgos asociados. Para ello se consultaron las principales bibliotecas especializadas de España en esta temática, como las ubicadas en las Facultades de Ciencias Geológicas y Geografía e Historia de la UCM, la del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, y las colecciones bibliográficas particulares de los autores. Pero además, y fundamentalmente, se realizaron búsquedas sistemáticas en bases de datos bibliográficas digitales en Internet, tanto para libros y colecciones, como para revistas científicas y otras publicaciones periódicas. Para ello se usaron motores de búsqueda genéricos (Google) y sobre todo herramientas específicas en plataformas y bases de datos (Web of Science, Scopus, GeoRef, Geobase, Pascal, ICYT, etc.). De esta forma se consiguió una recopilación, con recuperación de textos completos, de más de medio millar de registros directamente relacionados con la temática a analizar (Díez-Herrero et

al., 2009a); la bibliografía que acompaña a este artículo sólo es una ínfima selección de dicho listado. Destacar que esta recopilación se encontraba totalmente actualizada a fecha del año 2009, y además con un amplio espectro de procedencia geográfica de las aportaciones, gracias a las facilidades de Internet, suponiendo una mejora sustancial de anteriores síntesis realizadas en las décadas de 1980 y 1990.

La segunda fase de la tarea fue el análisis pormenorizado de todos y cada uno de los registros bibliográficos, con lectura, extracción de notas y resúmenes de los principales que podían aportar información de utilidad. Con todos estos resúmenes y notas se hizo una labor de síntesis y condensación de las principales ideas que a continuación se exponen como resultados en cada una de las cuatro subactividades, a los que se añade un anexo dedicado al papel de la geología en el proceso de transformación lluvia-escorrentía.

Incorporación de fuentes de datos paleohidrológicos

Las corrientes de las áreas montañosas de nuestro país tienen un notable déficit de fuentes de información meteorológica e hidrológica convencional (pluviómetros y estaciones de aforo), lo que unido a las dificultades para la modelación hidráulica en torrentes, hace que los métodos hidrológico-hidráulicos estandarizados para la delimitación de áreas inundables, tengan una serie de limitaciones y fuentes de error. Para paliar este déficit de información, las fuentes de datos paleohidrológicos pueden complementar, alargar e incluso suplir a las fuentes convencionales, permitiendo análisis estadísticos más fiables y representativos. Estas fuentes paleohidrológicas son tanto los depósitos producidos durante eventos de avenida pretéritos (SWD), como marcas de nivel alcanzado, e incluso el registro dendrogeomorfológico en las secuencias de anillos de árboles próximos a los cauces.

La paleohidrología estudia eventos de crecidas pasadas preservadas en el registro sedimentario, permitiendo conocer la magnitud y frecuencia de las avenidas independientemente del registro histórico. Se realizan en tramos no aluviales, en roca, y complementan un vacío de información existente, pues son muy útiles para calcular el calado máximo alcanzado por la crecida, y con ello su caudal máximo por modelización hidráulica y asignar un valor de magnitud y frecuencia al evento mediante su datación. El estudio conjunto de la información sistemática y no sistemática permite extrapolaciones en las fun-

ciones de frecuencia, y por tanto mejora notablemente la estimación de periodos de retorno.

Los datos paleohidrológicos utilizados más frecuentemente son los depósitos de remanso y de remolino (*slackwater deposits*, SWD) que representan la sedimentación local por la caída del pico del hidrograma. Otro tipo de información muy útil son los detritus flotantes (*floatsam*), las bandas de limos y las líneas o cicatrices erosivas que suelen constituir una banda continua a lo largo de las márgenes. Otro de los indicadores que están alcanzando un gran desarrollo son los daños en la vegetación, cicatrices y malformaciones, recrecimientos de árboles y raíces adventicias ocasionados por avenidas y datables por dendrocronología. Métodos clásicos basados en paleoflujos ó paleocompetencia muestran más incertidumbres.

Los depósitos indicadores de paleocrecidas corresponden a zonas de separación de flujo para diversos ambientes sedimentarios tales como confluencias de afluentes, cambios en las condiciones geométricas del valle (zonas de expansión o contracciones, etc.), desbordamiento

sobre la llanura de inundación en zonas protegidas, depósitos de sombra por obstáculo, abrigos rocosos y cuevas, entre los más propicios (Figura 2). Suelen acumularse varios niveles de sucesivas crecidas, que pueden estar separadas por periodos muy largos sin depósito. Construirán así una secuencia donde la separación de unos niveles de otros ha de hacerse por la presencia de intercalaciones arcillosas o depósitos no fluviales como coluviones (Figura 2), paleosuelos, bioturbaciones, indicadores erosivos, cambios en las características físicas del sedimento (color o tamaño de grano), espeleotemas, etc. Los depósitos suelen estar sujetos a la erosión parcial, creando superficies irregulares a techo que no se corresponden con la paleotopografía original. Sobre ellos pueden aparecer nuevas secuencias que fosilicen el nivel erosivo. El resultado final son secuencias estratigráficas muy complejas y difíciles de interpretar, lo que obliga a un análisis detallado y minucioso.

El trabajo con datos paleohidrológicos requiere asumir una serie de premisas previas como que el canal inundable ha de estar sobre roca estable y asegurar que no ha existido una variación significativa en la topografía del

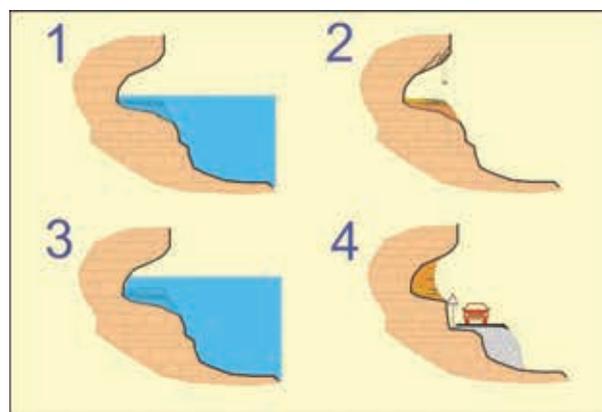
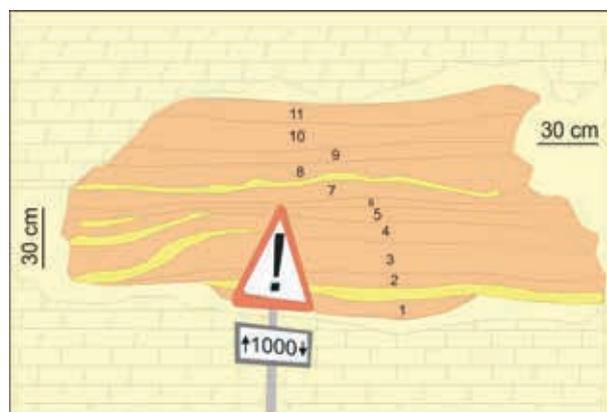


Figura 2. Ejemplo de depósitos de paleoinundaciones en un abrigo rocoso del cañón del Duratón (cuenca del Duero), donde se encuentra una secuencia de hasta 11 eventos de inundaciones extraordinarias en los últimos miles de años, separados por periodos con desprendimientos del techo del solapo que intercalan coluviones (niveles amarillos). Ver estudio completo en Díez-Herrero *et al.* (2005).

cauce. El método al calcular un caudal asignado a una altura mínima de las aguas subestima los valores finales. La cronología de paleoniveles puede establecerse mediante técnicas de datación arqueológicas, radioisótopos, termoluminiscencia o dendrocronología, como más frecuentes.

Los estudios de paleohidrología en la península Ibérica han comenzado recientemente pero se han desarrollado rápidamente dado el elevado potencial para su aparición de indicadores en tramos fluviales encajados (Benito *et al.*, 2008a), con incidencia en la región valenciana y murciana, cuenca del Tajo, Ebro y Guadiana, vertiente catalana y cuenca hidrológica del Sur. Bases de datos conteniendo fuentes paleohidrológicas a nivel mundial son GLOCOPH; y con información de España cabe señalar dos bases de datos, una para el río Tajo (*Paleotagus database*) implementada por investigadores del CSIC e IGME; y otra más amplia (SPHERE-GIS) que es, más bien, un sistema de información geográfica aplicado para el manejo de información procedente de las paleoinundaciones, pero también histórica, etc.

Incorporación de métodos de estimación de la carga sólida transportada

La mayor parte de las fórmulas y modelos numéricos empleados para el análisis hidrológico-hidráulico de las áreas inundables parten de la suposición de que el agua que circula por las corrientes fluviales se encuentra desprovista de cualquier carga sólida (agua limpia). Sin embargo, en nuestro país y especialmente durante eventos de avenidas torrenciales, esta suposición no es asumible desde el punto de vista científico-técnico. La importante carga sólida transportada hace cambiar parámetros del flujo, como la densidad y viscosidad, que varían los campos de velocidades y profundidades y la capacidad de carga (efecto de retroalimentación), y por lo tanto la peligrosidad asociada a las avenidas. Es posible incorporar métodos para estimar la magnitud de esa carga sólida transportada (tipo RUSLE-MUSLE, coeficientes de entrega, etc.) para mejorar los análisis y cartografías derivados.

El control de la tipología de transporte, así como de la concentración de sólidos dentro del flujo es un aspecto esencial para analizar el posible comportamiento del flujo, pues estas concentraciones pueden modificar las propiedades del fluido.

La realización de medidas fiables en campo es realmente difícil, y más las asociadas a la carga de fondo,

siendo los principales errores que se generan los relativos a las propias máquinas de medición y los debidos a las variaciones temporales tan extremas que se producen en este tipo de transporte, característica ésta innata a este tipo de proceso. Los métodos de medida utilizados para cuantificar este proceso de transporte pueden dividirse en dos grandes grupos: por un lado los métodos directos (como las trampas de sedimento o las estaciones totales de transporte de sedimento, con trampas automáticas de transporte de fondo que proporcionan un registro continuo del mismo), de los cuales podemos destacar en España los trabajos llevados a cabo en el tramo bajo del río Ebro, en los que tratan de estimar tanto el momento de inicio del movimiento de las partículas como las tasas de transporte y el efecto que sobre las mismas tiene la regulación hidrológica de los ríos mediante presas; y por otro los métodos indirectos (como trazadores o repetidas campañas de análisis en campo), utilizando grabaciones de video en los parches de arena y gravas para determinar el momento de inicio del movimiento de las partículas del fondo por ejemplo utilizando una placa metálica situada en el lecho del río y geófonos para registrar los pulsos que se generan por el golpeo de las partículas en su movimiento por el lecho del río. Ninguno de los métodos es enteramente satisfactorio, aunque las medidas indirectas se han manifestado como análisis aceptables que muestran pequeñas oscilaciones en los valores medios obtenidos para una época temporal concreta en tramos de no excesiva longitud.

Otro enfoque que ha tenido un amplio desarrollo en los últimos tiempos es el de los modelos de base física para la estimación de la erosión y producción de sedimento en una cuenca. Los modelos de base física se basan en el entendimiento de los procesos físicos de erosión y transporte de sedimento, y su descripción mediante ecuaciones que gobiernan la transferencia de masa, momento y energía. Debido a que se basan en ecuaciones de validez universal y sus parámetros poseen un significado físico, los modelos de base física pueden en teoría ser aplicados a partir de medidas directas de los valores de los parámetros, sin que sea necesario recurrir a la calibración a partir de registros empíricos. A grandes rasgos se pueden identificar dos tipos de modelos: *i)* modelos con una representación detallada de los procesos de erosión a partir de consideraciones conceptuales y físicas; y *ii)* modelos con una representación simplificada. Con frecuencia este último grupo muestra un elevado grado de empirismo y tiende a operar en un conjunto de resoluciones espacial y temporal amplias. Los modelos conceptuales

y de base física son generalmente capaces de operar tanto a resolución de evento como de forma continua, y suponen una representación espacial más detallada.

Todos estos análisis pueden verse alterados por la acción del hombre y su capacidad de modificación de su entorno, en nuestro caso las cuencas fluviales, de tal manera que se modifican las variables de primer orden que regulan el ciclo hidrológico. La modificación de la cobertura vegetal tiene además su influencia en el hidrograma de avenida de la cuenca; así diversos estudios muestran cómo la forma del hidrograma en dos cuencas próximas pero con distintas características de cobertura es diferente, siendo la evolución del pico de avenida más regular y lenta en la cuenca con mayor vegetación (arbórea), mientras que en la otra cuenca (con presencia mayoritaria de matorral) el pico del hidrograma es mayor, pudiendo presentar además varios picos en cuanto a la carga sólida, asociados a pequeños movimientos en masa del talud del cauce. Actividades mineras, industriales y urbanísticas, actuaciones hidrológico-hidráulicas, o las actividades forestales e incendios pueden provocar modificaciones significativas en la cuenca hidrológica, de tal forma que tanto los volúmenes de agua como su distribución temporal se pueden ver afectados, con los riesgos para las personas que esto trae acarreado.

Así, las variaciones en la carga sólida pueden provocar modificaciones tanto en parámetros morfológicos del cauce (dimensiones y forma, gradiente y patrón del canal) como en los parámetros dinámicos del fluido. Como resumen del comportamiento hidrodinámico de la mezcla agua con sedimento se puede indicar que existe un proceso de alejamiento del modelo newtoniano cuando se incrementa la concentración de sólidos; esta separación es lógicamente paulatina pero puede delimitarse en el entorno del 8 al 10% de concentración de finos, a partir del cual el comportamiento de la mezcla (flujo hiperconcentrado) se aleja totalmente del modelo newtoniano; en la zona intermedia (flujo cuasi-newtoniano), se puede utilizar la formulación clásica con algunas consideraciones y modificaciones. Otro parámetro que se ve modificado por la presencia de sedimento en el flujo es el Número de Reynolds, el cual desciende con el incremento de la concentración de sedimento para una velocidad y profundidad del flujo dadas; esto es así porque el incremento de la viscosidad con la concentración es mayor que el incremento de la densidad. Por tanto, puede esperarse que el grado de turbulencia del flujo disminuya con la concentración de sedimento dentro del mismo.

Incorporación de criterios geológicos y geomorfológicos en la cartografía de áreas inundables

Diversos parámetros y variables de naturaleza geológica controlan el fenómeno de las avenidas, desde la transformación lluvia-escorrentía con parámetros de claro condicionante litológico-edafológico como el umbral de escorrentía, hasta la variabilidad espacio-temporal del espacio inundable controlada por la dinámica fluvial del canal/es, pasando por la propagación de la onda de crecida influida por la configuración geomorfológica de la cuenca y la red de drenaje. Diversos trabajos y estudios proponen fórmulas y procedimientos para incorporar en los análisis y cartografías estos parámetros. Para ello es imprescindible conocer la configuración y dinámica del *bankfull* y el cauce fluvial, otros elementos geomorfológicos de la zona inundable, la movilidad del cauce y las particularidades de los abanicos aluviales.

El término caudal de bancos llenos se corresponde con la traducción del término anglosajón "*bankfull*" y su significado hace referencia al caudal máximo que es capaz de transportar el cauce sin que se produzca un desbordamiento del mismo que resultaría en la anegación u ocupación por las aguas de la llanura de inundación adyacente al cauce. Este caudal tiene además implicaciones morfológicas en el sentido de capacidad de formación y modificación del cauce. A partir de esta definición, la selección del caudal de bancos llenos como modificador principal de la morfología del canal se debe a la premisa de que la acción morfogenética de este caudal, que se alcanza casi todos los años (en latitudes medias y climas húmedos), es mayor que la que pueden tener caudales asociados a periodos de retorno mayores, los cuales pese a tener una energía mayor y por tanto una mayor capacidad de modificación de las orillas del canal, por su menor recurrencia poseen una capacidad neta de cambio inferior.

Debido a la gran diversidad geomorfológica de los cauces sobre los que se ha llevado a cabo su estimación, así como los diferentes dominios climáticos sobre los que se desarrollan, existen variadas aproximaciones a la estimación del caudal de bancos llenos, pudiendo agruparlas en función del tipo de aproximación en dos grandes grupos: las que desde un punto de vista hidrológico tratan de asignar un cuantil de periodo de retorno a dicho caudal, aunque ante la variabilidad de los resultados existen trabajos que ponen de manifiesto la dependencia del valor del caudal de bancos llenos respecto a variables tales

como la pendiente del cauce, el régimen climático o el tipo de río; y las que tratan de delimitar la morfología del cauce asociado al caudal de bancos llenos a partir de criterios geomorfológicos. A este respecto, dos trabajos indispensables son los publicados por Williams (1978) y Harrelson *et al.* (1994).

De manera complementaria a los trabajos de identificación de los elementos morfológicos asociados a la dinámica fluvial, que nos permiten la determinación de la zona activa del canal, el trabajo de delimitación de la zona de migración activa del canal nos ha de servir para una mejor estimación de las áreas asociadas a la dinámica activa del cauce, y por tanto con posibilidad de verse afectadas por la misma en un periodo de tiempo 'relativamente' corto. Con este objetivo en mente y de una manera muy analítica, algunas instituciones han editado guías prácticas para facilitar tales fines, como el Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washington, ilustrando acerca de los elementos en consideración a la hora de la delimitación de la zona activa del canal así como la modelación de la misma en diferentes escenarios fluviales.

En la modificación del reglamento del dominio público hidráulico se recoge la necesidad de contemplar en las zonas inundables la ocurrencia de aportes en masa y de coladas de derrubios. En este sentido hay una serie de factores que deben tenerse en cuenta tanto en mapas, fotos aéreas como en campo, que ofrecen indicios de actividad reciente sobre el propio cauce pero también fenómenos de cabecera y valles de aproximación capaces de desencadenar eventos que puedan afectar a los sistemas aluviales aguas abajo. Pero las cuencas más peligrosas para la producción de coladas de derrubios, no son precisamente las que más depósitos transportan en la actualidad, y las más susceptibles potencialmente pueden ser las que no han funcionado recientemente, por lo que sus laderas tendrán más materiales disponibles para su futura removilización..

Como indicadores morfológicos de actividad hay que analizar todos los tramos que conforman un sistema torrencial: la cabecera, el torrente de transferencia, la actividad de coladas de derrubios y ocurrencia de avulsiones en el abanico. Finalmente, otros aspectos a tener en cuenta son posibles cambios de vegetación, usos del suelo o actividades antrópicas que actúen como factores desestabilizadores o detonadores de procesos. Se pueden establecer además una serie de criterios morfométricos para la estimación de la actividad de abanicos, tales como la relación entre la superficie de la cuenca y

del abanico con la pendiente, la relación entre las pendientes del abanico y de la cuenca hasta la influencia del espacio de acomodación.

El concepto de umbral es muy importante para la predicción de actividad en abanicos, pues permite identificar formas incipientemente inestables y tomar medidas para evitar o minimizar su efecto. Cuando la cabecera del abanico sobrepasa una determinada pendiente, el cauce supera un umbral intrínseco y se encajará sobre sus propios sedimentos. Pero también hay factores extrínsecos como el clima, la tectónica y los usos del suelo, que detonan su funcionamiento.

Respecto a la zonificación de peligrosidad, uno de los principales problemas en abanicos es que no son aplicables los criterios habituales de vulnerabilidad para desbordamientos de corrientes acuosas. Se ha considerado, en general, que la peligrosidad se incrementa radialmente desde el ápice activo del abanico, esto es, la zona de mayor acumulación que es a partir de la que va a abrirse el nuevo canal cuando se produzca el cambio de curso; sin embargo en cada caso hay que valorar cuál es la zona más inestable por donde puede producirse la avulsión. Por tanto hay que diferenciar entre lo que es ápice topográfico del abanico a partir del que discurre el cauce encajado y el hidrológico donde se expande el flujo, y dependiendo de la posición relativa de ambos ápices puede determinarse la zona sujeta a inundación. El Modelo FAN es una alternativa a la modelización hidráulica y divide la superficie del cono en segmentos de probabilidad uniforme. La peligrosidad sólo depende del caudal estimado en el ápice y de la anchura estimada para el abanico en ese punto. El método resulta muy conservador y los flujos uniformes que no tienen en cuenta la topografía de pequeña escala. Las propuestas de otros autores consisten en un modelo integrado combinando un modelado hidráulico bidimensional con mapas de formaciones superficiales, imágenes satélite y datos de campo post-avenida. Otros autores plantean una zonificación basada en la susceptibilidad a flujos de derrubios y avulsión. Una vez que se ha producido la avulsión hacia una zona topográficamente más deprimida, este cauce se hace estable durante un cierto tiempo hasta que se propicie un nuevo cambio hacia otra zona más baja. Las coladas de derrubios son más difíciles de predecir pero establecen unas clases de ocurrencia a partir de la colada de diseño para cada torrente definida por el mayor volumen de sedimentos esperable.

Los ejemplos en España de dinámica de abanicos con cambios y migración del cauce son múltiples y de diver-

sa tipología. El abanico de Albaida (Valencia) también ha sido muy activo históricamente con cinco sucesivas migraciones del cauce. La Plana de Levante constituye un ejemplo de abanicos anastomosados en que ramblas distribuidoras muy móviles acaban dispersándose sobre sus antiguos cauces, o bien impedidas en su desagüe por interferencia de temporales costeros. El funcionamiento de las ramblas sigue pautas de gran violencia en el litoral, como el flujo hiperconcentrado de la rambla de Albuñol que hizo avanzar su abanico deltaico 200 m mar adentro.

En zonas de montaña también ocurren procesos de gran actividad, como el abanico de Arás, con formación de un lóbulo nuevo a partir de la colmatación del ápice de abanico y avulsión lateral. El lóbulo superior de bloques representa una inundación en manto, por expansión de flujo no confinado seguido de una nueva extensión del abanico de bloques y gravas. Un ejemplo de la variabilidad no sólo en el abanico, sino en el cauce de aproximación, es el torrente de Montardit.

Y es que en los abanicos aluviales podemos encontrar tipologías de transporte en función de la concentración de sólidos en el fluido, lo que determina por un lado mezclas (líquido más sólido) dominadas por la fase fluida (denominadas aquí como transporte mediante corrientes hídricas) o dominadas por la fase sólida (o por lo menos con un porcentaje de sólidos suficiente como para modificar las propiedades características de un fluido), a lo que denominaremos flujos de alta densidad. Estas tipologías de transporte pueden aparecer en distintas zonas del abanico.

Asesoramiento sobre la estimación de la variabilidad en la frecuencia y magnitud de avenidas asociada al cambio climático

El cambio climático, o la aceleración inducida antrópicamente en el cambio climático respecto a las condiciones naturales, es un hecho reconocido no sólo por la comunidad científica internacional, sino también por los gobiernos y la opinión pública mundial. En esta circunstancia, la elaboración de análisis y cartografías de inundaciones basándose en las técnicas clásicas y empleando como fuentes de datos los registros sistemáticos del último siglo (en el mejor de los casos), presenta un alto grado de incertidumbre sobre su validez futura. A través del estudio de las variaciones en la frecuencia y magnitud de las avenidas y sus inundaciones asociadas, a lo largo del registro geológico reciente (Holoceno) y del registro histórico, pueden estimarse los órdenes de

magnitud que los cambios climáticos del pasado produjeron en dicha variabilidad; y a partir de ello, poder intuir las modificaciones que se producirán en el futuro ante las previsiones de cambio climático.

Los cambios climáticos conllevan modificaciones en la temperatura atmosférica, la de la superficie del mar, en las presiones, precipitaciones y caudales. La aceleración antrópica en el clima es un hecho confirmado y por tanto el análisis de inundaciones basado en registros pasados acarrea incertidumbres sobre su extrapolación futura. Las predicciones para la península Ibérica indican que la temperatura media subirá, disminuyendo los meses más fríos y aumentando los más cálidos, mientras que las aportaciones de los ríos reducirán en sus valores medios. Esto supone la acentuación de las condiciones mediterráneas, con un aumento de fenómenos extremos por convección tanto aislados como a mesoescala. Uno de los problemas mayores en las futuras predicciones es la variabilidad del clima de España debido a su compleja topografía y situación geográfica. Para entender esos cambios hay que conocer la tipología de inundaciones actuales y los cambios en el pasado reciente, el Holoceno. Los datos sistemáticos y no sistemáticos permiten establecer las complejas relaciones entre las oscilaciones climáticas de macroescala o teleconexiones y los recientes pulsos fríos-cálidos ligados a eventos de alta magnitud.

Respecto a los escenarios de precipitación e hidrología, la variabilidad climática interanual es muy elevada, condicionada por los patrones de circulación atmosférica del hemisferio Norte, ante todo por la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Durante el siglo xx las temperaturas en España han aumentado de forma general y en magnitud superior a la media global y las precipitaciones invernales han bajado. Esta tendencia se asocia en parte con un aumento en el índice de la NAO (Moreno, 2005). El empleo de escenarios en Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA) señala variaciones en temperaturas siempre positivas mientras que las de las precipitaciones son moderadas y en ambos sentidos. Los modelos regionales más empleados son: PROMES (Pronóstico a Mesoescala) para el efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos y las demandas de agua, simulando escenarios climáticos. El modelo agregado de Ayala e Iglesias estima que el cambio climático produciría una reducción global de los recursos hídricos del 17%. El SIMPA establece balances en los que la variabilidad hidrológica en las cuencas atlánticas aumentará en el futuro debido a la intensificación del índice NAO positivo y disminuirá la frecuencia

de avenidas, pero no su magnitud. En las cuencas mediterráneas y del interior se ocasionará un aumento en la irregularidad de crecidas y su celeridad.

Respecto a la relación entre las inundaciones y los pulsos climáticos holocenos hay que señalar que el óptimo climático Holoceno representa una disminución de la lluvia invernal (Benito *et al.*, 2008a) y para este periodo del Holoceno temprano los registros de lagos sugieren condiciones más húmedas con una progresiva aridificación posterior.

La Pequeña Edad de Hielo (LIA), representa uno de los principales pulsos históricos del Holoceno. En él, se produce un incremento de los periodos de bloqueo sobre la Europa Central asociado con sistemas frontales del O y eventos intensos en el Mediterráneo. En el río Guadiana, se ha señalado una concentración de eventos de paleocrecidas al final de pulsaciones frías y en momentos de transición hacia pulsos cálidos (Ortega y Garzón, 2009).

Existe una clara relación entre las inundaciones en la península Ibérica y la circulación atmosférica regional y global. Las teleconexiones son relaciones, definidas estadísticamente, entre atmósfera y océanos en regiones separadas y constituyen patrones de variabilidad de baja frecuencia. La oscilación del Atlántico Norte (NAO) representa un patrón de variaciones en la circulación a gran escala que supone cambios en las temperaturas superficiales de los océanos y corrientes, en la intensidad y número de tormentas y en las precipitaciones, que se refleja en forma de índices como el de Hurrell definido por la variación en la presión superficial entre Lisboa e Islandia. Su fase negativa supone un debilitamiento del anticiclón de las Azores, con el aumento del tiempo inestable en invierno y la entrada de frentes con mayor circulación meridional que derivan en lluvias en el Mediterráneo Occidental.

Una de las consecuencias del cambio climático es la modificación de la distribución de los recursos hídricos. Se han identificado una serie de tipologías en función del signo positivo o negativo de la NAO: Trigo *et al.* (2004) indican la relación entre caudales en las tres cuencas atlánticas y el índice NAO. La relación entre el índice de Hurrell de la NAO con las inundaciones ha sido establecida en la cuenca del río Guadiana. Cuando los valores NAO son negativos, las lluvias son abundantes, desviándose positivamente respecto a los valores medios; mientras que si los valores son positivos, las lluvias de invierno son escasas (Ortega, 2007; Ortega y Garzón, 2004).

En otras cuencas españolas se han detectado relaciones entre el índice NAO y las avenidas en el río Guadalquivir y Tajo (Benito, 2006 y Benito *et al.*, 2008a). Las avenidas históricas se encuentran relacionadas con momentos negativos del índice, mientras que en el registro instrumental esta relación no es tan clara.

La Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO) es el patrón de baja frecuencia más importante que influye en las precipitaciones en el Mediterráneo y está muy relacionada con la teleconexión del Atlántico Norte (NAO) durante el invierno. Se relaciona con avenidas de precipitación de tipo convectivo e incluso directamente con la actividad torrencial. El Niño (ENSO) es la mayor fuente de variabilidad climática interanual en el Pacífico; se relaciona con lluvias en el Mediterráneo, y temperaturas en el Atlántico Norte para anomalías de precipitación invernal.

Finalmente, sobre la relación de inundaciones con la actividad solar se citan correlaciones entre el número de manchas y la temperatura oceánica y con la NAO y la posibilidad de emplear los registros de inundaciones históricas como dato proxy de actividad solar.

El papel de la geología en el proceso de transformación lluvia-escorrentía

La relación existente entre los procesos de infiltración y escorrentía determinan en la mayoría de los casos y modelos el volumen efectivo de agua que se transmite dentro de una cuenca entre su cabecera y desembocadura. Esta relación se basa en las características propias en cada punto del territorio de una serie de variables de muy diverso tipo y origen.

Desde el punto de vista geomorfológico, el análisis y estimación de la producción de escorrentía superficial se ha abordado desde dos puntos de vista, con resultados diversos. Por un lado, el análisis de aspectos primarios en la morfología del terreno ha aportado información valiosa respecto a la capacidad teórica de una cuenca respecto a la generación de escorrentía superficial, y la influencia de estos aspectos primarios se encuentra contrastada y aceptada. Por otro lado, principalmente durante los años 70-80 se trató de establecer relaciones entre parámetros morfométricos del terreno más complejos y la producción de escorrentía superficial, analizando la influencia que los valores asociados a parámetros tales como la densidad de drenaje, la distribución de segmentos de diferente orden jerárquico, la rugosidad del terreno o el relieve de la cuenca. Sin

embargo en este último caso, en general no se han podido establecer relaciones directas y unidireccionales entre estos parámetros morfométricos y la producción de escorrentía superficial, lográndose en la mayoría de los casos establecer únicamente la relación existente entre los valores de estas variables (a nivel de magnitud de los valores) y la forma de los hidrogramas asociados a los diferentes eventos de precipitación.

El enfoque de los estudios basados en la relación entre las litologías dominantes dentro de una cuenca respecto a la generación de escorrentía superficial dentro de la misma se ha centrado principalmente en la estimación de los tipos y grados de desarrollo de los suelos asociados a estas litologías; que sin embargo se ha comprobado que en función del ambiente climático en que se encuentran y su fracturación pueden dar lugar a suelos significativamente distintos respecto al parámetro infiltración, prestando atención a dos elementos primarios, la textura y la capacidad de formación de suelos desarrollados, con espesores significativos previos a la aparición de la roca inalterada. Estas dos variables condicionan el comportamiento hidrológico del suelo, y permiten la clasificación de los mismos en los diferentes grupos hidrológicos de uso en la estimación del parámetro de Número de Curva (en España, la aplicación del modelo de Número de Curva se ha extendido bajo la variación que se conoce por Umbral de Escorrentía, desarrollado por el SCS y de uso generalizado en la estimación de los caudales asociados a los eventos de precipitación.

Existen relaciones entre la infiltración y los grupos litológicos en el ecosistema mediterráneo, comparando los resultados obtenidos según la litologías y las condiciones de alteración de los suelos. Esta relación entre infiltración y la litología condiciona a su vez el porcentaje de la precipitación que pasa a formar parte de la escorrentía superficial, y por tanto regula la forma de los hidrogramas de avenida asociados a estas precipitaciones, los cuales a su vez controlan en buena parte la morfología de los cauces encargados de ejercer el papel de agente de transporte.

CAMBIO CLIMÁTICO Y ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD POR INUNDACIONES EN ESPAÑA

Otro de los resultados de los estudios llevados a cabo en el marco de la Encomienda-Avenidas fue un análisis de las aportaciones geológicas al estudio de la incidencia del cambio climático en la peligrosidad por inundaciones en España, cuyo documento de síntesis supuso la

aportación de la representación española al *Thematic workshop on Climate Change and Flooding* del *Working Group F on Floods*, celebrado entre los días 8 y 10 de septiembre de 2009 en la localidad sueca de Karlstad (Llorente-Isidro *et al.*, 2009).

Antecedentes de los estudios sobre el cambio climático y las inundaciones en España

Existen numerosos antecedentes de estudios llevados a cabo sobre la variabilidad temporal en la frecuencia de las inundaciones históricas en España, algunos de ellos pioneros (Rico Sinobas, 1850; Bentabol, 1900); e infinidad de trabajos recopilatorios sobre las avenidas pretéritas en ámbitos locales, comarcales, regionales y nacionales (Font Tullot, Fontana Tarrats...).

Sin embargo, hasta que no se propuso la hipótesis del cambio climático antropogénico, no surgen los primeros estudios científicos modernos sobre la relación entre este paradigma y las inundaciones en España, que se remontan a la década de 1990 (Benito *et al.*, 1996). En este decenio, varios grupos de investigación inician proyectos de estudio de las variaciones históricas en la frecuencia de inundaciones basándose en tres tipos de fuentes de información y metodologías de estudio, diferentes pero complementarias: documentales-meteorológicas, geológico-geomorfológicas, y sistemáticas-instrumentales.

El empleo de las fuentes documentales a partir del estudio de series continuas y sistemáticas de registros en hemerotecas y archivos se lleva a cabo principalmente por miembros del Grupo de Climatología de la Universidad de Barcelona, encabezado por la Dra. Carmen Llasat y el Dr. Javier Martín-Vide, y de donde han salido prestigiosos paleoclimatólogos como el Dr. Mariano Barriendos; y realizan sus tesis doctorales otros como M. Barnolas. Estos estudios tienen un carácter multidisciplinar, combinando especialistas del análisis histórico-documental (del ámbito de las humanidades), con meteorólogos y físicos de la atmósfera. Ello ha creado una sinergia que permite contemplar los procesos vinculados a la avenida fluvial desde una perspectiva integral, empezando por el análisis y la estima de los procesos microfísicos involucrados en la precipitación, y pasando por la predicción a corto plazo utilizando el radar meteorológico (Barnolas y Llasat, 2007). También han investigado sobre las fuentes históricas y su incorporación al análisis estadístico de frecuencias, los técnicos y científicos del Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente en la Uni-

versidad Politécnica de Valencia, encabezado por los Drs. Juan B. Marco y Félix Francés, y al que pertenece también M. A. Eguíbar.

Por lo que respecta a las fuentes y métodos de tipo geológico-geomorfológico, varios equipos de investigación han avanzado en el conocimiento de las paleoinundaciones holocenas e inundaciones históricas en diferentes cuencas peninsulares, combinando aspectos puramente geológicos (análisis y datación de *slackwater & backwater deposits*; Benito *et al.*, 2008b) con modelaciones y reconstrucciones hidrológicas e hidráulicas, que permiten no sólo estimar la variación de la frecuencia, sino también de los órdenes de magnitud de los caudales. Entre ellos destacan: el Grupo de Investigación de Paleohidrología y Análisis del Cambio Climático del Museo de Ciencias Naturales (CSIC), encabezado por el Dr. Gerardo Benito, y en el que se han formado y desarrollado sus tesis doctorales la Dra. María Teresa Rico, la Dra. María José Machado y el Dr. Varyl Thorndycraft; y el Grupo de Geomorfología Ambiental del Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid, en particular el grupo encabezado por la Dra. M^a Guillermina Garzón Heydt, y en el que han realizado sus tesis doctorales el Dr. J. Martínez-Goytre, la Dra. Ángela Potenciano y el Dr. José Antonio Ortega Becerril.

El análisis de los registros instrumentales sistemáticos, principalmente de la red foronómica de registros más longevos (ROEA) tiene la virtud de trabajar con datos cuantitativos medidos reales, pero el inconveniente de la reducida longitud de las series. Ha sido abordado tanto por personal de las administraciones responsables de la gestión de los recursos hídricos (DGA, agencias autonómicas...), como por grupos de universidades y centros de investigación, como el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (J. Álvarez, A. Jiménez, L. Quintas, T. Estrela, J. Garrote...).

Con ambos grupos de equipos de investigación vienen colaborando desde hace más de una década diferentes investigadores y técnicos de otros centros de la Administración General del Estado como: el Instituto Geológico y Minero de España (F.J. Ayala, L. Laín, A. Díez, M. Llorente, A. Barnolas); y la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (G. Pascual, A. Bustamante, A. Álvarez, R. Martínez).

Aprendiendo lecciones del pasado reciente

A partir de los estudios y publicaciones de los grupos anteriormente mencionados, se pueden extraer los si-

guientes resultados sobre la variabilidad de la frecuencia y magnitud de inundaciones en el pasado reciente, con particularidades según la vertiente estudiada (atlántica o mediterránea), y la cuenca objeto de estudio:

Para la cuenca del río Tajo, a partir del análisis espacio-temporal de fuentes documentales utilizando bases de datos relacionales y SIG (Díez *et al.*, 1998 y 2003; Benito *et al.*, 2003a), las mayores frecuencias de inundación en el último milenio se registraron en los periodos: AD 1160-1210, 1540-1640, 1730-1760, 1780-1810, 1870-1900 y 1960-1980. Con respecto a la magnitud, empleando modelación hidráulica para reconstruir órdenes de magnitud de caudales históricos en cuatro localidades singulares, se ha detectado que las mayores avenidas tuvieron lugar en los periodos: AD 1168-1211, 1658-1706, 1870-1900 y 1930-1950. De la comparación de estos periodos con las tendencias climáticas históricas establecidas para la península Ibérica, se puede deducir que las épocas de mayores inundaciones corresponden con las décadas inicial y final de periodos con un 'deterioro' del clima a escala continental; lo que sugiere que la viabilidad climática en el último milenio ha producido una respuesta de eventos hidrológicos (positiva o negativa), independientemente del mecanismo que produce la inundación. Para esta misma cuenca se ha analizado el registro de paleoinundaciones del Pleistoceno Superior y Holoceno (Benito *et al.*, 2003b), llegándose a la conclusión que los periodos de incremento de la frecuencia y magnitud de las avenidas prehistóricas en la cuenca del Tajo están estrechamente relacionados con el aumento de circulación húmeda y precipitaciones invernales en la península Ibérica, especialmente en la zona occidental, demostrando una buena correspondencia con otros indicadores (lagos, pólenes...) y los cambios en la circulación atmosférica que afectan a la Península.

Para la cuenca del río Guadiana, a partir del análisis geológico e hidráulico del registro de paleocrecidas en su tramo medio-bajo (Ortega y Garzón, 2003; Ortega, 2007; Ortega y Garzón, 2009), se ha podido completar el registro sistemático de eventos, e incorporar estos datos no sistemáticos al análisis estadístico de caudales. Los resultados muestran que existe una variación en las funciones de distribución de frecuencias que pueden achacarse a las transformaciones antrópicas que han cambiado las condiciones hidrológicas, pero también a los últimos cambios climáticos. Las inundaciones de mayor magnitud se relacionan con periodos fríos, especialmente en momentos transicionales de cambio desde periodos fríos a cálidos. Esta tendencia ha cambiado

desde la última crecida de magnitud media-alta, que tuvo lugar en el periodo sistemático. Por ambos motivos, parece justificarse un cambio en las curvas de frecuencia que indican un descenso reciente en el periodo de retorno de las grandes crecidas ($Q > 8000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Las paleoinundaciones indican un mayor periodo de retorno para el mismo caudal, mostrando los valores de referencia previos a la transformación antrópica de la cuenca.

Para ambas cuencas se han encontrado muy buenas correlaciones con indicadores regionales de la circulación y teleconexiones atmosféricas, como el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO; Benito *et al.*, 2004; Ortega y Garzón, 2004; Trigo *et al.*, 2004), e incluso con la actividad solar (Vaquero, 2004; Benito *et al.*, 2004).

En el caso de las cuencas mediterráneas, se han definido varios periodos de mayor frecuencia y magnitud de las inundaciones históricas (Barriendos, 1994; Barriendos y Martín Vide, 1998; Barnolas y Llasat, 2007). Desde finales del siglo XVI hasta mediados del siglo XVII (años 1580-1620) se denota un aumento sensible del número de avenidas catastróficas coincidiendo con un momento más frío en la península Ibérica; se trata de una de las oscilaciones climáticas adversas más evidentes de las registradas durante la última miniglaciación (Barriendos, 1994). La relativa calma hidrológica se alarga más de un siglo, desde mediados del siglo XVII hasta las últimas décadas del siglo XVIII; en estas últimas décadas tiene lugar la Oscilación Maldá y corresponde con episodios de lluvia torrencial de amplia afección espacial en la parte oriental de la península Ibérica; luego vuelve a haber un periodo de incremento y mayor severidad de las inundaciones entre los años 1840 y 1870. En este caso la correlación adecuada no se produce con el índice NAO, sino con la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO; Oliva *et al.*, 2006). De tal manera que el índice de la WeMO invernal presenta una buena correlación negativa con las inundaciones a escala anual de las cuencas de la vertiente mediterránea desde el año 1500; las fases más negativas del índice, entre los años 1590-1650 y los picos del siglo XIX, coinciden con los periodos de inundaciones más graves y/o recurrentes; y la serie de precipitación de Valencia desde 1837 detecta una correlación negativa óptima con las fases negativas y positivas del índice. También en la vertiente mediterránea se han hecho estudios de correlación de paleoinundaciones y periodos climáticos (Rico, 2004; Benito *et al.*, 2008a y b), llegándose a la conclusión que existe una buena correlación entre los periodos de mayor frecuencia con cambios climáticos, pero también de la influencia notable de los cambios históricos en los usos y ocupación del suelo.

Principales resultados para la previsión futura

Para la obtención de resultados sobre la evolución futura de la frecuencia y magnitud de las inundaciones en España, en relación con los cambios climáticos previstos, caben dos vías de análisis:

La modelación físico-matemático de la respuesta hidrológica en las diferentes partes de España, ante los cambios previsibles en parámetros climáticos obtenidos a partir de los Modelos de Circulación Global acoplados océano-atmósfera (Llorente, 2007). El principal inconveniente de esta vía es que dichos modelos todavía tienen una resolución espacial muy baja y grosera para alimentar modelos hidrometeorológicos, haciendo poco representativos los resultados obtenidos con el descenso de escala (*downscaling*); además, ofrecen resultados de la variación de parámetros medios o totalizadores (precipitación media anual, temperatura media...), que si bien pueden ser útiles en la evaluación de los recursos hídricos globales, son muy difíciles de adaptar para el estudio de eventos extremos como las avenidas e inundaciones.

Extrapolar el comportamiento de las inundaciones en periodos análogos del pasado reciente (ver anterior apartado), en función de las previsiones de cambios climáticos de los escenarios futuros, y de las proyecciones de los indicadores como el NAOi, WeMOi y actividad solar. De esta manera, si como parece se está produciendo un calentamiento global con aumentos de las temperaturas medias, se podría suponer un comportamiento análogo a los periodos históricos en los que se pasó de un periodo más frío a otro más cálido, como el inicio de la era cálida romana, o el periodo cálido medieval.

Para España, las escasas previsiones concretas que se han hecho de los impactos del cambio climático (Benito *et al.*, 2005; Moreno, 2005; Benito, 2006), han empleado mayoritariamente la segunda vía de las anteriormente expuestas, llegándose a los resultados que se exponen de forma sintética en la Tabla 1.

Conclusiones

Como sintetiza magistralmente G. Benito (2006), los registros de paleocrecidas y crecidas documentales en España muestran una mayor frecuencia de crecidas durante los estadios iniciales y finales de periodos fríos como la Pequeña Edad del Hielo (1550-1850 AD) o la pulsación de carácter frío y húmedo ocurrida hace 2650 años. En el periodo instrumental (1910 hasta la actualidad), los ríos

Tabla 1. Resultados cualitativos del análisis de la respuesta de las diferentes cuencas hidrográficas españolas a posibles impactos del cambio climático (adaptada de Benito *et al.*, 2005)

POSIBLE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO					
Cuenca hidrográfica		Cambios en la circulación zonal (NAOI positivo)	Aumento de los fenómenos de gota fría	Generación de núcleos convectivos	Cambios bruscos en la temperatura
Vertiente atlántica	Guadalquivir Guadiana Tajo	- Extremos (+intensos) + Ordinarias (-intensos)		+ Avenidas súbitas	
	Duero	- Extremos (+intensos) + Ordinarias (-intensos)		+ Avenidas súbitas	+ Crecidas por deshielo
	Norte		+ Irregularidad de extremos	+ Avenidas súbitas	
Vertiente mediterránea	Ebro			+ Avenidas súbitas	+ Crecidas por deshielo
	Cuencas internas de Cataluña		+ Irregularidad de extremos	+ Avenidas súbitas	+ Crecidas por deshielo
	Levante/ Sur		+ Irregularidad de extremos Crecidas/sequías	+ Avenidas súbitas	

atlánticos han experimentado una disminución de la frecuencia de las crecidas ordinarias, aunque la magnitud de las crecidas catastróficas se ha mantenido, incluso aumentado, a pesar del efecto laminador de los embalses. En las cuencas mediterráneas las series de crecidas del pasado indican que las avenidas extremas se han producido durante periodos de elevada irregularidad de la precipitación tanto estacional como anual. En periodos recientes, los datos existentes apuntan a que el incremento de la temperatura puede aumentar la irregularidad del régimen de crecidas y sequías y promover la generación de avenidas súbitas en las cuencas mediterráneas y del interior de la península Ibérica.

Sin embargo queda aún mucho trabajo de investigación y desarrollo técnico en más cuencas y periodos temporales más representativos, para poder transferir estos resultados (algunos de ellos cualitativos) a los análisis y cartografía de la peligrosidad de inundaciones en España.

ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS EN LA MODIFICACIÓN DEL REGLAMENTO DEL DPH, EL SNCZI (extracto de MARQUÍNEZ *et al.*, 2008)

El miércoles 16 de enero de 2008 se publicó en el Boletín Oficial del Estado (número 14, páginas 3141-3149) el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (en adelante, RDPH), aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril.

El nuevo Real Decreto 9/2008 se compone de un artículo único, en el que se modifica el título del RDPH, se cambia la redacción de varios de sus artículos (4, 6, 7, 9 y 14) y se añade un nuevo título (VII, *De la seguridad de presas, embalses y balsas*). Los artículos modificados tratan sobre la definición del álveo o cauce natural (Art. 4), la zonación de las riberas y márgenes (Art. 6), sus fines y limitaciones de uso (Arts. 7 y 9.1), la delimitación de la zona de flujo preferente (Art. 9.2), las zonas inundables y el nuevo Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (en adelante, SNCZI; Art. 14).

La mayor parte de estos artículos en los que se ha cambiado la redacción, contienen múltiples alusiones a las características, criterios y métodos geomorfológicos para la determinación y delimitación de los elementos y zonas; además de diversas menciones a aspectos de la dinámica fluvial y los procesos asociados (transporte de carga sólida).

La geomorfología en la determinación del cauce

El antiguo Real Decreto 849/1986 que regulaba el RDPH, y que ha estado vigente durante casi los últimos 22 años, únicamente contenía una referencia a los temas geomorfológicos al objeto de la delimitación del dominio público hidráulico (Art. 240.2) como un criterio "coadyuvante" de la zona ocupada por la máxima crecida ordinaria (en adelante, MCO). De esta forma quedaba claro que existía un criterio de determinación principal (el hidrológico-hidráulico), y otros complementarios o adicionales ("...la observación del terreno y de las condiciones topográficas y geomorfológicas (...) y,

en general, cuantos datos y referencias resulten oportunos”) cuyo empleo no era de obligado cumplimiento. Los criterios hidrológico-hidráulicos contaban con la ventaja de ser cuantificables numéricamente, lo que aparentemente les otorgaba una mayor objetividad y facilidad para ser soportados jurídicamente; por el contrario, los otros criterios (geomorfológicos, ecológicos, históricos ...) eran tildados de cualitativos y subjetivos, a pesar de que a diferencia de los anteriores, se basan en evidencias empíricas y no en artificios estadísticos.

Consecuencia de esta definición de cauce, los diferentes planes y proyectos para la delimitación del DPH, como el conocido LINDE (Villarroya y Sánchez, 2006) han volcado sus esfuerzos en la aplicación de métodos hidrológico-hidráulicos, lo que ha producido no pocos problemas técnicos y logísticos. Salvo casos excepcionales, se dejaba en manos de las empresas y consultoras adjudicatarias de la delimitación, el empleo o no de estos criterios complementarios o adicionales, que en el mejor de los casos quedaban restringidos al examen de fotografías aéreas antiguas, rudimentarios esquemas geomorfológicos, o recorridos de campo de algunos tramos.

El propio legislador se hace eco de estos problemas, cuando en el preámbulo del nuevo Real Decreto dedica un párrafo a ello: *“La definición de cauce natural establecida en el vigente Reglamento, basada en el concepto de máxima crecida ordinaria, se ha mostrado claramente insuficiente en numerosas situaciones, por lo que resulta imprescindible que los cauces naturales se definan no sólo a partir de criterios hidrológicos, sino atendiendo también a otras características, como las geomorfológicas, las ecológicas y teniendo en cuenta las referencias históricas disponibles”*.

La modificación que introduce el nuevo Real Decreto 9/2008 en el artículo 4, en parte motivada por las nuevas directivas europeas ambientales, incorpora las características geomorfológicas, fotográficas, cartográficas e históricas, al menos en igualdad de condiciones que las hidrológicas e hidráulicas para la determinación del cauce natural (Art. 4.1); incluso coloca las características geomorfológicas en primer lugar en la redacción. Esta modificación supone un cambio significativo respecto a la situación anterior, aunque sin entrar en contradicción con el artículo 4 del texto refundido de la Ley de Aguas, ya que mantiene la definición de la MCO (Art. 4.2), pero indicando que *“... tengan en cuenta lo establecido en el apartado 1”*.

Sin embargo, de todos es sabido que la delimitación del cauce con criterios geomorfológicos no es una cosa ba-

nal, salvo contadas ocasiones de tramos muy simples de cauces bien definidos entre escarpes de orillas; cuando son ríos complejos, existen diferentes términos para los caudales asociados al cauce, como caudal generador, caudal formador, caudal de bancos llenos, caudal de aguas altas, que no son exactamente sinónimos de la MCO y que conviene clarificar.

La geomorfología en la zonación de riberas y márgenes

También el antiguo Real Decreto del RDPH presentaba serias deficiencias en la delimitación de zonas dentro de las riberas y márgenes. Desde el principio, la comunidad científico-técnica criticó el sinsentido de la delimitación exclusivamente métrica de las zonas de servidumbre (5 m) y policía (100 m), con independencia de la magnitud de la corriente y su dinámica.

En este sentido, de nuevo la modificación del RDPH viene a matizar dicha delimitación, incorporando cierta racionalidad, una vez más sin entrar en conflicto con el texto refundido de la Ley de Aguas. Ya el preámbulo justifica esta modificación en la necesidad de que estas zonas sirvan, además de proteger el DPH, para prevenir el deterioro de los ecosistemas acuáticos y proteger el régimen de las corrientes en avenidas. Este último aspecto se consigue *“... favoreciendo la función de los terrenos colindantes con los cauces en la laminación de los caudales y carga sólida transportada”* (Art. 6.3); en la que quizás sea la primera y única mención al papel de la carga sólida en nuestra legislación de aguas, a pesar de su importancia en la mayor parte de las avenidas torrenciales que causan víctimas mortales en nuestro país.

Por ello plantea la posibilidad de ampliar los 100 m de anchura de la zona de policía cuando sea necesario para la seguridad de las personas y bienes. Esta posibilidad se materializa con la nueva incorporación de la *zona de flujo preferente, envolvente de la vía de intenso desagüe* (definida en el nuevo reglamento de forma semejante al *floodway* de la FEMA en los EEUU) y la zona de inundación peligrosa para las personas (según rangos de calado y velocidad). Esta delimitación, aunque no del todo satisfactoria puesto que no deja de ser un artificio matemático de límites numéricos arbitrarios y basado en modelos hidrológico-hidráulicos de dudosa precisión, suele tener una muy buena correlación con elementos geomorfológicos muy bien caracterizables empíricamente, como la envolvente del cinturón de meandros o de aquellas zonas donde las avenidas generan formas erosivas y sedimentarias.

La geomorfología en la determinación de las zonas inundables

Al igual que ocurría con la definición de cauce natural o álveo, las zonas inundables en el antiguo RDPH venían determinadas única y exclusivamente con criterios hidrológico-hidráulicos: "... los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo periodo estadístico de retorno sea de quinientos años.." (Art. 14.3). De esta delimitación han derivado consecuencias parecidas a las ya referidas para el cauce, tanto en el ámbito técnico como práctico.

La modificación del RDPH mantiene la citada definición de la zona inundable, pero añade "... atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas ..." (Art. 14.1).

De forma análoga a como se hace con el cauce, se equiparan los estudios geomorfológicos a los hidrológicos e hidráulicos, e incluso se anteponen en la redacción. Esto no debe significar, al contrario de lo que se venía haciendo hasta ahora, que unos primen sobre otros sino, como dice el artículo, se tomará la decisión que resulte más adecuada según la problemática y la información disponible. Tampoco debe conllevar que cada estudio de zonas inundables sea una recopilación inconexa de los diferentes estudios, que sin relación entre ellos se apilen en sucesivos mapas y anexos. Lo ideal es que estos métodos y criterios se integren, complementen y combinen, como ya existen experiencias prácticas desde hace décadas (Lastra *et al.*, 2008).

La geomorfología en el SNCZI

El apartado 3 del artículo 14 de la modificación del RDPH recoge la aparición del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, que viene a sustituir e integrar buena parte de las actividades del proyecto LINDE y otros semejantes (Yagüe, 2007).

Para llevar a cabo el diseño del Sistema y el seguimiento de su desarrollo, el Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Dirección General del Agua, inicia en el año 2005, con un grupo de trabajo interno sobre inundaciones, las necesarias modificaciones de la Ley de Aguas y de su normativa en lo referente al DPH y a la gestión de las zonas inundables. Este equipo de trabajo es el responsable de la redacción de los borradores del Real Decreto 9/2008, aprobado el 11 de enero. En el año 2006 el grupo fue ampliado incorporando otros represen-

tantes del propio Ministerio de Medio Ambiente (DGA, CC.HH., SGTB...), otros organismos de la AGE y universidades (CEDEX, IGME, DG Costas, DGPCE, INDUROT...) Su objetivo es realizar el seguimiento de la implantación de la Directiva Marco del Agua y asesorar a los representantes españoles en materia de la nueva Directiva de Gestión del Riesgo de Inundaciones, y diversos grupos europeos de trabajo (EXCIMAP, EXCLUP...). Este Grupo se encargará de redactar la guía metodológica y de recomendaciones para la elaboración de los nuevos estudios de delimitación de la zonación aquí propuesta. Los primeros borradores de esa guía y de los pliegos (Fernández, 2009) técnicos para los concursos de ejecución de los trabajos, tienen un apartado específico donde se incorporan múltiples fuentes de datos, criterios y métodos geomorfológicos, siguiendo el espíritu de la modificación del RDPH.

SISTEMA NACIONAL DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES. ESTUDIO PILOTO RÍO CARRIÓN (Tramo Villoldo)

Como se ha indicado en el apartado anterior, a partir de la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (*Real Decreto 9/2008*, de 11 de enero) se establece un cambio en la prelación de los criterios a aplicar a la hora de delimitar las áreas inundables: se incorporan los criterios geomorfológicos e históricos en igualdad de condiciones a los hidrológico-hidráulicos clásicos (Marquínez *et al.*, 2008). Así mismo se diseña un Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), una Comisión Técnica que elabore una *Guía Metodológica* de aplicación de los criterios geomorfológicos-históricos, y la selección de tres *Zonas Piloto* donde ensayarla: sobre ríos cantábricos (Nalón), en ramblas mediterráneas (Palencia), y en ríos meseteños atlánticos (Carrión).

El presente apartado tiene por objeto mostrar los métodos empleados y los resultados obtenidos en la *Zona Piloto del río Carrión* (Tramo Villoldo, junio 2009), y discutir las particularidades reveladas en la delimitación de zonas inundables en el Medio-Bajo Carrión (Cuenca del Duero, Palencia), por ser un claro ejemplo de un río de cuenca sedimentaria, de régimen atlántico y regulado en cabecera (embalses de Compuerto, Camporredondo, Velilla con capacidades de 90, 70 y 1,8 hm³ respectivamente). Los principales resultados del citado estudio se han recogido en un informe-memoria (Morales y Ortega, 2009) y en diferentes generaciones de mapas.

En este tramo de Villoldo, el Carrión muestra un canal único (de dirección NO-SE) de alta-media sinuosidad (meandriforme), que discurre por un valle en artesa con un sistema de terrazas asimétrico y sobre una amplia y variablemente funcional llanura aluvial, fuertemente intervenida por la mano del hombre (canales, choperas, cultivos...), y donde recibe la confluencia de la Cueza (río autóctono del interior de la cuenca del Duero).

Metodología

Siguiendo las indicaciones de la Comisión Técnica del SNCZI, para el análisis y elaboración de la cartografía geomorfológico-histórica se empleó la *Guía Metodológica* elaborada ex profeso (Fernández, 2009), que se apoya fundamentalmente en dos grandes pilares:

1. El *análisis histórico*, permite contar con información de episodios realmente ocurridos, valorar la intensidad y magnitud de los mismos, los espacios afectados y los efectos generados. Su análisis es ineludible por varias razones: los datos históricos suelen abarcar un período temporal bastante más prolongado que la información de carácter meteorológica (observatorios) e hidrológica (aforos); su examen ayuda a perfilar y delimitar el área inundable y, sobre todo, la recurrencia de los episodios aporta información de calados en lugares y momentos concretos; permite tener imágenes reales de acontecimientos ocurridos, alusiones concretas a parajes afectados, efectos ocasionados sobre infraestructuras...; a partir de sus datos se puede establecer una tipología de inundaciones; permite, además, ajustar los modelos hidrológico-hidráulicos así como validar sus conclusiones.
2. El *análisis geomorfológico* trata de reconocer e interpretar las diversas evidencias geomorfológicas asociadas a la dinámica natural de los ríos y de las inundaciones (erosivas y sedimentarias), así como valorar los diversos cambios de trazado fluvial habidos (estrangulamientos, avulsiones, rotura de diques o levées, ocupación de canales abandonados...). En definitiva, presta atención al análisis morfodinámico y morfoevolutivo de la corriente fluvial, analizando la geometría del canal para identificar diversas formas y depósitos formados tras la producción de episodios de inundación.

Cada uno de estos estudios cuenta con una secuencia sistemática precisa.

El análisis histórico de las inundaciones

Ha seguido un proceso metodológico que ha pasado por diferentes etapas. En concreto, ha sido necesaria la consulta y revisión de diferentes fuentes documentales, publicaciones, la realización de entrevistas a la población afectada y la validación de los datos obtenidos.

El punto de partida ha sido la elaboración de un *Catálogo de Inundaciones* que se ha desglosado en dos: uno, referido a toda la Cuenca del río Carrión (1860-1959) y otro específico del área analizada (1960-2008), de mayor precisión y cantidad de datos. Su información resulta fundamental para establecer el número, frecuencia, intensidad y duración de los episodios de inundación. Elementos de base en cualquier estudio de peligrosidad del riesgo.

En su elaboración han sido de gran ayuda la consulta del *Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas* (1985), *Las Inundaciones en España* (1988), el artículo de C. Morales & M.^a T. Ortega (2002) y la consulta de la prensa diaria de *El Norte de Castilla* (1960-2008) y *El Diario Palentino* (1985-2008).

En su estructura se destacan diferentes campos para cada episodio de inundación: nivel de intensidad, número de orden, fecha (duración), causa (dinámica), ríos afectados, caudales máximos y medios, precipitación media, y efectos ocurridos (cortes de carreteras, agricultura, pueblos inundados... [Tabla 2]).

Por otra parte, para cotejar y comprobar los cambios evolutivos habidos en el trazado del río y otras morfologías más actuales se han consultado diversas fuentes: mapas geológicos de distintas fechas (1856, 1952), topográficos (1963, 1973), fotografías aéreas verticales para visión estereoscópica de diversos años (1956/57, Junta de Castilla y León...), ortofotografía digital obtenida de varias fuentes (PNOA, SigPAC, 2005, 2007), *Google Earth*, etc.

La valoración de la intensidad y los calados de los episodios se ha deducido principalmente de las entrevistas realizadas a la población ribereña de este tramo del Carrión (Villoldo, Castrillejo de la Olma, Manquillos, Perales, Ribas de Campos, Monzón de Campos y Husillos). Su información tiene una gran aplicación práctica pues ayuda a completar el inventario de sucesos catalogados, perfila temporalmente determinados eventos, delimita la extensión superficial de los mismos (sobre todo los más recientes), y refuerza la posterior comprobación *in situ*, a partir del trabajo de campo, de la zonación propia del área inundable.

N. I	Nº	Fecha	Causa	CUENCA CARRIÓN	Tramo fluvial estudiado				
				Ríos afectados	Caudales ¹		Precipitación ²		Carreteras cortadas Pueblos más afectados
					Qmed	Qmáx	Villoldo	Monzón	
	1	27/30-I-1960	Temporal lluvias. Deshielo	Ucieza	55,94	62,20	--	49,8	Ribas de Campos (daños en la red de acequias).
	2	8/10-II-1960	Temporal lluvias. Deshielo	Carrión, Ucieza	46,88	48,80	--	36,3	Ribas de Campos (daños en la red de acequias).
x	3	18/25-II-1960	Temporal lluvia y nieve	Carrión, Ucieza	59,43	66,80	--	51,1	---
	4	13/19- III- 60	Tormentas	Ucieza	52,93	60,00	--	17,3	Ribas de Campos y Amusco
	5	27-X a 6-XI-60	Temporal lluvias	Carrión, Valdeginete, Retortillo	65,70	73,50	--	62,0	---
x	6	17/27-XI-1960	Temporal lluvias	Carrión, Valdeginete, Ucieza	80,72	112,00	--	67,8	---
xx	7	22/30-XI-1961	Temporal lluvia y nieve. Deshielo	Carrión, Valdeginete, Ucieza, Cueza	99,13	125,00	--	73,9	---

N.I (Nivel de Intensidad): Inundaciones de intensidad alta (x) e Inundaciones de intensidad muy alta (xx)

¹ Caudales diarios en m³/s del aforo de Villoldo. Confederación Hidrográfica del Duero.

² Datos de precipitación diaria en mm de Villoldo y Monzón. Delegación Meteorológica Territorial del Duero.

Ftes.: *Catálogo de Inundaciones de la Cuenca del Duero (1959-2008)*. Grupo de Investigación en Riesgos Naturales NATRISK (Universidad de Valladolid). *Catálogo de inundaciones históricas de la Cuenca del Duero*. Ministerio del Interior. Dirección General de Protección Civil y Emergencias. CNPC (1988).

Tabla 2. Extracto de dos años del Catálogo de Inundaciones del Carrión (Tramo Villoldo). Período 1960-2008.

Para determinar las causas de las inundaciones se han consultado los Boletines Meteorológicos Diarios del INM (hasta 2008, luego AEMET), dado que a partir de ellos se conoce la génesis y dinámica de las mismas, lo que permite establecer una tipología al respecto y valorar su peligrosidad, así como desarrollar criterios para la predicción y previsión de los episodios de inundación.

Finalmente, para validar los episodios computados se cotejan éstos con las precipitaciones diarias de Villoldo y Monzón de Campos, y con los datos diarios de caudales del aforo de Villoldo en el periodo 1960-2008. Esta sistemática resulta fundamental porque ayuda a concluir la duración del episodio de inundación (día de subida del caudal, días de mantenimiento de aguas altas, día de bajada del caudal), y matiza la importancia del episodio por la magnitud del caudal y la prolongación y/o intensidad de las precipitaciones.

El análisis geomorfológico de las inundaciones

Se ha realizado a partir de las fuentes documentales, cartográficas y bibliográficas así como de la información que se ha extraído directamente del trabajo de campo. El análisis se ha apoyado tanto en la cartografía analógica como digital, destacando por su gran ayuda la fotografía aérea del año 1956 (georreferenciadas y visión estereoscópica), extraordinario referente del estado del río en régimen na-

tural o seminatural; la ortofotografía del PNOA (25 cm de resolución en formato "ecw en el datum ETRS-1989); y las imágenes LIDAR (realizadas en 2009 por Ambisat SL, para el LINDE del Carrión¹), que aportan información de precisión y calidad (con frecuencia no visible en el campo por su escala, perspectiva, etc.), pese a las limitaciones propias de esta herramienta (sobreestimaciones de variaciones topográficas, inversiones del relieve, filtrado de la información no topográfica... [Figura 3]).

No se ha establecido un criterio de usos específico para cada una de estas fuentes, optándose en cada caso por la que ofreciera mejor información posible y la más coherente con lo observado en el campo.

El recorrido del área piloto resulta fundamental para tener observaciones directas de las diferentes secciones de los cauces del Carrión y la Cueza. Esta labor ha de realizarse con detalle y profundidad a fin de recabar el máximo de información sobre la presencia o ausencia de las diferentes formas erosivas y sedimentarias asociadas a los diversos episodios de inundación. Como apuntaron Ortega y Garzón (2006), "la cartografía de las áreas inundables debería basarse lo más posible en datos directos de campo, con los que puedan contrastarse los modelos numéricos teóricos".

¹ Estudio de zonas inundables y delimitación del dominio público hidráulico de los ríos Carrión, Valdeginete, Cueza y Ucieza.

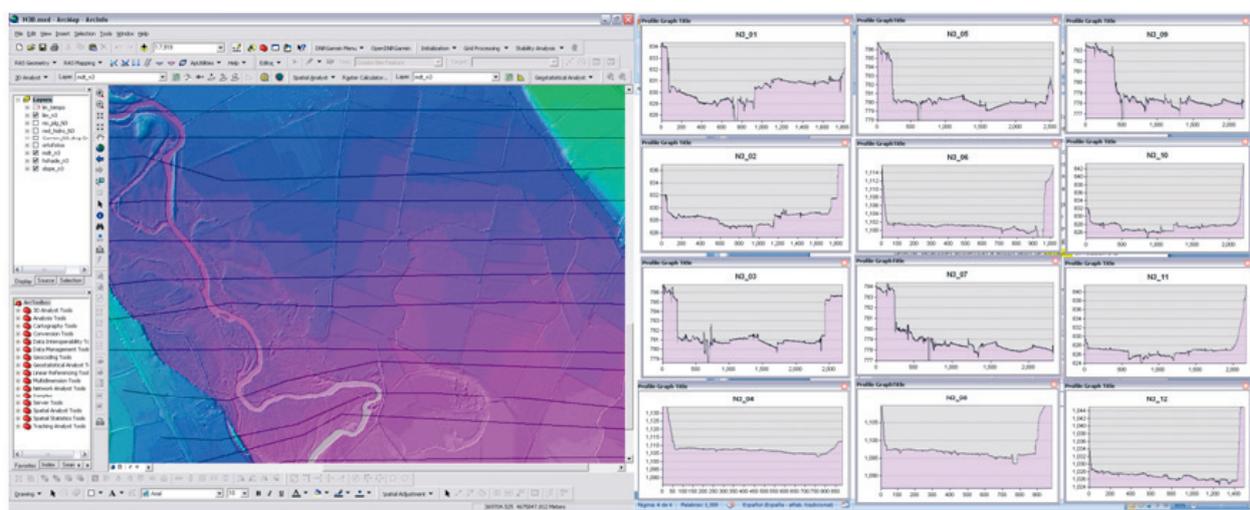


Figura 3. MDT y perfiles topográficos realizados del tramo sur del área de estudio a partir de la imagen LIDAR.

Los objetivos perseguidos son varios: reconocer *in situ* las formas de relieve como condicionante de las inundaciones; apreciar las evidencias geomorfológicas fruto de los desbordamientos; realizar perfiles para delimitar la sección de la llanura y de sus márgenes externas y apreciar posibles cambios de trazado fluvial; localizar marcas y niveles históricos; identificar variaciones altitudinales a lo largo de la orilla del cauce para identificar zonas de egresión; jerarquizar tramos en el cauce atendiendo a su mayor o menor susceptibilidad al desbordamiento; verificar algunos aspectos posiblemente sobredimensionados del análisis de las imágenes LIDAR; valorar la importancia de otros fenómenos geológicos asociados a las inundaciones (movimientos de ladera, sufusión, karstificación...); comprobar las modificaciones antrópicas realizadas sobre el cauce y sus márgenes, así como la localización de las estaciones de aforo y pluviométricas; y realizar fotografías actuales, encuestas y entrevistas a la población.

El trabajo de campo permite pues determinar la extensión y ámbito de los espacios inundables y de aquéllos que deben quedar considerados dentro de las distintas zonas a cartografiar.

Resultados

A partir de la información sistematizada en el *Catálogo de Inundaciones* se han obtenido una serie de resultados. En concreto, se ha realizado un estudio del grado de intensidad de las inundaciones, basado en los caudales, las precipitaciones acumuladas y los efectos ocurridos, que ha llevado a considerar como: *Intensidad muy alta*, aquellos episodios con caudales por encima de 90

m³/s (el 19,5% de los episodios); *Alta*, caudales entre 70-80 m³/s (el 24,4%); y *Media-Baja*, caudales inferiores a 70 m³/s (el 56,1%).

La duración de los episodios se ha estimado a partir de la información disponible de cada uno de ellos, fuentes documentales y hemerotecas y de las entrevistas a la población, cotejándose siempre con los datos de caudales y precipitaciones para matizar el comienzo y finalización de cada evento. Esto ha llevado a distinguir entre *duraciones breves*, de menos de 5 días, *medias* entre 6-10 días y *altas* de más de 10 días (Figura 4).

Igualmente se ha analizado su manifestación temporal y génesis. La mayor parte se producen en el período central del invierno —diciembre-febrero— (63,4%), seguidas por las de los meses de inicio y fin del mismo —noviembre y marzo— (17,1%) siendo prácticamente nulas las estivales (2,4%). Así pues, son algo propio del otoño-invierno, debidas a las típicas precipitaciones de temporal (circulaciones zonales del oeste o noroeste, vaguadas de alta baroclinicidad sitas al oeste de la Península Ibérica) asociadas al paso del Frente Polar que provocan lluvia y/o nieve durante varios días consecutivos. A ello se unen otras causas como los deshielos, o los desembalses (Tabla 3).

Los períodos de recurrencia calculados tanto a partir de los episodios constatados como de los deducidos (sobre la información de otros puntos aguas abajo), permiten confirmar la alta frecuencia de inundabilidad de este tramo del Carrión, estimándose períodos de recurrencia siempre por debajo de los diez años (a veces mucho menos).

Período	Causa Principal								Causas Secundarias			
	Temporal Iluvias		Temporal Iluvia-nieve		Total temporales		Tormentas		Deshielo		Desembalse	
	N.º	%	N.º	%	N.º	%	N.º	%	N.º	%	N.º	%
1960-1979	13	31,7	6	14,6	19	46,3	2	4,9	6	14,6	1	2,4
1980-2008	7	17,1	12	29,3	19	46,3	1	2,4	12	29,3	3	7,3
Total (*)	20	48,8	18	43,9	38	92,7	3	7,3	18	43,9	4	9,8

Tabla 3. Causas de las inundaciones en la cuenca del Carrión. Tramo Villoldo (1960-2008).
 (*). El porcentaje se calcula respecto al número total de episodios habidos en el periodo de análisis (41 casos)

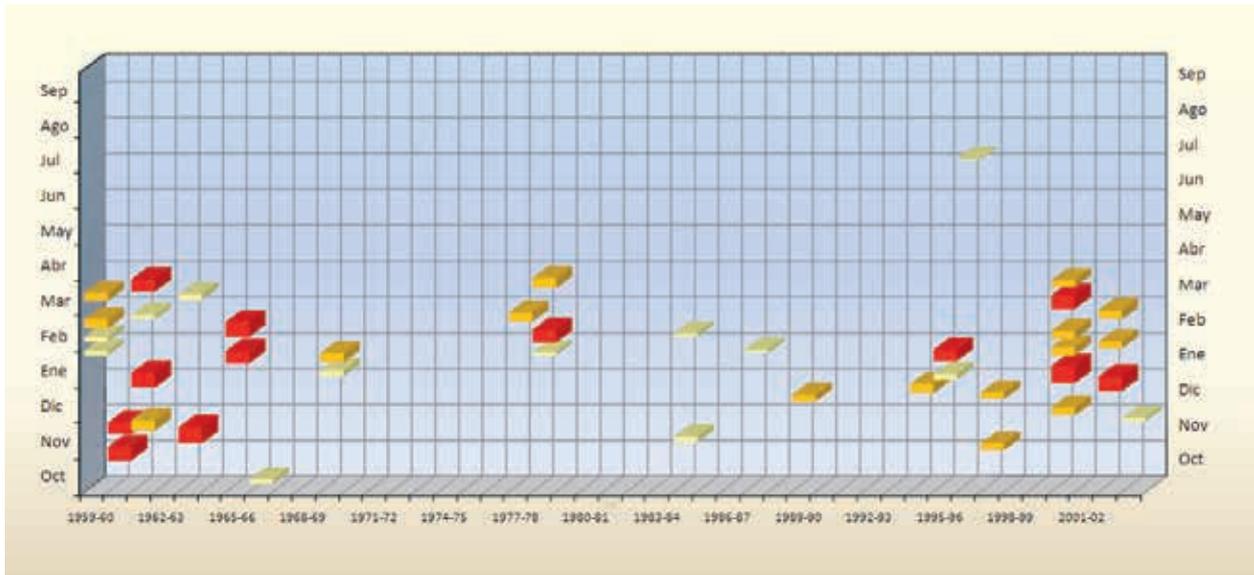


Figura 4. Distribución mensual y duración de los episodios de inundación en el río Carrión (1960-2008)
 En Rojo, inundaciones de más de 10 días de duración; Naranja, 5-10 días duración; y Amarillo, menos de 5 días.

Por otro lado, se ha realizado un estudio evolutivo comparando el cauce histórico (a partir de la fotografía aérea del 56/57) con el actual (a partir de las imágenes del PNOA, LIDAR, y el trabajo de campo). Ello ha permitido identificar dos sectores con dinámicas distintas: el Carrión hasta la confluencia con la Cuezua, y el Carrión después de la citada confluencia. En cada uno de estos sectores se ha efectuado el análisis morfodinámico (histórico, evolutivo, geomorfológico) y su relación con los elementos cartográficos a definir según el SNCZI (mapas a escala 1:5000).

Toda esta información geomorfológico-histórica, obtenida del trabajo de campo y gabinete, ha quedado plasmada en los diferentes mapas elaborados (Figuras 5 a 8).

Discusión

El estudio piloto del Carrión ha permitido reconocer y valorar las bondades y problemas que representa la

aplicación de los criterios de la Guía Metodológica del SNCZI (Fernández, 2009) a un río meseteño atlántico, así como el descubrir ciertas particularidades, no recogidas en la misma, que se consideran de importancia por lo que puedan aportar a la misma:

1. El estudio histórico a partir de fuentes y documentos escritos, permite obtener un *Catálogo de Inundaciones* más detallado que el deducido de las encuestas, al dar más información sobre la génesis (causa), intensidad (caudales medios y máximos), duración (fecha y número de días), recurrencia (número de años) y efectos de los episodios. Aspectos muy importantes en la plasmación cartográfica (zonación de la inundabilidad).
2. Tratar la duración de los eventos aporta a su vez información sobre su intensidad, génesis y tipología, siendo ésta muy distinta a la de otros ríos peninsulares (precipitaciones prolongadas con o sin deshielo). En la jerarquización de episodios se ha de valorar

tanto su duración como los caudales en ellos registrados.

3. Analizar las causas (dinámica atmosférica) ayuda a establecer la tipología y efectos que deparan, además de poner en evidencia que en este ámbito el modelado hidrológico no debe hacerse únicamente en función de "tormentas tipo" ni de los efectos motivados por el máximo caudal anual.
4. En la validación de episodios es fundamental comparar las fechas detectadas con los caudales y los registros pluviométricos habidos no sólo durante el episodio sino en fechas anteriores y en tramos de la cuenca aguas arriba del área de estudio.
5. Deben cartografiarse las áreas de confluencia, no

sólo de grandes afluentes sino de pequeños arroyos temporales al condicionar las dimensiones de la Zona de Flujo Preferente (ZFP).

6. Deben representarse los restos de trazados antiguos (meandros abandonados, cauces no activos alejados de la corriente principal y que no forman parte del área inundable actual). Se propone incluir una *ZFP no funcional o histórica*.
7. Se han de valorar los isleos que aparecen dentro de los lóbulos de los meandros o en una determinada margen del río que, aunque pertenecientes al DPHP, se manifiesten como terrenos no inundables.
8. Sobre terrenos muy antropizados es muy difícil el reconocimiento de evidencias geomorfológicas. La ti-

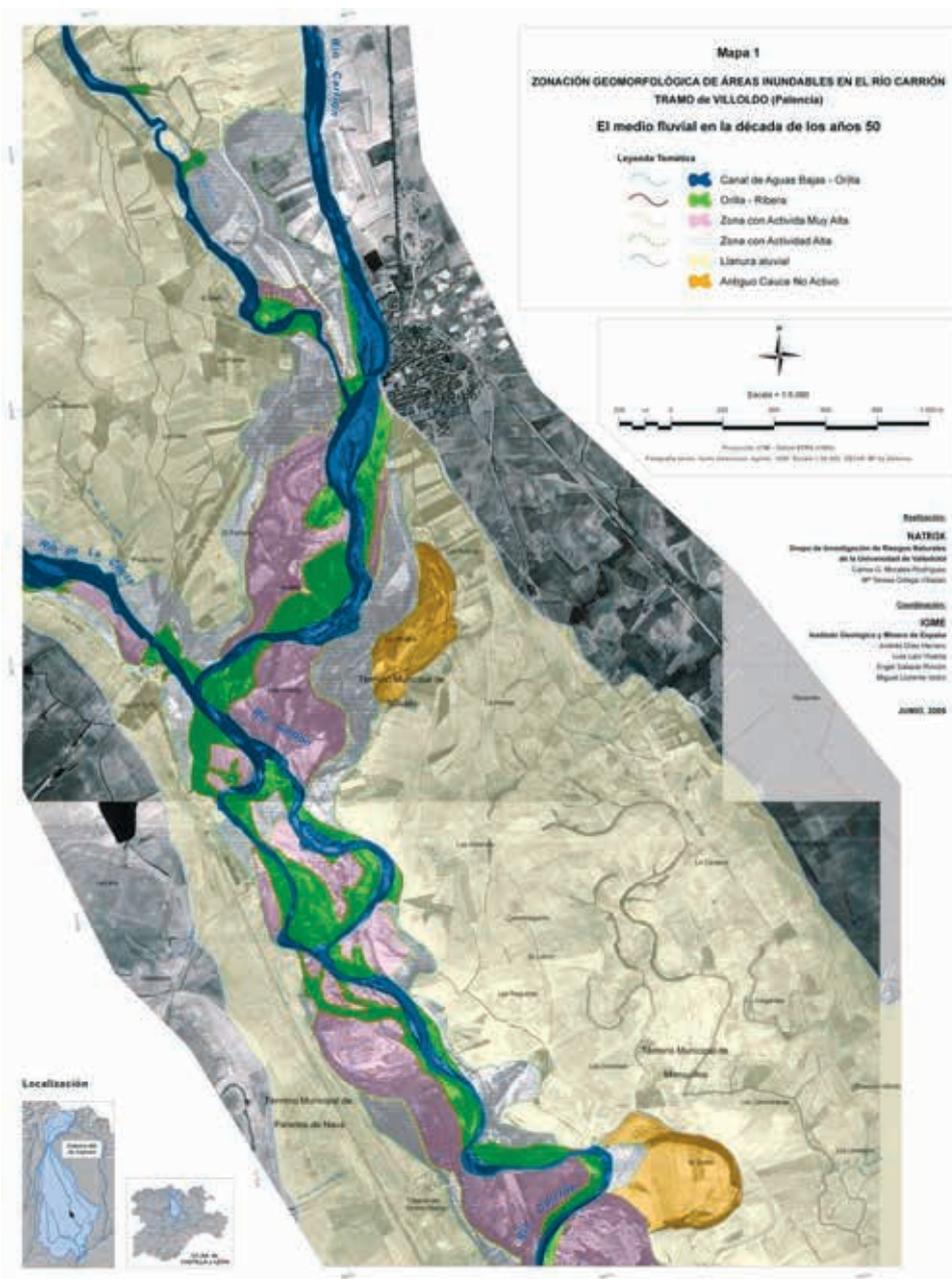


Figura 5. Zonación del medio fluvial en la década de 1950 (establecida como régimen más natural).

pología de flujos canaliformes (A, B y C de la Guía Metodológica) no siempre tiene que ver con el distinto grado de inundabilidad, ni con la mayor o menor proximidad al cauce. Puede que no haya evidencias o que apenas se intuyan y formen parte de un terreno altamente inundable. Se propone incluir la categoría de *Evidencias antropizadas* (orillas artificiales o antrópicas, levées y terrazas realizadas...).

9. Los cursos con cambios significativos de trazado, por dinámica natural o artificial, no suelen mantener la correspondencia de Cauce Histórico con DPHP, sobre todo si los terrenos abandonados tienen remotas posibilidades de volver a ser ocupados. Esto puede motivar numerosas dudas al delimitar acertadamente

el DPHPa y el DPHPb. Se propone sopesar otras posibles dinámicas fluviales o emplear delimitaciones más comprensivas, como un *DPH genérico*.

10. Se propone considerar otra Zonación de Inundabilidad más acorde a la realidad dinámica del río en cuestión y a los impactos socioeconómicos que pueda generar: Inundabilidad Muy alta (periodo de retorno inferior a 10 años), Alta (entre 10-50 años), Media (entre 50-100 años) y Baja (mayor a 100 años). Se desestima el empleo de Inundabilidad Máxima, al considerarse implícita en el último rango y en tanto que el término puede ser contradictorio ("máximo" haría referencia una componente espacial y no temporal).

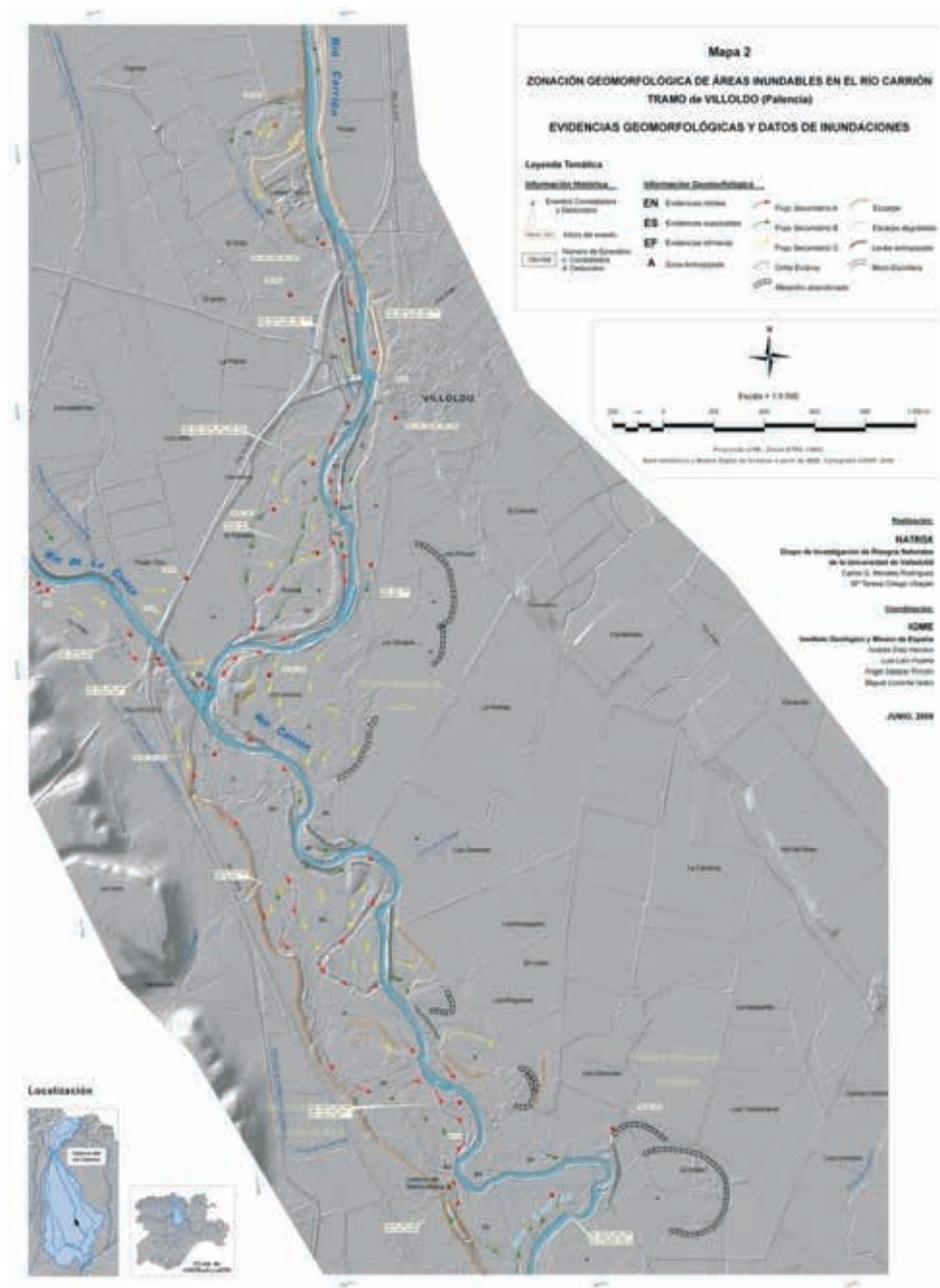


Figura 6. Evidencias geomorfológicas e información de inundaciones, histórica (eventos constatados y deducidos) y geomorfológica (flujos secundarios, evidencias nítidas...).

Todas estas apreciaciones deben interpretarse como un intento de aportar nuevos argumentos de las características y problemáticas inherentes a los ríos de interior. Es el propósito de los autores que el diseño del SNCZI contemple la mayor diversidad posible de escenarios de comportamiento.

Conclusiones

El *Piloto Carrión* ha tenido como objetivo prioritario contribuir al desarrollo metodológico del estudio y delimitación de las áreas inundables de la península Ibérica, y aportar ideas respecto a la definición y establecimiento del Dominio Público Hidráulico Probable, Zona de Flujo

Preferente y Zonificación del área inundable, según establece el SNCZI.

El punto de partida ha sido la aplicación de los principios históricos y geomorfológicos recogidos en la *Guía Metodológica del SNCZI*. Ello ha permitido comenzar con una base sólida de contenidos, verificar y comprobar determinados procesos fluviales, pero también evidenciar la ausencia de tratamiento de algunos aspectos, y por lo tanto, la posibilidad de proponer otros nuevos que añadir a los existentes.

El hecho de tratarse de un espacio del interior peninsular fuertemente intervenido por el hombre, represen-

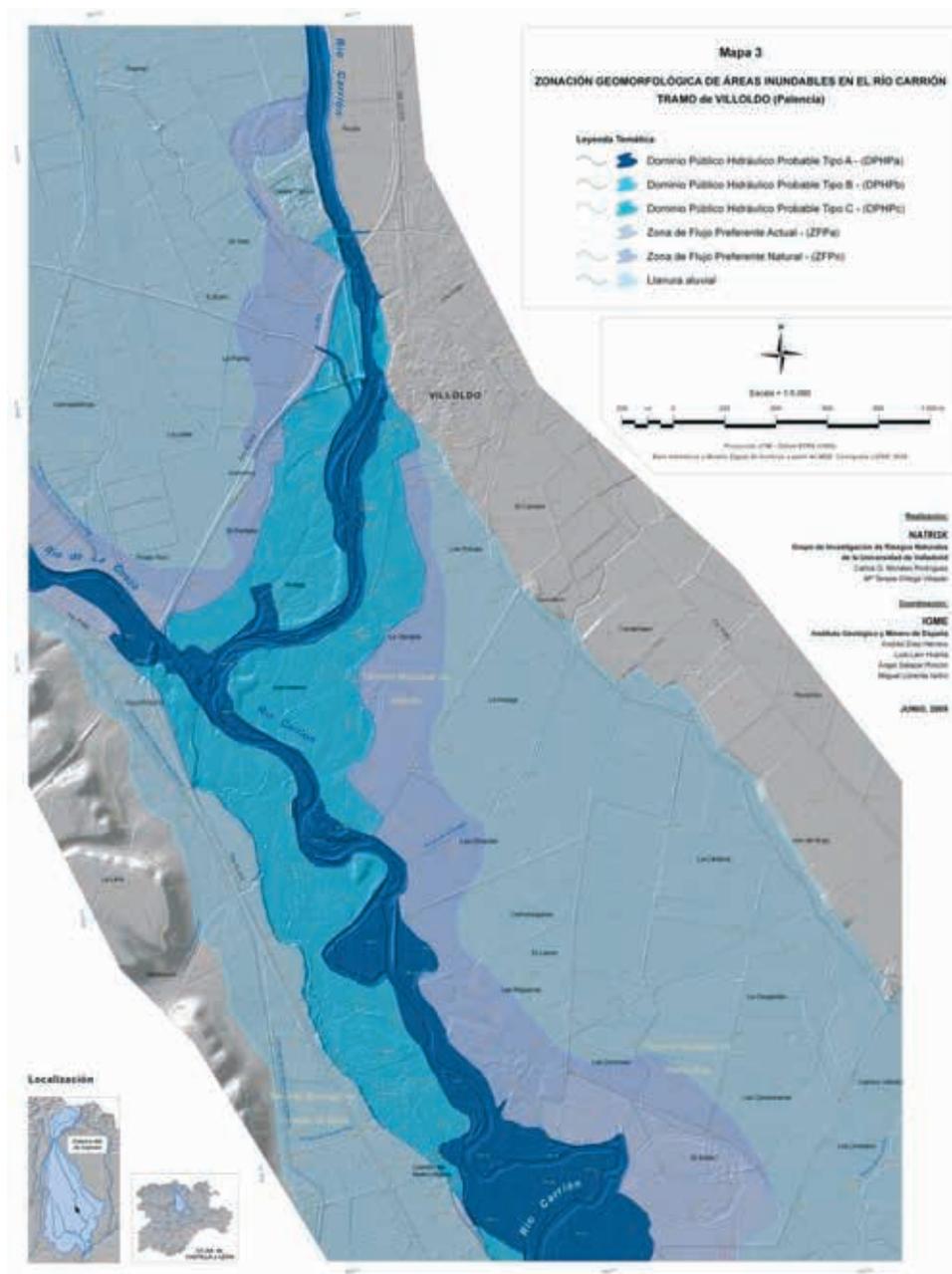


Figura 7. Zonación geomorfológica del SNCZI: Dominio Público Hidráulico Probable (en sus modalidades DPHPa, DPHPb y DPHPc), Zonas de Flujo Preferente (ZFP actual y natural), y llanura aluvial.

ta un modelo fluvial distinto al tratado como modelo en la Guía Metodológica. Las actividades económicas desarrolladas en estas llanuras aluviales han modificado sustancialmente el tipo, dimensión y disposición de las características fluviales y de sus evidencias geomorfológicas. Además, es un espacio donde el Carrión ha experimentado importantes cambios de trazado en los últimos 50 años, donde recibe el aporte de arroyos y caces, y donde tiene lugar una confluencia fluvial. Por lo tanto, su estudio contribuye a aumentar las posibilidades a contemplar en el comportamiento y dinámica de los ríos. En unos pocos kilómetros coinciden trazados diversos (rectilíneos, trenzados y meandriformes), lo que

permite tener una valoración más diversificada sobre la evolución del río.

Al hilo de la investigación han ido surgiendo problemáticas diversas, particularidades propias, que se ha considerado oportuno tener en cuenta por lo que supone de posible mejora al entendimiento de la diversidad geomorfológica y la representación cartográfica de la dinámica fluvial. Algunos de los aspectos que conviene subrayar son:

- La aplicación de otros procedimientos metodológicos complementarios y/o permutables cuando se carezca

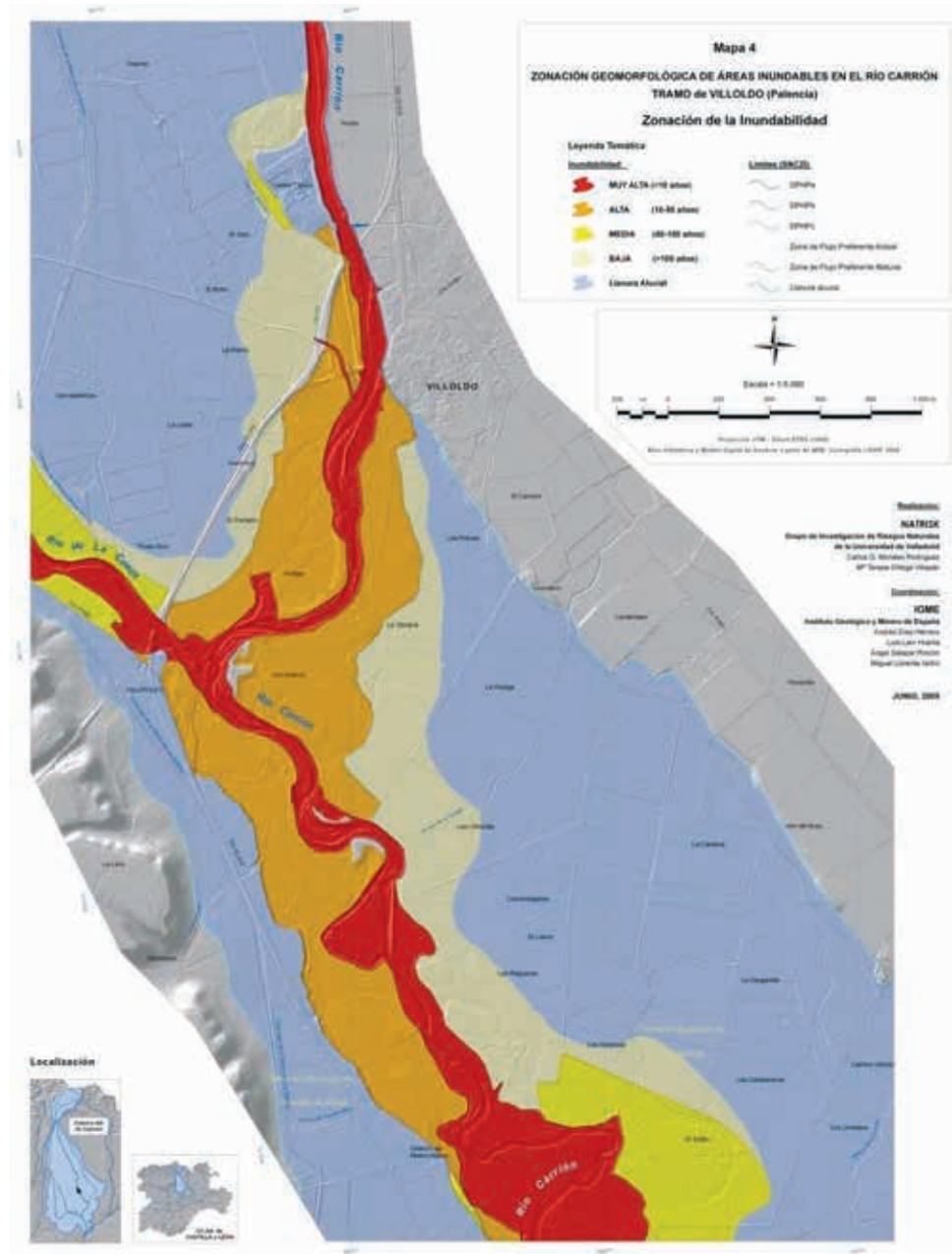


Figura 8. Zonación de la Inundabilidad: Muy alta (< 10 años), Alta (10-50 años), media (50-100 años) y Baja (> 100 años).

de cierta información (encuestas, calados, fotos...), como ha sido la consulta de la prensa diaria, pues facilita la elaboración de un Catálogo de Inundaciones con una estructura más completa (registro homogéneo y continuo en el tiempo).

- Se sugiere el tratamiento de la duración de los episodios de inundación, las causas meteorológicas que las generan, o el establecer una tipología en las mismas. Aspectos de indudable importancia al permitir valorar su intensidad, recurrencia y peligrosidad.
- Se proponen nuevos elementos cartográficos, como una gama específica para las evidencias antropizadas; la presencia de diques (naturales o artificiales), acequias y canales artificiales; la existencia de cauces antiguos no activos; el tratamiento de los espacios no inundables (isleos); la posibilidad de hablar de una ZFP histórica o no funcional; la utilización de categorías comprensivas (DPHP genérico), etc.
- Se señala un procedimiento de conexión entre los modelos histórico-geomorfológicos con los hidrológico-hidráulicos mediante el uso de Criterios de excedencia para la construcción de las series de caudales y el análisis de las causas genéticas. Además de la posibilidad de ajustar unos y otros, pues aportaría argumentos para la prevención.
- Se plantea una nueva zonación de la inundabilidad.

El estudio realizado demuestra la importancia que tienen los estudios geomorfológico-históricos a la hora de delimitar el DPHP y la ZFP. Aunque su análisis no es exclusivo para la delimitación de tales elementos, sí ha demostrado que cartográficamente se afina con mayor precisión que la que dan los modelos hidráulicos, al menos en este sector. La posibilidad de reconocer diferentes DPHP (a, b y c) y ZFP (n y a), permiten valorar con mayor detalle el grado de inundabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por la Encomienda de gestión entre el IGME y la Dirección General del Agua. Los autores agradecen las facilidades dadas para su realización a las personas responsables y coordinadoras de la misma por ambas partes: Juan Antonio López Geta, Loreto Fernández, Carlos Martínez y Carmen Antón (IGME), y Cristina Danés, Manuel Varela y Jesús Yagüe (DGA); agradecimiento extensivo a todos los compañeros del IGME que han participado en las otras 13 actividades de la Encomienda. También deseamos agradecer la colaboración prestada en las diferentes tareas a J. Marquínez (C.H. Cantábrico), R. Goya y M.A. Cuadra

do (CHD), E. Fernández y S. Anadón (Indurot), J. Lastra (AcuaNorte), P. Rodríguez (NATRISK-UVa), Ambisat S.L., y los miembros del Grupo de Inundaciones de la DGA y la comisión técnica del SNCZI.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, F.J. (Coord.) (1985): *Geología y prevención de daños por inundaciones*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 421 pp.
- Barnolas, M. y Llasat, C. (2007): *Metodología para el estudio de inundaciones históricas en España e implementación de un SIG en las cuencas del Ter, Segre y Llobregat*. Monografías M-90, CEDEX, Madrid, 264 pp.
- Barriandos, M. (1994): *El clima histórico de Catalunya. Aproximación a sus características generales (Siglos XV-XIX)*. Tesis Doctoral inédita, Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Barcelona.
- Barriandos, M. y Martín-Vide, J. (1998): Secular Climatic Oscillations as Indicated by Catastrophic Floods in the Spanish Mediterranean Coast Area (14th-19th Centuries). *Climatic Change*, 38, 473-491.
- Benito, G. (2006): Riesgos de inundaciones: tendencias históricas y perspectivas de acuerdo con el cambio climático. *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 20(3-4)- 29-44.
- Benito, G.; Barriandos, M.; Llasat, C.; Machado, M.J. y Thorndycraft, V.R. (2005): Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. En: Moreno, J.M. (Coord.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*, Ministerio de Medio Ambiente, 527-548.
- Benito, G.; Díez, A. and Fernández de Villalta, M. (2003a): Magnitude and frequency of flooding in the Tagus basin (Central Spain) over the last millennium. *Climatic Change*, 58, 171-192.
- Benito, G.; Díez, A. and Fernández de Villalta, M. (2004): Flood response to NAO and Solar Activity in the Tagus Basin (Central Spain) over the last millennium. *Climatic Change*, 66, 27-28.
- Benito, G.; Machado, M.J. and Pérez-González, A. (1996): Climate change and flood sensitivity in Spain. In: *Global Continental Changes: the context of Palaeohydrology*. Geological Society Special Publication, 115, 85-98.
- Benito, G.; Rico, M.T.; Sánchez Moya, Y.; Sopeña, A.; Thorndycraft, V.R. y Barriandos, M. (2008b): Evaluación de los impactos climáticos y antrópicos en la hidrología de paleoinundaciones del río Guada-

- lentín. En: J. Benavente y F.J. Gracia (Eds.), *Trabajos de Geomorfología en España*. X Reunión Nacional de Geomorfología, Cádiz, 373-376.
- Benito, G.; Sopena, A.; Sánchez-Moya, Y.; Machado, M.J. y Pérez-González, A. (2003b): Palaeoflood record of the Tagus River (Central Spain) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1737-1756.
- Benito, G.; Thorndycraft, V.R.; Rico, M.; Sanchez-Moya, Y. and Sopena, A. (2008a): Palaeoflood and floodplain records from Spain: Evidence for long-term climate variability and environmental changes. *Geomorphology*, 101, 68-77.
- Bentabol, H. (1900): *Las aguas de España y Portugal*. Comisión del Mapa Geológico de España. Viuda e Hijos de M. Tello, Madrid.
- Comisión Nacional Protección Civil (1988): *Las Inundaciones en España*. Informe General. 2 volúmenes, y *Las inundaciones en la España peninsular*. Informe de Síntesis y Anejos. 2 volúmenes. CTEI.
- CTEI. Dirección General de Protección Civil y Emergencias (1985): *Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas*, en su apartado referente a la *Cuenca del Duero. Estudio de Inundaciones históricas. Mapa de Riesgos Potenciales*. Ministerio del Interior. Secretaría General Técnica.
- Díez, A. y Laín, L. (1998): Aportaciones de los estudios realizados por el ITGE a la prevención del riesgo de inundaciones en España. in: Gómez, A. y Salvador, F. (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*, Universitat de Barcelona, 603-612.
- Díez-Herrero, A.; Benito, G. and Laín-Huerta, L. (1998): Regional Palaeoflood Databases Applied to Flood Hazards and Palaeoclimate Analysis. In: *Palaeohydrology and Environmental Change*. Chapter 24, pp. 335-347, John Wiley & Sons Ltd., Chichester (England).
- Díez, A.; Benito, G.; Casas, M.A.; Barriandos, M.; Fernández, M. y Lorenzo, A. (2003): Aplicación de los SIG a las bases de datos de paleoinundaciones: Paleotagus y SPHERE-GIS. *Seminario Euromediterráneo sobre Nuevas Tecnologías Aplicadas a la Gestión de Desastres. Foro Euromediterráneo sobre Prevención de Catástrofes*, Madrid,, 6 al 8 de octubre de 2003.
- Díez-Herrero A.; Benito, G.; Porat, N. & Gutiérrez-Pérez, I. (2005): Upper Pleistocene palaeofloods in the Duratón River gorge (Central Spain). In: F. Gutiérrez, M. Gutiérrez, G. Desir, J. Guerrero, P. Lucha, C. Martín, J.M. García-Ruiz (Eds.), *Abstracts Volume, Sixth International Conference on Geomorphology*. Fluvial Geomorphology and Palaeohydrology, pag. 113. Zaragoza (Spain) September 7-11, IAG-SEG-UZAR.
- Díez-Herrero, A.; Lain-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008): *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia n.º 1, 190 págs., Madrid.
- Díez Herrero, A., Lain, L., Salazar, A., Castaño, S. y Llorente, M. (2009a, Dtors.), *Actividad 14. Asesoramiento para la incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el análisis y cartografía de áreas inundables por avenidas torrenciales*. Acuerdo para la encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua), al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Madrid, Centro de Documentación del IGME, julio de 2009, 429 páginas.
- Díez-Herrero, A.; Lain-Huerta, L. & Llorente-Isidro, M. (2009b): *A Handbook on Flood Hazard Mapping Methodologies*. Publicacions of the Geological Survey of Spain (IGME), Series Geological Hazards /Geotechnics No. 2, 190 pp., Madrid.
- Fernández, E. Coord., (2009): *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Estudios históricos y geomorfológicos. (Borrador V5), inédito, Dirección General del Agua, 138 p.
- Garzón, M.G.; Garrote, J. y Ortega, J.A. (2008): *Informe-memoria de las subactividades 14.1 y 14.3*. En: Díez Herrero, A., Lain, L. y Salazar, A. (Dtors.), *Actividad 14. Asesoramiento para la incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el análisis y cartografía de áreas inundables por avenidas torrenciales*. Acuerdo para la encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua), al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Madrid, Comisión Mixta de Seguimiento de la Encomienda DGA-IGME y Grupo de Inundaciones de la DGA, diciembre de 2008, 280 páginas.
- Garzón, M.G.; Garrote, J. y Ortega, J.A. (2009): *Informe-memoria de las subactividades 14.2 y 14.4*. En: Díez Herrero, A., Lain, L. y Salazar, A. (Dtors.), *Actividad 14. Asesoramiento para la incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el análisis y cartografía de áreas inundables por avenidas*

- torrenciales. Acuerdo para la encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua), al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Madrid, Comisión Mixta de Seguimiento de la Encomienda DGA-IGME y Grupo de Inundaciones de la DGA, julio de 2009, 146 pág.
- Lastra, J., Fernández, E., Díez, A. y Marquín, J. (2008): Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. *Natural Hazards*. 45: 277-293.
- Llorente, M. (2007): Impacto del Cambio Climático en las inundaciones. *Jornadas sobre gestión de zonas inundables*, Gijón.
- Llorente, M.; Díez-Herrero, A. y Laín, L. (2006): La experiencia del IGME en cartografía de peligrosidad de avenidas torrenciales e inundaciones: de Casiano de Prado a PRIGEO. En: Díez, A.; Laín, L. y Llorente, M. (Eds.), *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio Ambiente, Riesgos Geológicos nº 7, págs. 41-63, Madrid.
- Llorente-Isidro, M.; Díez-Herrero, A.; Laín-Huerta, L. & Lastra, J. (2009): Climate Change and Flood Hazard Analysis in Spain. *Workshop on Climate Change and Flooding, Working Group F on Floods*. 8-10 September, Karlstad (Sweden). Session 3: Climate change challenges for risk management and civil protection in relation to floods: focus on prevention and preparedness. Swedish Civil Contingencies Agency.
- Marquín, J., Díez, A., Fernández, E., Lastra, J. y Llorente, M. (2008): "Aspectos geomorfológicos en la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico y el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables". *Trabajos de Geomorfología en España 2006-2008. X Reunión Nacional de Geomorfología, Sociedad Española de Geomorfología*, Cádiz, pp. 377-380.
- Morales, C. & Ortega, M^a T. (2002): "Las inundaciones en Castilla y León". *Eria*, 59. Revista cuatrimestral de Geografía (servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo), pp. 305-332.
- Morales, C.G. y Ortega, M.T. (2009): *Memoria científico-técnica de métodos histórico-geomorfológicos y mapas de zonación 1:5.000*. En: Díez Herrero, A., Laín, L., Llorente, M. Y Salazar, A. (Dtors.), Estudio piloto del río Carrión (Tramo de Villoldo). Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Madrid, Comisión Mixta de Seguimiento de la Encomienda DGA-IGME y Grupo de Inundaciones de la DGA, junio de 2009, 123 páginas + 4 mapas DIN A-0 a escala 1:5.000.
- Moreno, J.M. (Coord., 2005): *Principales Conclusiones de la Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 39 pp.
- Oliva, M.; López-Bustins, J.-A.; Barriendos, M.; Muedra, C.; Martín-Vide, J. (2006): Reconstrucción histórica de la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO) e inundaciones en el levante peninsular (1500-2000). *V Congreso de la Asociación Española de Climatología*, Zaragoza 18 a 21 de septiembre de 2006.
- Ortega, J.A. (2007): *Paleocrecidas, avenidas recientes e hidroclimatología en la cuenca media y baja del río Guadiana*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 535 pp.
- Ortega, J.A. y Garzón, G. (2003): Palaeohydrology of the Lower Guadiana River Basin. In: *Palaeofloods, Historical Data and Climatic Variability: Applications in Flood Risk Assessment*, CSIC, Madrid, 33-38.
- Ortega, J.A. y Garzón, G. (2004): Influencia de la oscilación del Atlántico norte en las inundaciones del Río Guadiana. In: *Riesgos Naturales y antrópicos en Geomorfología*, CSIC, Madrid, 117-126.
- Ortega, J.A. y Garzón, G. (2006): "Interpretación de los depósitos de avenida como clave para establecer la dinámica de la llanura de inundación". En Pérez Alberti y J. López Bedoya (Eds.): *Geomorfología y Territorio*. Actas De la IX Reunión Nacional de Geomorfología. Universidad de Santiago de Compostela. Pp. 629-644.
- Ortega, J.A. y Garzón, G. (2009): A contribution to improved flood magnitude estimation in base of palaeoflood record and climatic implications- Guadiana River (Iberian Peninsula). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 229-239.
- Rico Sinobas, M. (1850): *Fenómenos meteorológicos en la Península Ibérica desde el siglo IV hasta el XIX*. Manuscrito, 23 4 15, Archivo de la Real Academia de Medicina de Madrid.
- Rico, M.T. (2004): *Las paleocrecidas en la cuenca media del río Segre durante el Pleistoceno superior-holoceno: registros morfosedimentarios y análisis hidrológico*. Tesis doctoral inédita, Zaragoza, 398 pp.
- Trigo, R.M.; Pozo-Vázquez, D.; Osborn, T.J.; Castro-Díez, Y.; Gámis-Fortis, S. and Esteban-Parra, M.J. (2004): North Atlantic Oscillation influence on

precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.*, 24, 925-944.

Vaquero, J.M. (2004): Solar Signal in the number of floods recorded for the Tagus River Basin over the Last Millenium. Comment on "Magnitude and frequency in the Tagus Basin (Central Spain) over the last millennium" by G. Benito *et al* 2003. *Climatic Change*, 66, 23-26.

Villarroya, C. y Sánchez, F.J. (2006): La delimitación del dominio público hidráulico y las zonas inundables en el Proyecto Linde. En Díez, A., Laín, L. y Llorente, M. (Eds.): *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*. Publicaciones del IGME, Serie Medio Ambiente, Riesgos Geológicos nº 7, Madrid. 65-72.

Yagüe, J. (2007): El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. *Jornadas sobre Gestión de Zonas Inundables*, Gijón, 12 y 13 de noviembre de 2007. DGA (MMA).

Bases de datos y redes de control periódicas citadas

DATOS DIARIOS DE PRECIPITACIÓN de los observatorios de Villoldo y Monzón de Campos, para la serie de observación de que dispone cada uno.

DATOS DE CAUDALES DIARIOS del aforo Villoldo para la serie de observación de que dispone.

EL NORTE DE CASTILLA, Periódico regional. Prensa diaria revisada desde enero de 1960 a diciembre de 2008, con un total de 17.885 periódicos.

EL DIARIO PALENTINO. Periódico provincial. Prensa dia-

ria revisada desde enero de 1985 a septiembre de 2008, con un total de 8.760 periódicos.

FOTOGRAFÍAS AÉREAS Y ORTOFOTOS

- Vuelo de 1956/57, a escala 1:33.000 del A.M.S. americano.

- Varios vuelos de la Junta de Castilla y León a diferentes escalas.

- Vuelo de 2003 del SIGPAC a escala 1: 15.000.

- PNOA: Ortofotografía (2004, 2007).

IMÁGENES LIDAR. Confederación Hidrográfica del Duero. Vuelo 2008.

MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL (escala 1:25.000). Instituto Geográfico Nacional (IGN). Año 2000.

MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL (escala 1:50.000). Instituto Geográfico Nacional (IGN). Diferentes años/ediciones (1973, 1992). Hojas: 235 y 273.

MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL (escala 1:50.000). Centro Geográfico del Ejército. Diferentes años/ediciones (1973, 1992). Hojas: 235 y 273.

MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA (escala 1:50.000). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Varios años (Segunda serie 1.ª edición/Serie Magna). Hojas: 235 y 273.

MAPA HIDROLÓGICO DE CASTILLA Y LEÓN (escala 1:400.000). Junta de Castilla y León - Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (Dirección General de Urbanismo y Calidad Ambiental) – 1990.

SEISnet. SISTEMA ESPAÑOL DE INFORMACION DE SUELOS SOBRE INTERNET. www.microleis.com

SEGUNDO INVENTARIO NACIONAL FORESTAL (1986-1996). ICONA. M.º de Medio Ambiente. Varios volúmenes.

DISEÑO Y DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE INTERCAMBIO Y
TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Margarita Gómez Sánchez



En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 1 *Diseño y aplicación de un sistema de intercambio de información hidrogeológica*, de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Directora de la actividad

Margarita Gómez Sánchez. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España (por orden alfabético)

Juan Carlos Gumiel Gutiérrez
Román Hernández Machado
Alfredo Iglesias López
Juana López Bravo
M.ª Eugenia Lozano
Amalia de Mera Merino
Fernando Pérez Cerdán
Ángel Prieto Martín
Pablo Sastre Olmos
Leticia Vega Martín

DISEÑO Y DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE INTERCAMBIO Y TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA

INTRODUCCIÓN

A través de esta actividad del acuerdo para la Encomienda de Gestión (EG) de la Dirección General del Agua (MARM) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se ha alcanzado el principal objetivo perseguido y que consistía en que pudieran compartir con ambos organismos, tanto la nueva información hidrogeológica que se elaboraría a partir de las actividades de la EG, como la información ya existente y generada por el IGME, de interés para el MARM, sobre aguas subterráneas y de la que este organismo es depositario.

Por lo tanto, el desarrollo fundamental se centró en establecer la metodología de intercambio y traspaso IGME-MARM de la información hidrogeológica y medioambiental, relacionadas con las aguas subterráneas, definiéndose los mecanismos necesarios de organización, normalización y transferencia.

Los tipos de información que, fundamentalmente, se manejaron dentro de la actividad condicionaron las tareas que se llevaron a cabo en el proyecto:

a) Información hidrogeológica de nueva creación, elaborada en la Encomienda de Gestión IGME-MARM: de tipo cartográfico, bases de datos, documental e imágenes. Esta información se generó de manera coordinada y de acuerdo con una sistemática y normalización, que permitió dotar de una integridad propia a la Encomienda. Por esta razón se hizo preciso facilitar, a los responsables de las restantes Actividades de la EG, una metodología de organización y estructura de la información que fuera aplicada en los diversos trabajos que se iban a realizar. Con este fin, se constituyó como un marco general de actuación en el que se consideró fundamental alcanzar la coordinación el resto de las actividades de la EG, en cuanto a unificar, normalizar y sistematizar los formatos de recopilación y transferencia de la información. Al finalizar las 14 actividades de la encomienda, se pretendía obtener un resultado conjunto y homogéneo.

b) Información hidrogeológica histórica, existente en el IGME, de interés para el MARM: de tipo cartográfico, bases de datos, documental e imágenes. Esta información, en principio, presentaba dificultades añadidas al tratarse de información con características y formatos diferentes, por la necesidad de establecer mecanismos de asignación y selección de la información por 'masa de agua subterránea', o por precisar el diseño de mecanismos especiales para la puesta a disposición del MARM.

Como consecuencias, el desarrollo de la actividad, ha permitido disponer de un sistema de intercambio de información hidrogeológica dinámico y actualizado (INTERHIDRO), a través del cual se facilita al MARM la adquisición de todo tipo de información relativa a las aguas subterráneas disponibles en el IGME (generada o no en la Encomienda de Gestión MARM-IGME) mediante selección condicionada puntual y espacial, pudiendo ser visualizada y descargada en el momento y lugar que se solicita.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

La metodología seguida, ha tenido dos partes bien diferenciadas, pero estrechamente relacionadas entre sí. En la primera se han llevado a cabo tareas relativas a la organización, sistemática, nomenclatura y formatos de la información (Encomienda de Gestión e Información IGME) con el fin de obtener un mejor intercambio: consulta y descarga, y en la segunda, el diseño y desarrollo propiamente dicho de la aplicación Web INTERHIDRO (Sistema de Intercambio de Información Hidrogeológica), que permitiría tanto la carga y catalogación de la información, su consulta, espacial y temática; así como, finalmente, la descarga en los formatos correspondientes.

Durante la fase de planificación inicial y de diseño de la metodología del proyecto, fue prioritario el estable-

cimiento y definición de una serie de especificaciones y criterios básicos que deberían ser seguidos en la organización de la información geocientífica, principalmente en aquella información que sería de nueva creación. Se trataba de conseguir al finalizar la encomienda, que todas las actividades que la componían constituyeran un conjunto integrado y cohesionado.

Estos planteamientos, en las primeras fases cualquier proyecto, permiten establecer una adecuada estructura y sistemática de la información, algo que ya es imprescindible para el soporte de los datos en el ámbito informático, facilitando tanto la realización de los trabajos como la obtención y explotación de los resultados del proyecto.

Además, la actividad en su inicio, y relacionado con las tareas de coordinación con el resto de las actividades de la EG, estableció como labor prioritaria definir una información común de referencia para toda la encomienda, mediante la revisión, análisis, organización y distribución de la información cartográfica de base e información de otro tipo, de interés para la EG.

Por otra parte, casi paralelamente, se inició el imprescindible bloque de trabajo, que daría lugar al diseño y desarrollo de la aplicación del Sistema de Intercambio de Información Hidrogeológica INTERHIDRO.

Metodología relativa a la información

Información general de referencia

El IGME puso a disposición de todos los participantes en las Actividades de la Encomienda de Gestión un repositorio (INTERHIDRO en INFOSERVIDOR), con la información básica de partida procedente principalmente del IGME, el MARM y las Confederaciones Hidrográficas, que fueron identificadas como las fuentes fundamentales de información. Otras fuentes de información consideradas de interés fueron el CEDEX o el IGN.

En la figura 1 se pueden observar algunos ejemplos de base cartográfica y mapa digital de elevaciones, generados para distintas masas de agua de diversas demarcaciones, para los trabajos de la Actividad 2. ('Caracteriza-

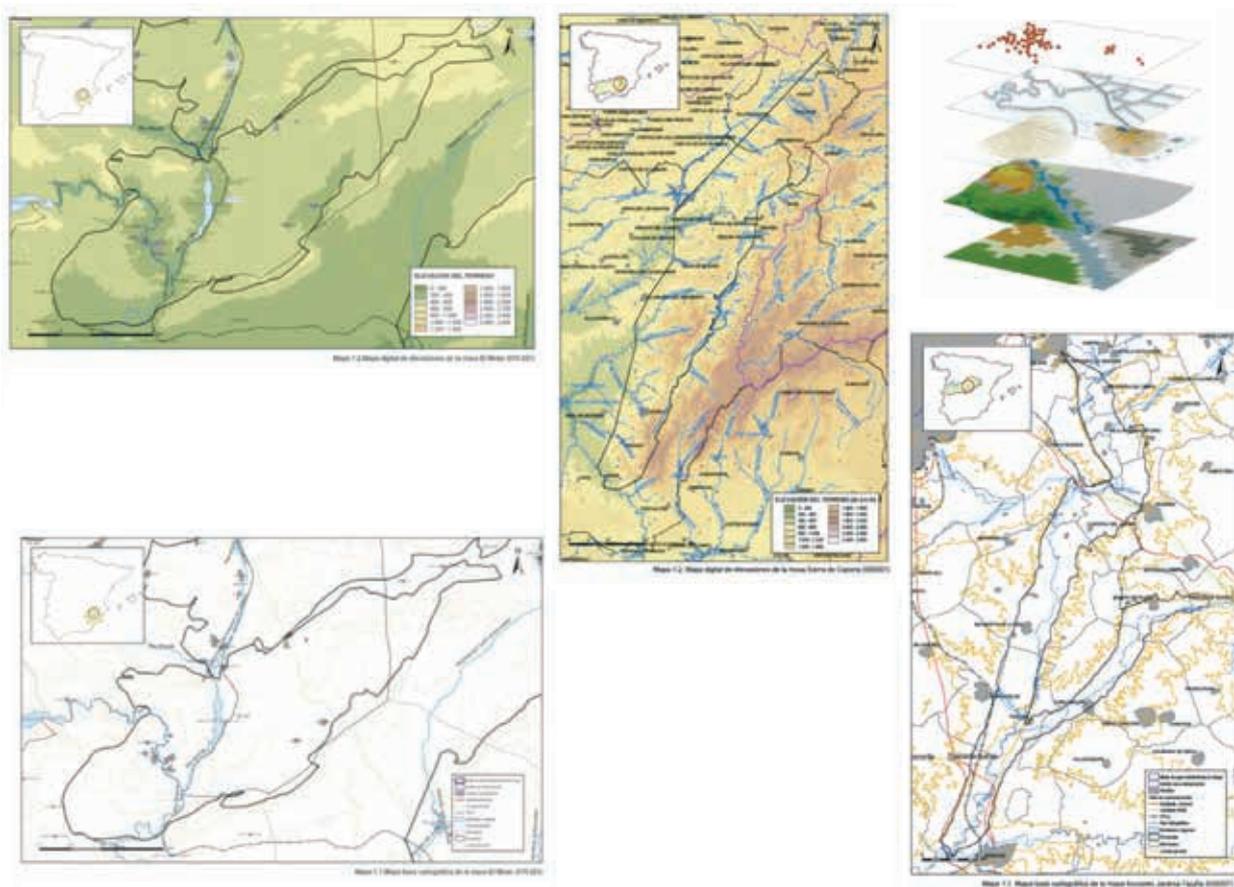


Figura 1. Ejemplos de base cartográfica y mapa digital de elevaciones elaborados para distintas masas de agua de diversas demarcaciones de la Actividad 2

ción adicional de masas en riesgo de no cumplir con los objetivos medioambientales 2015’).

En principio, y como norma general, se respetaron la nomenclatura y la estructura de datos original de la información básica de referencia.

Información hidrogeológica de nueva creación

Desde el comienzo de la EG se preveía que las actividades definidas darían lugar a un gran volumen de información, de diferente tipología y con características previsiblemente diversas, que debería ser gestionada para su posterior transferencia e intercambio entre el IGME y el MARM.

La diversidad y complejidad de la información que en cada una de las actividades se iba a generar, unido a que estas comenzaron escalonadamente en el tiempo, hacía prácticamente imposible que, al inicio del proyecto, se pudiera establecer una estructura y sistemática definitiva, definida en profundidad y detallada.

La metodología, que se definió entonces, trató de facilitar la integración y cohesión de toda la información generada, mediante unas pautas básicas de normalización para la organización, la estructura y los formatos de la información. Con este objeto se elaboró una normativa que fue distribuida a todos los participantes de la EG.

El establecimiento de estas pautas pretendía disminuir los problemas que pudieran producirse cuando finalmente se tratara de relacionar y unir la información procedente de las diversas actividades de la EG. Esta metodología se basó en la aplicada por el MARM para el intercambio de la información de los artículos 3, 5 y 8 de la Directiva Marco del Agua en marzo de 2007.

A partir de esa idea, se propuso, por una parte, que la información generada por cada actividad se entregara al IGME, organizada según la estructura básica de directorios recogida en la tabla 1.

En la figura 2 se completa la propuesta de una estructura de directorios genérica, de manera que cada actividad pueda incorporar la información organizada según sean su ‘unidad’ o ‘unidades de trabajo espacial’, tal como se definían en el documento mencionado: por ejemplo puede ocurrir que dentro de una misma actividad se genere una información a nivel nacional, y el resto por demarcaciones o bien que se pueda trabajar indistintamente a nivel de masa o de demarcación.

La sistemática de nomenclatura de la información, por su parte, se definió en función de la actividad de la EG, en que era generada la información, el ámbito espacial de referencia de cada (masa de agua subterránea o demarcación), el contenido del fichero, elemento gráfico, y finalmente otra serie de códigos que completaría su identificación. La tabla 2 recoge, de forma resumida, un ejemplo la sistemática de denominación de ficheros.

DIRECTORIOS	CONTENIDO
 SHAPES	Capas (shapes) que garantizan el reflejo gráfico georreferenciado de la información. La información asociada al elemento gráfico se simplifica al máximo, únicamente queda el código identificativo numérico del elemento correspondiente (polígono, punto o línea).
 BASES	La información alfanumérica asociada a la información gráfica se introduce en una base de datos ACCESS, asegurando el enlace con el elemento geográfico en la capa gráfica, mediante el código identificativo del punto, polígono o línea de que se trate.
 MXD	Los proyectos o composiciones de mapa que contienen el layout y sus layers asociadas. Estos ficheros tendrán extensión .mxd.
 METADATOS	La información relativa al origen de los datos, procesos realizados, versión, responsables.
 DOCUMENTOS	Documento (doc o pdf) donde se documenta la información recogida en los anteriores directorios: descripción de tablas y diccionario de datos. Diversa documentación, informes finales, memorias e imágenes que se generen dentro de la actividad correspondiente.

Tabla 1. Estructura básica de directorios

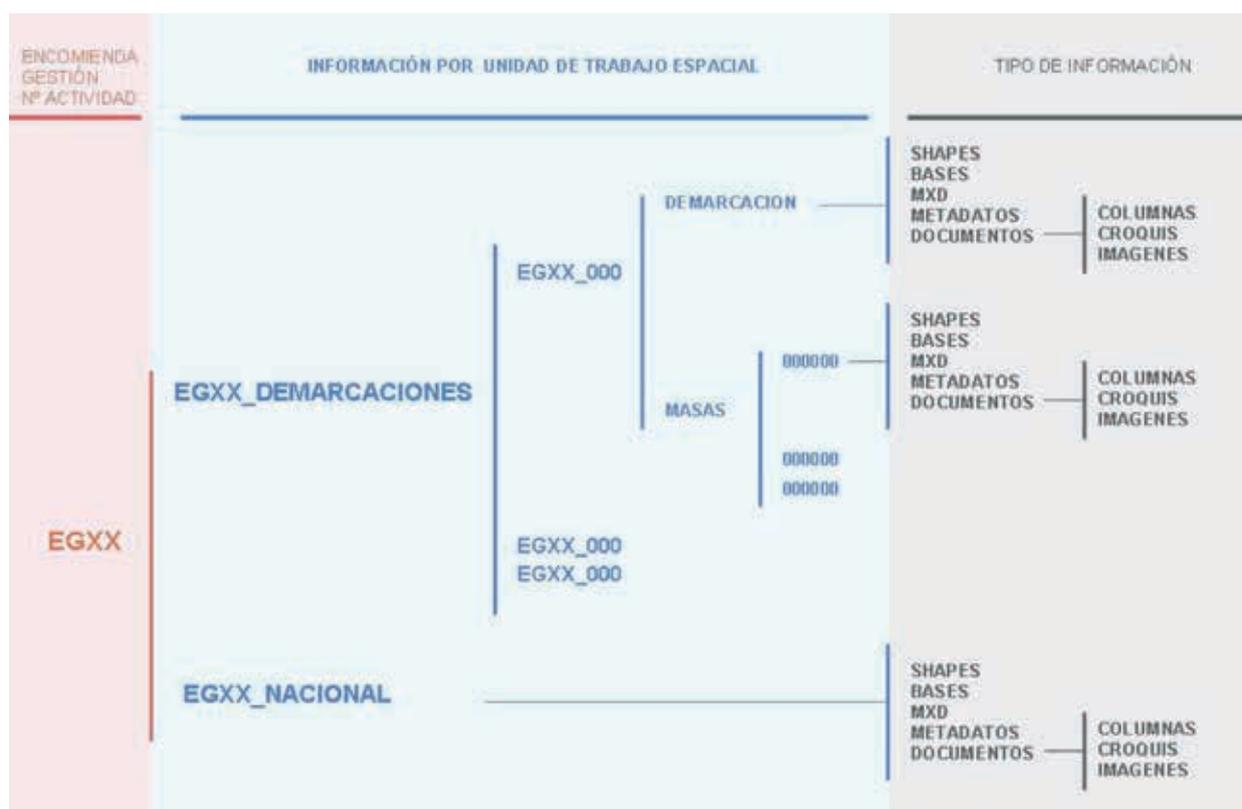


Figura 2. Esquema de organización de directorios

DIRECTORIO	UNIDAD DE INFORMACIÓN	PROYECTO (Tabla 5)	ACTIVIDAD (Tabla 6)	CÓDIGO UNIDAD DE TRABAJO (Tabla 7)	RELATIVO AL CONTENIDO (Tabla 3)	TIPO GEOMÉTRICO DEL ELEMENTO GRÁFICO DE INFORMACIÓN (Tabla 9)	TIPO DE INFORMACIÓN DEL MXD O DEL DOCUMENTO (Tabla 10)	NÚMERO DE ORDEN DEL MXD O DOCUMENTO	NOMBRE COMPLETO DEL FICHERO	EJEMPLOS DE NOMENCLATURA DE FICHEROS
SHAPE	Masa de agua subterránea	EG	XX	000000	nnn	m	----	----	EGXX_000000_nnn_m	EG02_080005_VUL_A.shp
	Demarcación geográfica	EG	XX	000	nnn	m	----	----	EGXX_000_nnn_m	EG06_08_VUL_A.shp
	Término nacional: cuencas intercomunitarias	EG	XX	----	nnn	m	----	----	EGXX_nnn_m	EG05_VUL_A.shp

Tabla 2. Sistemática de nomenclatura de ficheros. Ejemplo: shapes

Esta normativa, sencilla y básica facilitó la *identificación y catalogación* de la información para la organización de su almacenamiento y posterior búsqueda y consulta.

Información hidrogeológica del IGME

En lo referente a la información hidrogeológica y medioambiental relativa a las aguas subterráneas, generada por el IGME de interés para su inclusión en el sistema INTERHIDRO, se identificaron las siguientes bases documentales y factuales:

Sistema de información documental SID_Centro de Documentación: Informes y Mapas

Referido a la *Base_guías de información del fondo documental* con las referencias bibliográficas sobre los documentos generados en los trabajos desarrollados por el IGME en los campos de la investigación minera, geología, hidrogeología, ingeniería medioambiental, geofísica y ciencias de la tierra en general. Cada referencia se acompaña de un fichero asociado con el informe a texto completo e imágenes. La cobertura temporal abarca desde 1970, aunque hay trabajos de

años precedentes y consta de un total de 13.155 registros.

A cada documento se le asignó un índice geográfico que ha permitido su posterior búsqueda mediante consultas espaciales. Gracias a este índice es posible seleccionar y consultar la información documental hidrogeológica, desde la aplicación INTERHIDRO, también mediante criterios de localización (municipios, masas de agua, etc...).

Información hidrogeológica puntual del IGME

—*Inventario de puntos acuíferos*. Inventario nacional de puntos acuíferos del IGME, con datos de situación (coordenadas UTM, cota, cuenca hidrográfica, masa de agua subterránea, provincia, municipio), naturaleza del punto, características constructivas, utilización del agua, etc. La procedencia de esta información corresponde a los proyectos de investigación hidrogeológica del IGME, realizados desde 1966 hasta ahora y supera, en la actualidad, los 130.000 registros.

—*Sondeos históricos del IRYDA*. Base de datos históricos de los sondeos hidrogeológicos realizados, en las distintas provincias de España, por el I.R.Y.D.A. (Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario), anteriormente INC (Instituto Nacional de Colonización, 1956). Los datos hacen referencia a situación, año de construcción, organismo instructor, profundidad del sondeo, nivel de agua medido, método de perforación, etc. También pueden visualizarse los informes y columnas litológicas de los sondeos, de carácter hidrogeológico. Los primeros sondeos registrados en la base datan de los años 50 y los más actuales de los años 90. El número total de registros recogidos en esta base para INTERHIDRO son 2.237

—*Ortoimágenes: Imágenes Landsat 7*. Se han incluido en INTERHIDRO la colección de imágenes Landsat 7, organizadas por hoja 1: 200.000 para España: península ibérica e Islas. Las imágenes Landsat 7 fueron obtenidas a partir de un grupo de satélites lanzados por Estados Unidos (NASA), en abril de 1999 con el objeto fundamental de actualizar la base de datos de imágenes de todo el planeta. Las imágenes recibidas por el Landsat 7 son procesadas por el USGS. El número de hojas 1:200.000 incluidas son 93.

METODOLOGÍA RELATIVA AL DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA. INTERHIDRO

Durante el desarrollo de la Encomienda de Gestión

MARM-GME se definió la metodología de intercambio y traspaso de información hidrogeológica y medioambiental entre estos dos organismos. Se establecieron los mecanismos de organización, normalización y transferencia de la información relacionada con las aguas subterráneas, tanto para aquella generada a lo largo de la EG, como para la elaborada por el IGME, en sus proyectos o la información hidrogeológica de carácter histórico.

Esta metodología tuvo una primera fase de documentación y catalogación, principalmente, de la información de nueva generación, fundamentalmente, y de asignación de índices espaciales a la información de carácter documental.

Simultáneamente se llevaba a cabo la fase de diseño y desarrollo de las herramientas y utilidades de selección (alfanumérica y espacial), búsqueda y descarga de la información, en función del tipo y origen de la información.

Catalogación de la Información

Con el objeto de facilitar la búsqueda y consulta selectiva, desde Internet, de los ficheros y documentos generados en las actividades de la Encomienda de Gestión, se han catalogado y documentado adjudicándoles un conjunto de características y propiedades, tanto de carácter libre (L), como preestablecidos (P). Entre otras son:

- Actividad de la Encomienda a que pertenecen (P)
- Demarcación y/o masa de agua subterránea, descripción de la información (P)
- Descripción (L)
- Autor o responsable de la actividad (L)
- Empresa u organismo que ha realizado la actividad (L)
- Palabras clave (P)
- Comentarios (L)
- Tipo de información (P)

Esta catalogación ha podido realizarse de dos formas:

- 1) Interactivamente, mediante un formulario on line (figura 3), desde el módulo de carga de la aplicación INTERHIDRO, gracias al cual era posible documentar y subir al sistema la información desde el ordenador personal del responsable o técnico que elaboró los trabajos.
- 2) Desde el propio IGME, dentro de los trabajos realizados por la Actividad 1, a través de una herramienta desarrollada en .net (figura 4). Finalmente, la mayor

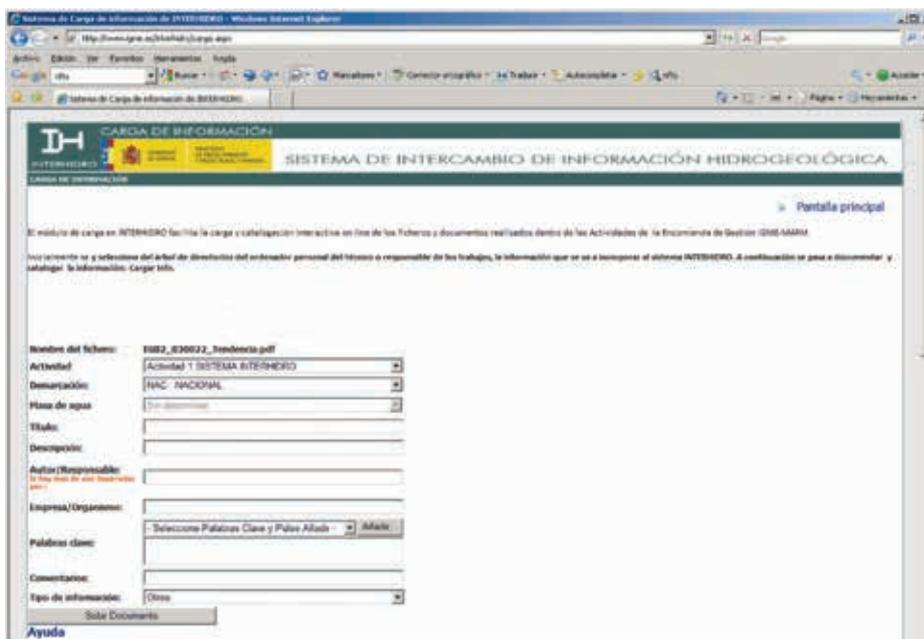


Figura 3. Formulario de catalogación y carga de la Información de la Encomienda de Gestión desde INTERHIDRO

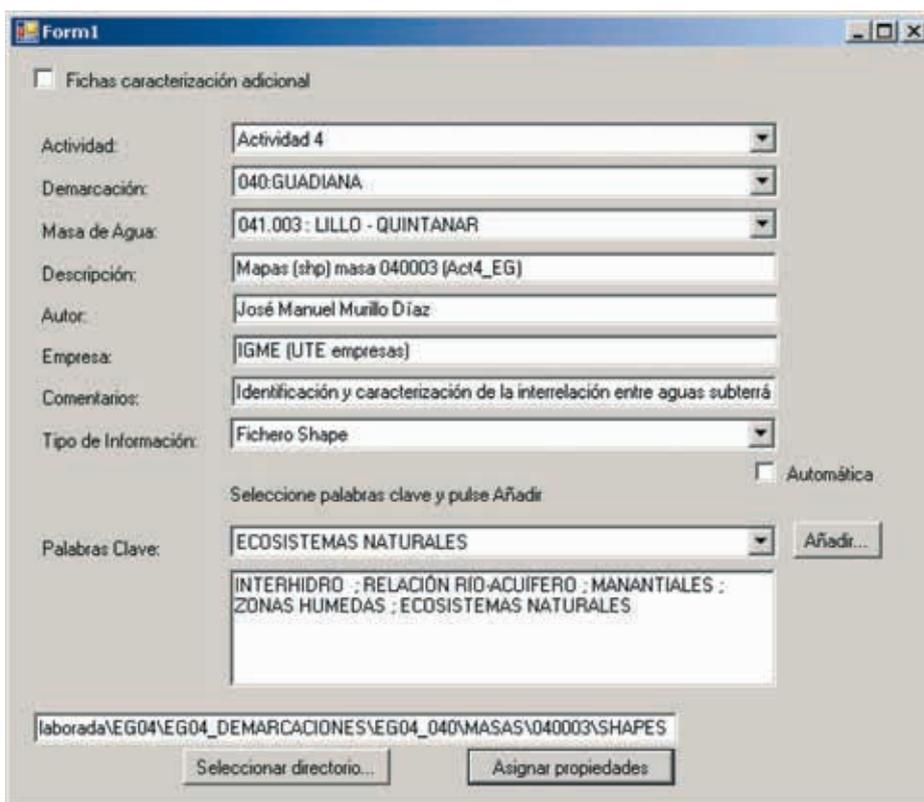


Figura 4. Formulario para la catalogación de la información de la Encomienda de Gestión desde la aplicación interna IGME. Ejemplo

parte de la información de la EG ha sido catalogada y cargada desde esta Actividad.

Especificaciones Técnicas

La aplicación INTERHIDRO sirve como herramienta de búsqueda para todos los usuarios autorizados para su utilización.

Orígenes de datos

La búsqueda se realiza contra varios orígenes de datos que a su vez están en distintos formatos, con distintos esquemas y en servidores distribuidos, siendo extensible a otros orígenes distintos. Los formatos de estos orígenes de datos son cuatro:

- *Documentos del centro de documentación. SID. (IGME).* La base de datos de documentos (SID) está almacenada en SQL Server, tiene una estructura relacional y se diseñó en el año 2000. Para INTERHIDRO se han desarrollado las interfaces de consulta. La geometría se ha geocodificado asociando a cada uno de los más de 12.000 documentos un municipio, provincia, comunidad o país. La aplicación traduce de unas unidades espaciales a otras.
- *Puntos de agua y Sondeos del IRYDA. (IGME).* Bases de datos espaciales de puntos utilizando como repositorio de datos SQLServer 2008 y almacenando su geometría en los nuevos tipos de datos de Microsoft geometry.
- *Ortoimágenes: imágenes Landsat 7. (IGME).* Base de datos ACCESS y sistema de ficheros. La geometría se almacena mediante geocodificación utilizando la distribución 1:200.000.

Información hidrogeológica y medioambiental y fichas de caracterización adicional. Encomienda de Gestión MARM (DGA)-IGME.

Sistema de ficheros que almacena los atributos mediante las propiedades que proporciona NTFS y las herramientas de indexado de Microsoft Index Server. La geometría se almacena mediante geocodificación utilizando masas de agua y demarcaciones.

Tecnologías utilizadas

Las tecnologías utilizadas son:

- *Almacenamiento.* SQL-Server 2008 con campos geométricos, SQL-Server2000, Sistema de ficheros NTFS.
- *Desarrollo:* Se ha desarrollado un modelo en capas utilizando Visual Basic .NET 2010 Microsoft Visual Studio 2010 Versión 10.0.30319.1 con Microsoft.NET Framework Versión 4.0.30319. Para el acceso a datos se ha utilizado servicios WEB. Para el desarrollo del cliente se ha utilizado herramientas AJAX y Silverlight. El cliente espacial se ha desarrollado mediante las herramientas ARC-GIS para Silverlight y ARCGIS Server.
- *WEB.* El servidor WEB utilizado es IIS en Windows Server 2003

RESULTADOS OBTENIDOS

Se ha desarrollado el Sistema INTERHIDRO, un Sistema de Intercambio de Información Hidrogeológica on line, para la catalogación y almacenamiento estructurado, gestión, consulta y descarga de información hidrogeológica que se ha desarrollado. INTERHIDRO representa el primer Sistema de Intercambio de Información MARM-IGME, a través de la Web.

La URL de acceso al Sistema de Intercambio de Infor-

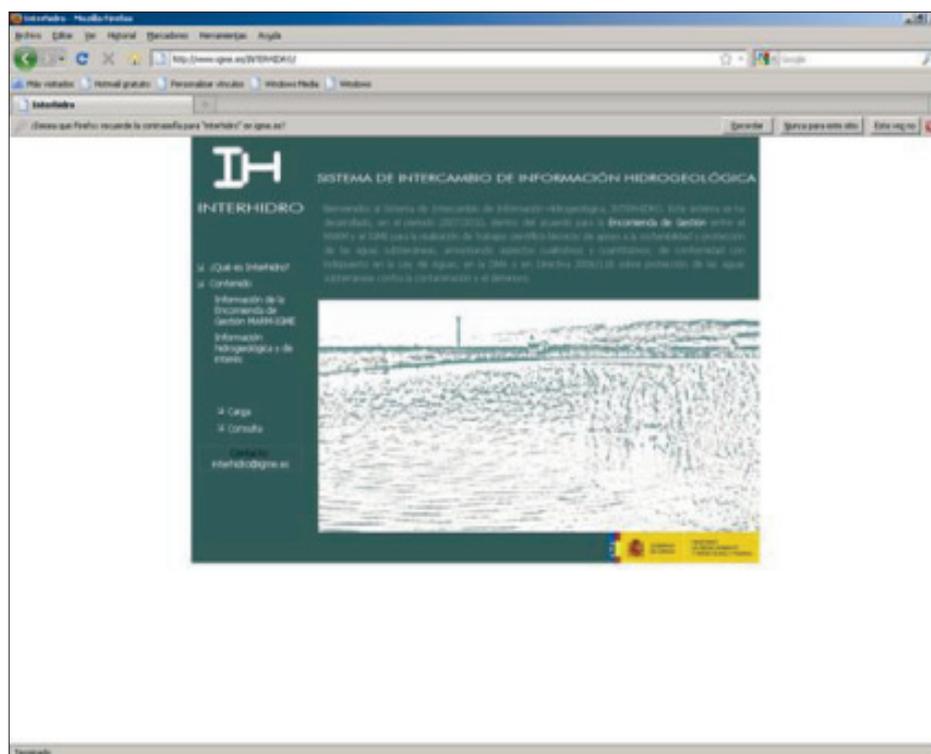


Figura 5. Página principal de INTERHIDRO.

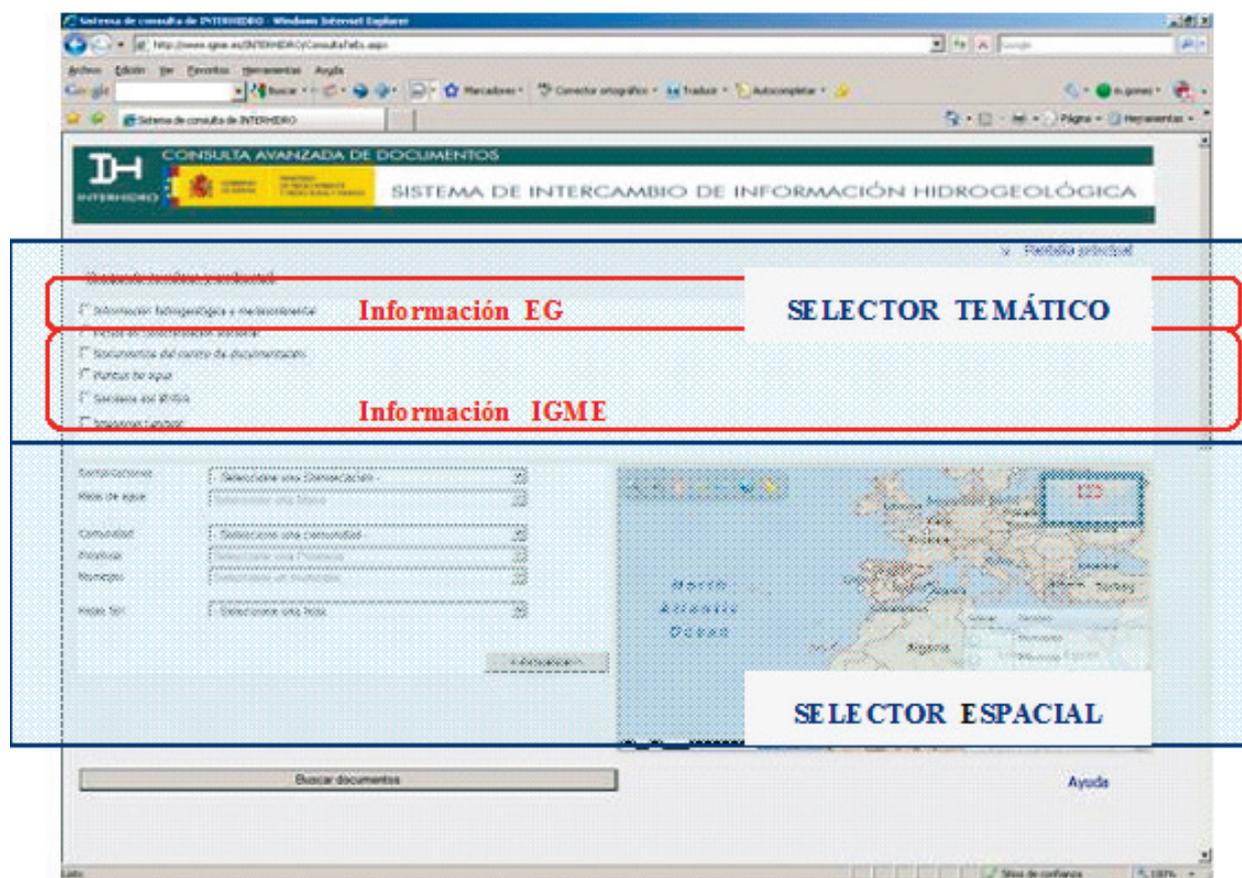


Figura 6. Módulo de INTERHIDRO de consulta y descarga de información hidrogeológica y ambiental de la EG y del IGME.

mación Hidrogeológica INTERHIDRO es: <http://www.igme.es/interhidro/>. El acceso a esta aplicación Web está limitado y restringido a los usuarios del MARM y a las Confederaciones Hidrográficas.

A través de INTERHIDRO, el IGME comparte y pone a disposición de la Dirección General del Agua (MARM) tanto la información hidrogeológica elaborada en la Encomienda de Gestión, como la información sobre aguas subterráneas generada por el IGME, de la que este organismo es depositario y que puede ser de interés para el MARM.

Como Sistema de Información los dos aspectos fundamentales sobre los que se construye INTERHIDRO son:

- Información hidrogeológica y medioambiental digital atendiendo a 4 tipologías diferenciadas: cartográfica, documental, bases de datos y raster.
- Conjunto de herramientas y funcionalidades que permiten la organización y explotación de la información.

Además, desde la página inicial de INTERHIDRO, se proporciona información general acerca de esta aplicación, en el contexto general de la Encomienda, explicando tanto sus objetivos principales, funcionalidades, como la información que se incluye en el sistema: información generada en las actividades de la EG e información hidrogeológica del IGME.

Asimismo, desde esta página, se accede a los dos módulos que se han desarrollado en INTERHIDRO:

Módulo de carga y catalogación. Diseñado para documentar e incorporar la información de la EG a INTERHIDRO, directamente, a través de Internet, desde los ordenadores personales de los técnicos o responsables de las Actividades.

Módulo de consulta y descarga. Presenta la posibilidad de realizar consultas temáticas y/o consultas espaciales sobre toda la información integrada en INTERHIDRO (EG e hidrogeológica IGME) mediante un Selector/Visor espacial y temático, atendiendo tanto a los ámbitos espaciales hidrogeológicos (Demarcaciones, masas de agua

subterránea) o administrativos (Comunidad, provincia,...) como al tipo de información que se solicita (Encomienda de Gestión MARM-GME-, Información documental, Información hidrogeológica puntual, ortofotos)

En cada módulo se incluye una 'ayuda' específica que amplía la explicación sobre la utilización de estas aplicaciones.

Por último, además se incluye una dirección de correo electrónico para cualquier consulta o duda que se pueda presentar durante la utilización de INTERHIDRO.

Actualmente el interés principal de los potenciales usuarios de INTERHIDRO se centra en el *módulo de consulta y descarga* pues el *módulo de carga y catalogación* fue diseñado y realizado para las fases iniciales de la Encomienda de Gestión.

Dentro del módulo de consulta y descarga se tienen las siguientes posibilidades de búsqueda:

- **Selección temática** de la información hidrogeológica y medioambiental está organizada como perteneciente a la Encomienda de Gestión o al IGME, y de acuerdo con el tipo de información a consultar.
- **Selección espacial** de la información, puede combinarse o no con la selección temática. Se considera a la masa de agua subterránea como la unidad principal de referencia (y por defecto también la demarcación) para las distintas tipologías de información, siguiendo el marco de aplicación de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (DMA) donde se encuadra la EG. Así mismo, se puede seleccionar la información por unidades administrativas (comunidad autónoma y/o provincia y/o municipio) o por hojas 1:50.000 (numeración IGN).

CONSIDERACIONES FINALES

Sistema INTERHIDRO

- Dentro de esta actividad se ha desarrollado la aplicación Web INTERHIDRO que representa el primer Sistema de Intercambio de Información Hidrogeológica entre el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino y el Instituto Geológico y Minero de España, a través de Internet.
- A través de una única aplicación Web, se tiene acceso simultáneamente tanto a la información hidrogeológica del IGME como a la generada en la Encomienda de Gestión MARM-IGME (2007-2010)

- El Sistema INTERHIDRO, permite establecer diferentes criterios de *búsqueda* tanto *temática* como *espacial*, por lo que presenta dos componentes principales:
 - Selección de información hidrogeológica y temática
 - Selección espacial
- INTERHIDRO permite realizar consultas búsqueda en paralelo sobre todas las informaciones hidrogeológicas y temáticas al mismo tiempo.
- La selección espacial se realiza en INTERHIDRO, cada vez, *sobre una* de las clases de ámbitos espaciales previstos: hidrogeológicos, administrativos o división de hojas 1:50.000.
- Es indiferente el orden de selección de los criterios espaciales y temáticos cuando se está elaborando la consulta que se va a ejecutar.
- Es posible consultar la información temática sin atender a la selección espacial, cuando la información que se busca no está ligada a un entorno geográfico concreto.
- Un aspecto relevante en la elaboración del proyecto, ha sido el establecimiento de una *metodología y sistemática de trabajo* que por una parte, permitiera que los trabajos desarrollados en la Encomienda tuvieran una entidad a su finalización, constituyendo un conjunto integrado y cohesionado. Y que por otra facilitará su integración en la aplicación de búsqueda, consulta y descarga.

Otros trabajos desarrollados

El IGME, desde mediados de 2007 y previamente a la aprobación definitiva de la EG comenzó la colaboración con la Subdirección General de Planificación y Uso Sostenible del Agua, DGA (MARM), que finalizaba el desarrollo del Sistema Integral del Agua, S.I.A, constituido por el Visor Cartográfico y el Libro Digital del Agua, (que fue presentado finalmente en diciembre de 2007), cuyas URL son:

http://www.mma.es/portal/secciones/aguas_continent_zonas_asoc/sia/

http://www.mma.es/portal/secciones/acm/aguas_continent_zonas_asoc/sia/infovisor.htm

http://www.mma.es/portal/secciones/acm/aguas_continent_zonas_asoc/sia/infolibrodigital.htm

La colaboración del IGME fundamentalmente se enmarcó en los siguientes aspectos:

- Facilitar al MARM la información cartográfica digital del mapa litoestratigráfico y de permeabilidades 1:200.000, como cartografía digital, servicios WMS y Kmz (Google Earth). http://mapas.igme.es/gis/servicios/Cartografia_Tematica/IGME_Permeabilidad_200/MapServer/WMSServer?service=wms&request=getcapabilities&version=1.1.

http://mapas.igme.es/gis/rest/services/Cartografia_Tematica/IGME_Permeabilidad_200/MapServer/kml/mapimage.kmz.

- Revisar de los contenidos hidrogeológicos del visor cartográfico y geológico de En la figuras 7, 8 y 9 se incluyen unos ejemplos de la colaboración del IGME.
- Colaborar en la definición del modelo de datos para el intercambio de información de los planes hidrológicos de las demarcaciones y, específicamente,

en los módulos siguientes, relacionados con las aguas subterráneas

- Masas de Agua Subterránea*
- Metodologías de Aguas Subterráneas*
- Estaciones de Aguas Subterráneas*
- Presiones Aguas Subterráneas*
- Caracterización Adicional de las Masas de Agua Subterránea*

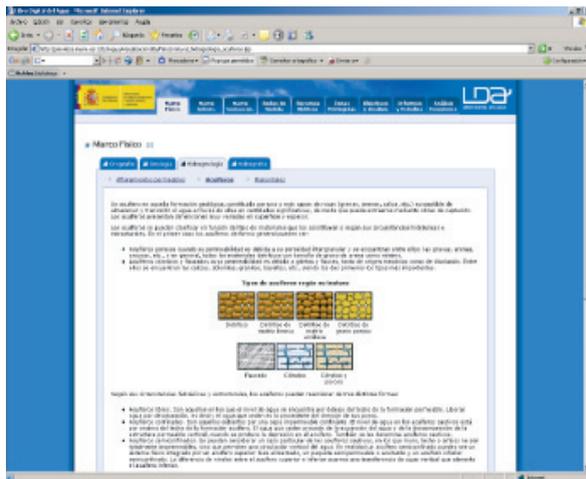


Figura 7. Aportación del IGME al Libro Digital del Agua (SIA) del MMARM

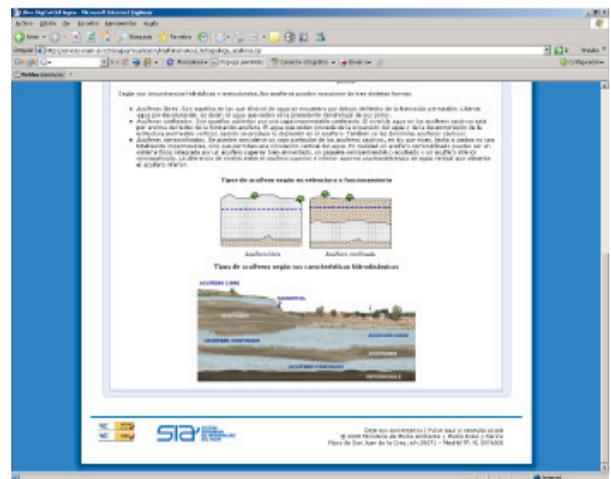


Figura 8. Aportación del IGME al Libro Digital del Agua (SIA) del MMARM

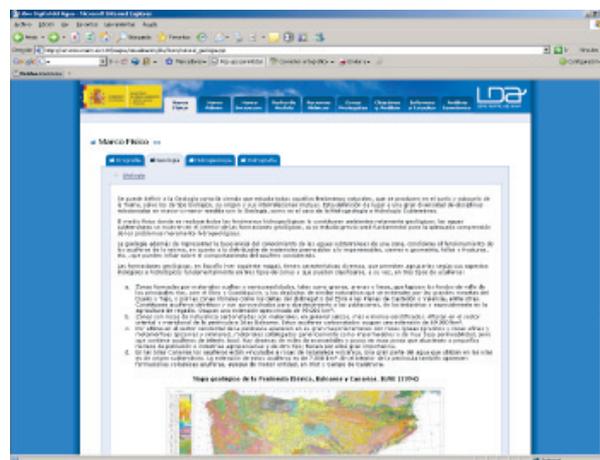


Figura 9. Aportación del IGME al Libro Digital del Agua (SIA) del MMARM

ESTUDIOS ESPECÍFICOS DE APOYO A LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA



Relación de estudios realizados

Actualización hidrogeológica de la MASb 011.006 Xinzo de Limia

Evaluación de los recursos de agua subterránea disponibles en las Masb de la Demarcación Hidrográfica del Tajo: 030.008 La Alcarria, 030.015 Talavera, 030.018 Ocaña y 030.022 Tiétar

Estimación de los recursos disponibles para cada masa de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana, basada en el análisis de los informes y referencias bibliográficas precedentes y en los datos de infraestructura hidrogeológica y conocimiento experto del IGME

Propuesta de zonificación, basada en criterios geológicos e hidrogeológicos, de la cuenca alta del río Guadiana

Estudio hidrometeorológico y análisis del efecto del periodo húmedo 2009/10 en los acuíferos de la cuenca alta del río Guadiana

Estudio de la evolución futura del sistema hidrológico de la cuenca alta del Guadiana a partir de diferentes escenarios meteorológicos y de explotación

Propuesta de declaración de sobreexplotación de un conjunto de masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

Estudio de definición de la transferencia subterránea de la MASb Boquerón con otras masas definidas en la demarcación hidrográfica del Júcar.

Caracterización básica de las masas de agua subterránea de la confederación hidrográfica del Júcar

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA MASb 011.006 XINZO DE LIMIA

Mónica Meléndez Asensio
José Ángel Díaz Muñoz



En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Actualización hidrogeológica de la MASb 011.006 Xinzo de Limia (Ourense)*, llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

Mónica Leonor Meléndez Asensio
José Ángel Díaz Muñoz
Ana Sevillano Matilla (Tratamiento GIS)

Colaboración:

Empresa CRN para realización de trabajos auxiliares

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA MASb 011.006 XINZO DE LIMIA

INTRODUCCIÓN

La zona estudiada se sitúa en el noroeste de la Península Ibérica; en la provincia de Orense y más exactamente en la región geográfica de Limia, dentro del marco de la Demarcación Hidrográfica Miño-Sil. Fisiográficamente, se trata de una cuenca hidrográfica, de unos 700 km², delimitada por las elevaciones montañosas de San Maqueda, Queixa y Larouco, Pena, entre otras. Éstas presentan una disposición perimetral, cuyas altitudes varían entre los 800 y 1300 m s.n.m. encontrándose en su interior una zona de relieve suave y subhorizontal con cotas comprendidas entre los 610 y 640 m s.n.m (figura 1).

La llanura limiana (cuenca terciaria de Xinzo de Limia), que se corresponde con la masa de agua subterránea (MASb) 011.006 Xinzo de Limia, presenta una superficie de 253 km² constituyendo una cubeta definida sobre un eje N-S de 18 km de longitud y otro de disposición NE-SO de 28 km. En su interior se pueden diferenciar las depresiones denominadas de Antela de Abavides que, separadas por un promontorio granítico, confluyen en la localidad de Xinzo de Limia.

En el sector noreste de la cuenca, en parte de los terrenos que hoy ocupan los cultivos de Limia, así como otras actividades, estuvo ubicada la *Laguna de Antela* (figura 2); Se tiene constancia de que en aguas altas todo el terreno permanecía inundado, mientras que



Figura 1. Situación de la zona de estudio.

en épocas secas se podían ver varias lagunas, charcos y juncares (Fontán, 1845; Dantín, 1942). Aunque las obras que dieron lugar a su desecación comenzaron en 1958 y quedaron prácticamente terminadas en 1963, fue una labor planeada a principios del siglo XIX. La primera vez que se abordó esta tarea fue en 1827, pero tuvo que ser abandonada poco tiempo después de su comienzo; en 1868 hubo un segundo proyecto por iniciativa privada, pero fracasó debido a problemas sociales y políticos, siendo en el año 1949, el último intento fallido. Unos años después, en 1956, el Instituto Nacional de Colonización (INC) decidió acometer la desecación, mediante la aprobación de una Ley en la que las obras de saneamiento y colonización de la

laguna se declaraban de alto interés nacional. La solución adoptada consistió en la realización de un dren en el margen derecho de la laguna, con dos bifurcaciones en cabecera, el encauzamiento del emisario y la modificación del río Limia desde su confluencia con el emisario hasta Puente Linares. Después de su estudio se adoptó establecer una pendiente uniforme de 0,0002 para el sistema de drenaje. El caudal específico de desagüe de la laguna obtenido fue de $0,150 \text{ m}^3/\text{s}$, con lo que se determinaron caudales de 15, 25, 30 y $60 \text{ m}^3/\text{s}$ para los dos tramos de canal-dren, emisario y encauzamiento del Limia, respectivamente. Quedando prácticamente terminadas las obras a principios de los años 60 del siglo XX.



Figura 2. Mapa de la ubicación de la Laguna de Antela, Fontán (1845) y aspecto de la Laguna de Antela vista desde Morgade. Fotografía del INC. (http://www.antela.org/Laguna_de_Antela.html)

La presencia de lignitos en la depresión terciaria fue objeto de sucesivas investigaciones que generaron gran cantidad de información geológica e hidrogeológica de alta calidad e importancia. Destaca la ejecución de numerosos sondeos, la realización de campañas geofísicas así como la elaboración de modelos conceptuales sobre la estructura geológica y funcionamiento hidrogeológico. La recopilación, análisis e interpretación de dicha documentación ha sido fundamental para la realización de este trabajo.

Uno de los últimos trabajos realizados en el marco hidrogeológico tuvo como objetivo inicial conocer la respuesta de acuíferos frente a las propuestas de transformación en regadío. Los estudios realizados consistieron en el análisis de los descensos piezométricos producidos en las épocas de extracción, así como la capacidad de recuperación del acuífero y el grado de afección de estas extracciones a los cauces superficiales; para ello se realizaron tres modelos de simulación matemática para cada una de las subcuencas (Depresión de Antela, Depresión de Abavides y Parte Baja). Este estudio fue solicitado por la Xunta de Galicia (2002), a través de la Consejería del Medio Rural.

OBJETIVOS

Este estudio se ha realizado como labor de apoyo en la elaboración del Plan Hidrológico de Cuenca de la Demarcación Hidrográfica del Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, a solicitud del Organismo de Cuenta. El objetivo principal consiste en la elaboración de un modelo conceptual de funcionamiento de la masa de agua subterránea 011.006 Xinzo de Limia atendiendo a los aspectos y tareas que se describen a continuación:

- Revisión, análisis e interpretación de la documentación hidrogeológica existente así como la adquisición de nuevos datos " in situ", que complementen la documentación para la definición del modelo hidrogeológico
- Delimitación correcta de los límites de la masa de agua Xinzo de Limia, a fin de evaluar los recursos hídricos disponibles, establecer la correcta protección y estar en disposición de realizar una gestión hídrica adecuada.
- Alcanzar el mayor grado de conocimientos posible respecto a la caracterización de la masa de agua definiendo su funcionamiento hidrogeológico, en lo que se refiere a recarga, descarga y relación aguas superficiales-subterráneas.

METODOLOGÍA

En primer lugar se procedió a la recopilación y análisis de la información existente y en especial aquella que derivada de estudios recientes. Con posterioridad, en mayo de 2010, se realizó un reconocimiento del terreno y toma de datos en algunos de los puntos incluidos en la red de nitratos de la Confederación Hidrográfica; en ellos se midieron Presión (mBar), Temperatura (C), Profundidad al agua (m), Conductividad real ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Conductividad específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Salinidad (PSU), Total de sólidos disueltos (ppm), Resistividad (ohm-cm) y densidad del agua (g/cm^3).

En esa misma campaña de campo se realizaron perfiles de conductividad/temperatura en diez sondeos previamente seleccionados (figura 3). Para su ejecución se utilizó una sonda modelo Aqua TROLL 200 que registra la conductividad, la temperatura el nivel de agua y la presión. En el momento de su ejecución, mediante un ordenador portátil, se realizó la programación previa de los parámetros que se deseaba medir así como del intervalo de registro de medidas y de otros datos necesarios para la correcta realización de las medidas. El intervalo de medida fue de 1 minuto, realizándose una medida cada 10 m

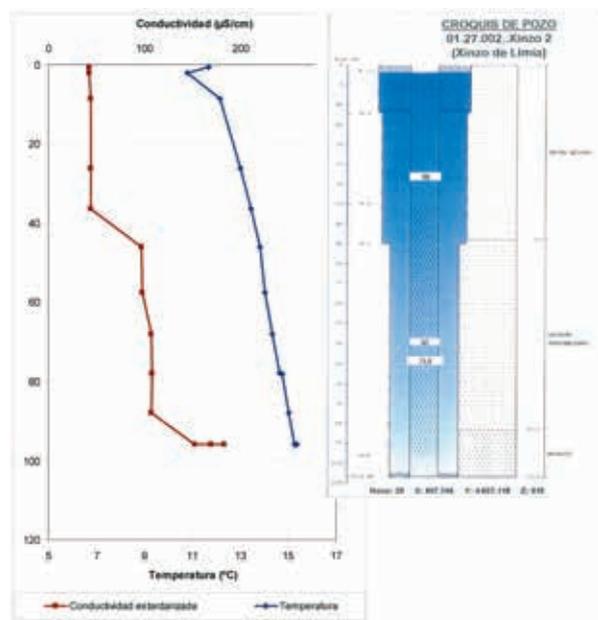


Figura 3. Perfil Xinzo-2 (Red oficial de control piezométrico)

El objetivo perseguido consistió en determinar la posible afección al agua subterránea de los diferentes acuíferos en relación con los retornos de riego, la observación de las variaciones de determinados parámetros considerados indicativos de la calidad del acuífero superior en fun-

ción de la profundidad, así como discernir la existencia de flujos subterráneos ascendentes, aguas de diferentes calidades o manifestaciones termales en la base de la cuenca.

Otro de los aspectos contemplados ha sido la identificación, caracterización y cuantificación de los volúmenes hídricos relacionados con las variables climáticas. Para ello se elaboró el estudio hidroclimático con los datos de precipitación total mensual y temperatura media mensual de las series históricas facilitadas por la Agencia Estatal de Meteorología (intervalo de enero de 1970 hasta diciembre del 2008; lo que supone un total de 39 años de registros).

Se llevaron a cabo diferentes actividades dentro de este apartado. Una vez seleccionadas las estaciones pluviométricas y termométricas, se procedió a la restitución y completado de las series de datos pluviométricos y termométricos, para lo que se utilizó el paquete HIDROBAS.

El análisis de la pluviometría se llevó a cabo mediante la elaboración de las isoyetas para los años tipo medio, seco y húmedo, utilizando la topografía como referencia para su trazado, ya que existe una buena correlación entre altitud y pluviometría. El cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) se realizó mediante el método de Thornthwaite, que proporciona el valor de la ETP mensual a partir de la temperatura media mensual y la latitud de la estación. La evapotranspiración real (ETR) y la lluvia útil o escorrentía total se estudió por tres métodos diferentes (Método del balance mensual de agua en el suelo según Thornthwaite y según los métodos empíricos de Turc y Coutagne). Con los datos obtenidos y teniendo en cuenta los años tipo anteriormente indicados se realizó la distribución de las isolíneas de lluvia útil; y a partir de estos mapas de lluvia útil, considerando la superficie que existe entre las isolíneas, se ha obtenido un valor medio de lluvia útil para los años medios en la zona de estudio.

Por lo tanto, considerando que la aportación principal y única es el agua procedente de la precipitación (lluvia útil), el cálculo de la aportación tiene en cuenta la proporcionalidad entre la superficie de la cuenca y la lluvia útil. En definitiva, esta aportación corresponde al máximo volumen de agua que entra en la zona de estudio procedente de la precipitación, y que posteriormente, podrán formar parte de las aguas superficiales o de las aguas subterráneas.

Existe un conocimiento profundo de la geología de la

zona, fruto de los estudios e investigaciones realizadas. Los materiales existentes en la cuenca corresponden a la sedimentación paulatina desde los inicios de la conformación de la cubeta, durante su progresivo hundimiento como efecto de subsidencia diferencial y hasta la colmatación existente en la actualidad.

Dentro de este apartado se pretende contribuir al conocimiento mediante la elaboración de un modelo geológico tridimensional realizado a partir de la información existente. Para ello, se procede a la integración de diversos tipos de datos, correspondientes a diferentes fuentes, en un modelo geológico tridimensional que pueda ser explotado desde un sistema de información geográfico convencional por un lado y por sistemas específicos de tratamiento de datos tridimensionales por otro. Se parte de una información geológica muy abundante y de alto detalle, consistente en columnas geológicas, mapas de isopacas e isobatas y perfiles estructurales de las principales unidades. Se dispone, además, de planos parciales de isopacas para cada uno de los muros de las tres unidades principales, plano de isobatas del basamento (o muro de la unidad inferior).

Los conocimientos geológicos han permitido definir tres grandes unidades litológicas de interés para este estudio: dos unidades detríticas, denominadas superior e inferior, y una unidad intermedia constituida por arcillas, arcillas orgánicas y lignitos. Estas tres unidades son las que figuran en la interpretación de las columnas de sondeos así como en la integración tridimensional realizada. En un principio el proceso de integración 3D se elabora mediante un proyecto en el programa ArcView y los resultados obtenidos se incorporan a un proyecto en Vulcan 3D con mayor potencial para la visualización tridimensional y la generación de perfiles y de cálculos volumétricos. El resultado final ha consistido en la generación de un bloque tridimensional donde se ha representado el MDT y el muro de las tres formaciones para cada uno de los programas anteriormente indicados, con las posibilidades de explotación, consulta y representación asociadas a cada uno de ellos.

Se ha trabajado con un total de 109 sondeos (figura 4); de los cuales se dispone de datos correspondientes al muro de la unidad superior en 60 de ellos, del muro de la intermedia en 59 y del muro de la inferior en 106. Los perfiles estructurales existentes han sido otros de los datos de carácter tridimensional que han ayudado a la definición geométrica de las distintas

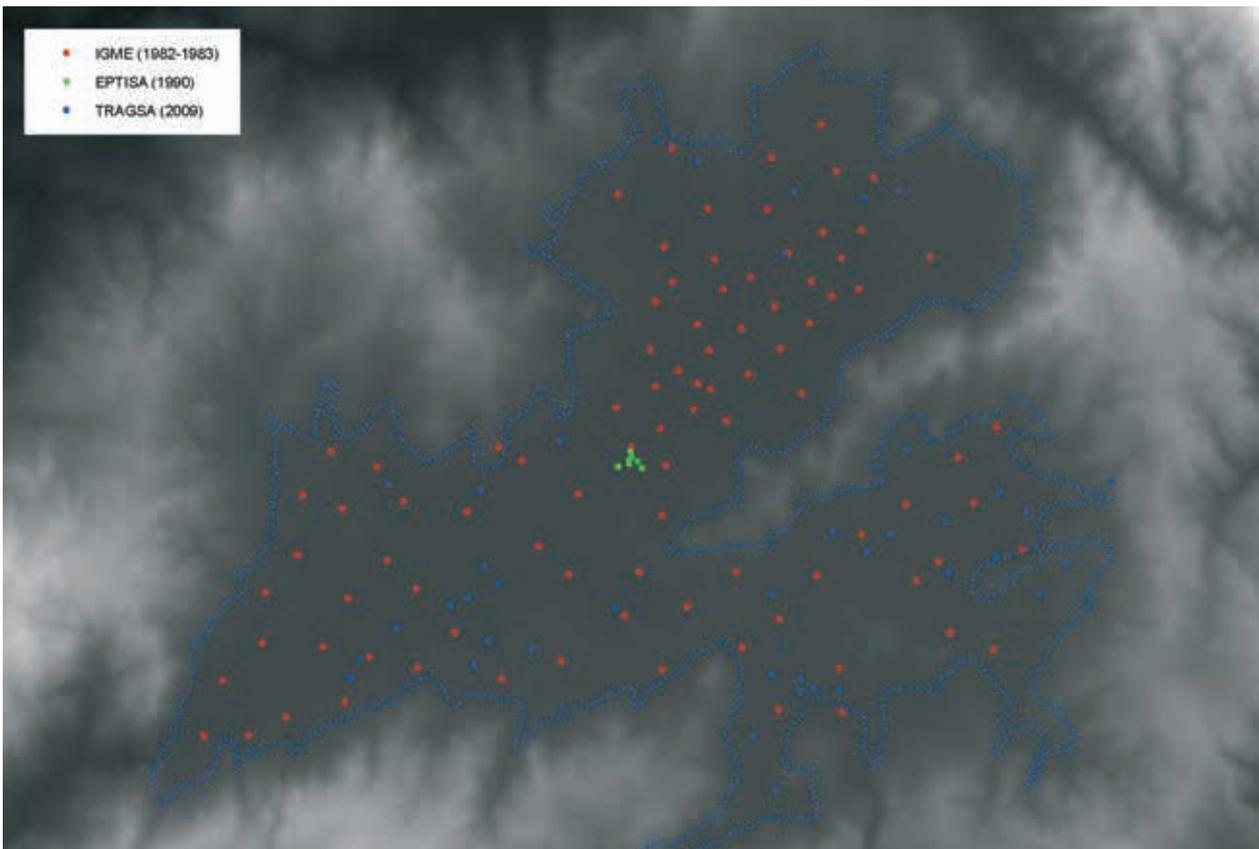


Figura 4. Sondajes sobre el MDT

unidades y ha permitido la revisión de los diferentes sondajes.

El tratamiento de toda la información obtenida se ha realizado mediante ArcView, generándose para cada uno de los muros de cada unidad un modelo digital de elevaciones con objeto de poder integrarlos en un sistema de información geográfica convencional. De esta manera se puede realizar la representación de cada uno de estos niveles, tal y como se intenta representar en la figura 5.

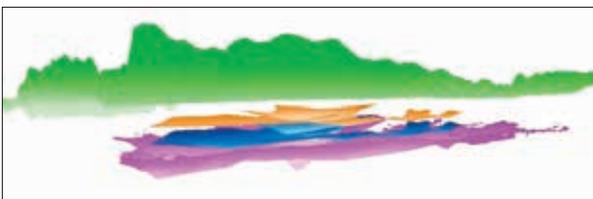


Figura 5. Representación 3D del MDT y del muro de las tres capas simuladas

La información así generada y con los formatos existentes, podrá ser de gran utilidad en un futuro para la realización de un modelo matemático que integre la totalidad de la MASb.

RESULTADOS OBTENIDOS

Marco socioeconómico y uso del territorio

El principal uso del suelo desde la desecación de la Laguna de Antela y su entorno es la agricultura. El cultivo predominante es la patata que se combina con el cultivo de cereales, mayoritariamente trigo, practicando la rotación patata/cereal/cereal. Se ha contabilizado (según el proyecto CORINE (*Coordination of Information on the Environment*) Land Cover) una superficie labrada del orden de 20.000 ha, (figura 6), de las cuales, teniendo en cuenta la rotación se puede establecer que en unas 4.000-6.000 has se cultiva patata, en 12.000-14.000 has, cereal y en unas 2.000 ha, forrajeros. Parte de los propietarios están agrupados en nueve comunidades de regantes, dos de ellas, Antela y Antioquía, han pasado por un proceso de transformación y modernización; otras cuatro, Corno do Monte, Lamas-Ganade, Alta Limia y San Salvador de Sabucedo, prevén esta modernización a corto plazo mientras que las otras tres, Trasmiras, Sarreaus, Val do Ouro, se producirá más largo plazo. La superficie total correspondiente a las comunidades de regantes es del orden 10.000 ha; el

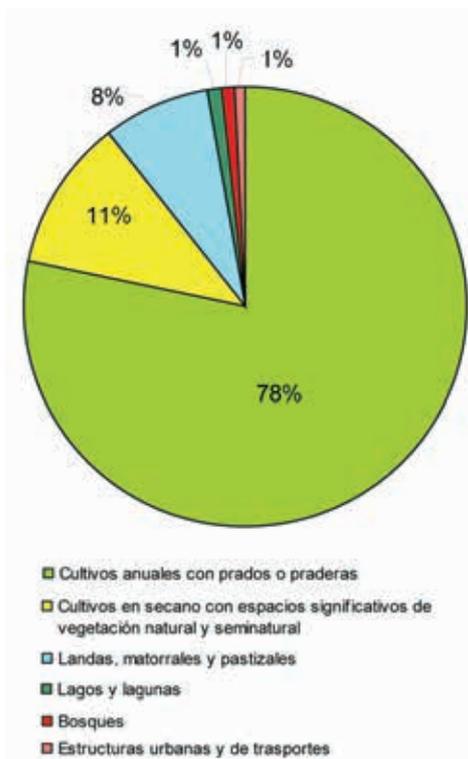


Figura 6. Usos del suelo obtenidos del proyecto CORINE

resto de la superficie labrada, con menor porcentaje de cultivo de patata, es propiedad de particulares que mantienen el sistema tradicional. El riego del tubérculo se realiza como máximo durante 45 días al año distribuidos entre el 15 de junio y el 15 de agosto. El consumo de agua puede alcanzar un máximo de 200 L/m² (2 000 m³/ha), en función del régimen pluviométrico estival y del cultivo considerado, en ocasiones, el riego de superficies cultivadas con maíz puede alcanzar mayores valores (288 L/m²)

La modernización de los regadíos supone, entre otros aspectos, el cambio en el sistema de riego; mientras que el riego tradicional se realiza tomando agua directamente de los cursos superficiales o a través pozos de gran diámetro y poca profundidad, entre 3 y 5 m (figura 7), los nuevos sistemas captan agua mediante sondeos de profundidades entre 50 y 80 m situados a cierta distancia de los cauces, para evitar su afección (figura 8).

El escenario actual es que en la comunidad de regantes de Antioquía el riego se realiza mediante sondeos; la comunidad de regantes de Antela, también modernizada, obtiene agua del Canal Dren Principal mediante una estación de bombeo y una red de riego. El resto de la superficie cultivada se riega mediante concesio-



Figura 7. Pozo de gran diámetro para captación-depósito de agua



Figura 8. Sondeo en una comunidad de regantes modernizada

nes en ríos y pozos privados, cuyo alcance es imposible de determinar. A corto plazo (3-4 años) se espera que estén en funcionamiento cuatro comunidades más (Corno do Monte, Lamas-Ganade, Alta Limia y San Salvador de Sabucedo), en un escenario más lejano se

podrían entrar las otras tres, Trasmiras, Sarreaus y Val do Ouro.

Estudio hidroclimático

El análisis de la serie 1970-2008 ha permitido establecer un valor de temperatura media anual para la zona de 13,9 °C. Los valores medios anuales de precipitación según la tipología del año obtenidos son los siguientes: la precipitación para un tipo de año medio es de 927 mm/año, para el tipo de año seco es de 696 mm/año y para el tipo de año húmedo 1176 mm/año.

Para la valoración de la recarga se ha estudiado la distribución de la precipitación en la cuenca mediante mapas de isoyetas elaborados para años tipo (seco, medio y húmedo) (figura 9); además se ha calculado ETP, mediante el método de Thornthwaite, obteniéndose una cifra de 678 mm. El valor obtenido de la lluvia útil tras la aplicación de los distintos métodos, para los años medios en la zona de estudio es de 473 mm. Al igual que para las precipitaciones, los valores mínimos de lluvia útil se presentan en la zona noroeste, en la zona de Allariz y la zona central de la cubeta de Xinzo de Limia, y los máximos en la zona sureste, en la divisoria de cuencas situada en la zona de Valderrei. Cabe destacar la gran diferencia existente entre los valores obtenidos, dependiendo de si se consideran años medios, secos o húmedos.

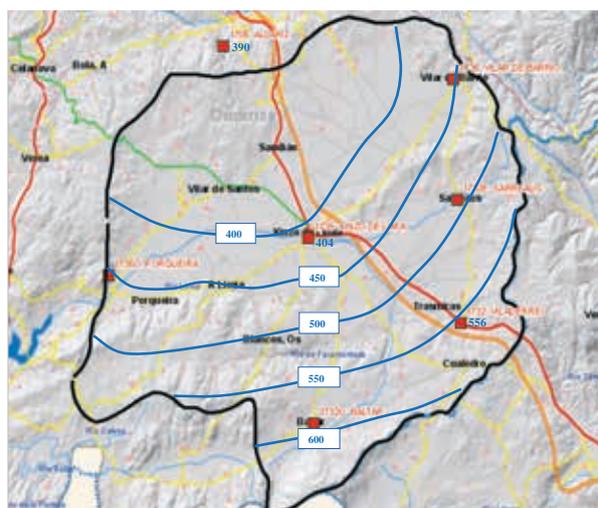
El resultado correspondiente al cálculo de la ETR según el método realizado se muestra en la tabla 1.

VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL			
Método	año medio	año seco	año húmedo
Turc	35-45 %	23-31 %	46-50 %
Coutagne	34-43 %	24-30 %	44-48 %
Balance hídrico Thornthwaite	44-53 %	31-40%	57-60%

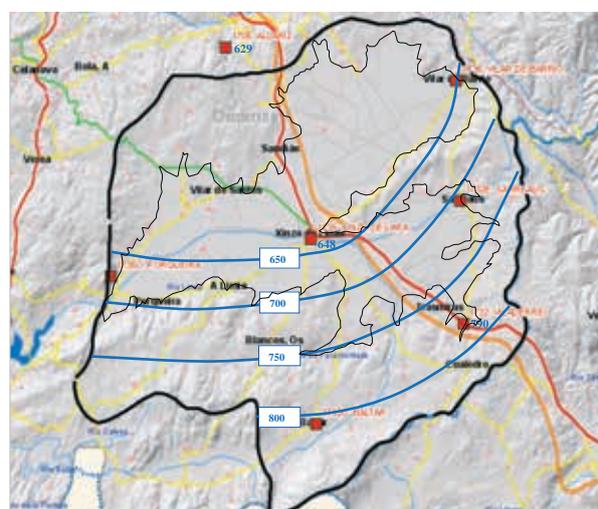
Tabla 1. Valores de evapotranspiración real

Hidrología superficial

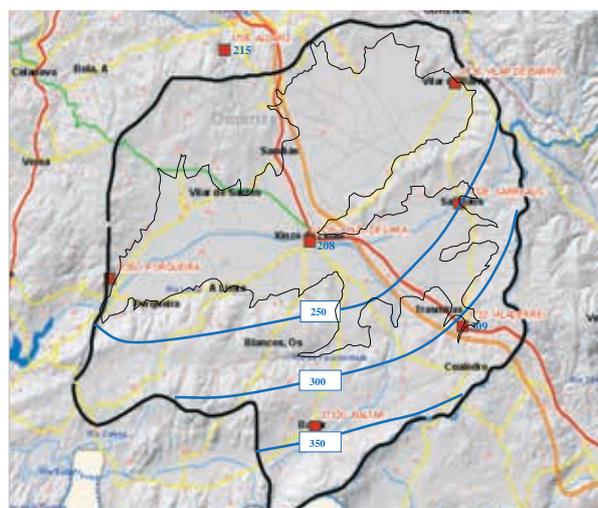
Los recursos hídricos se han calculado considerando una superficie de la cuenca hidrográfica hasta la estación de aforo de Puente Linares de 686 km²; la aportación total para años medios se ha estimado



Lluvia útil para el año medio (mm/año): Subcuenca y MASb



Lluvia útil para el año seco (mm/año) Subcuenca y MASb.



Lluvia útil para el año húmedo (mm/año) Subcuenca y MASb.

Figura 9. Distribución de Lluvia útil (mm/año) Subcuenca y MASb.

en 324,5 hm³/año. Sin embargo, si únicamente se tiene en cuenta la lluvia caída sobre la superficie de la masa, las aportaciones directas serán proporcionalmente menores, habiéndose calculado un valor de 119,7 hm³/año. De lo que se puede deducir que más del 63% de los recursos hídricos totales se generan en la zona perimetral granítica y del orden del 37% en sobre la superficie de la propia masa.

Los principales cauces superficiales son el denominado Canal Dren Principal de la Laguna de Antela, que proviene del lóbulo más septentrional de la depresión de Antela y el río Limia, que nace en el nordeste de la masa, donde se sitúan las mayores altitudes, como resultado de la confluencia de pequeños arroyos y regatos. Poco después de su nacimiento, este río recibe los aportes de los ríos Faramontaos y Nocado, que incorporan un caudal significativo; a unos 7 km después de atravesar la localidad de Xinzo de Limia confluye con el Canal Dren Principal, y se dirige en dirección suroeste, pasando por Puente Linares; en dicha localidad la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil dispone de una estación de aforo en el cauce del río Limia. (figura 10).

Marco geológico

Los materiales que conforman el entorno de la cuenca corresponden a las series Paleozoicas y Precámbricas del sinclinorio de Verín y parte del macizo granítico de Allariz. La MASb está constituida por materiales detríticos cuaternarios y miocenos y se pueden diferenciar tres tramos, el superior e inferior compuesto por materiales sedimentarios en niveles de arenas con niveles de gravas y pasadas de arcillas y limos; y un tramo intermedio que se acuña hacia los bordes, formado mayoritariamente por materiales arcillosos y lignitos. El contacto entre formaciones suele ser gradual, siendo frecuentes los cambios laterales de facies, tal como se aprecia en la correlación de los diferentes sondeos consultados.

Como síntesis de toda la información geológica existente y sondeos realizados y con el objetivo de contribuir al mayor conocimiento global de la estructura y de la disposición estratigráfica de las formaciones se ha elaborado un modelo tridimensional. Dicho modelo puede ser explotado utilizando un sistema de información geográfica convencional y además, mediante

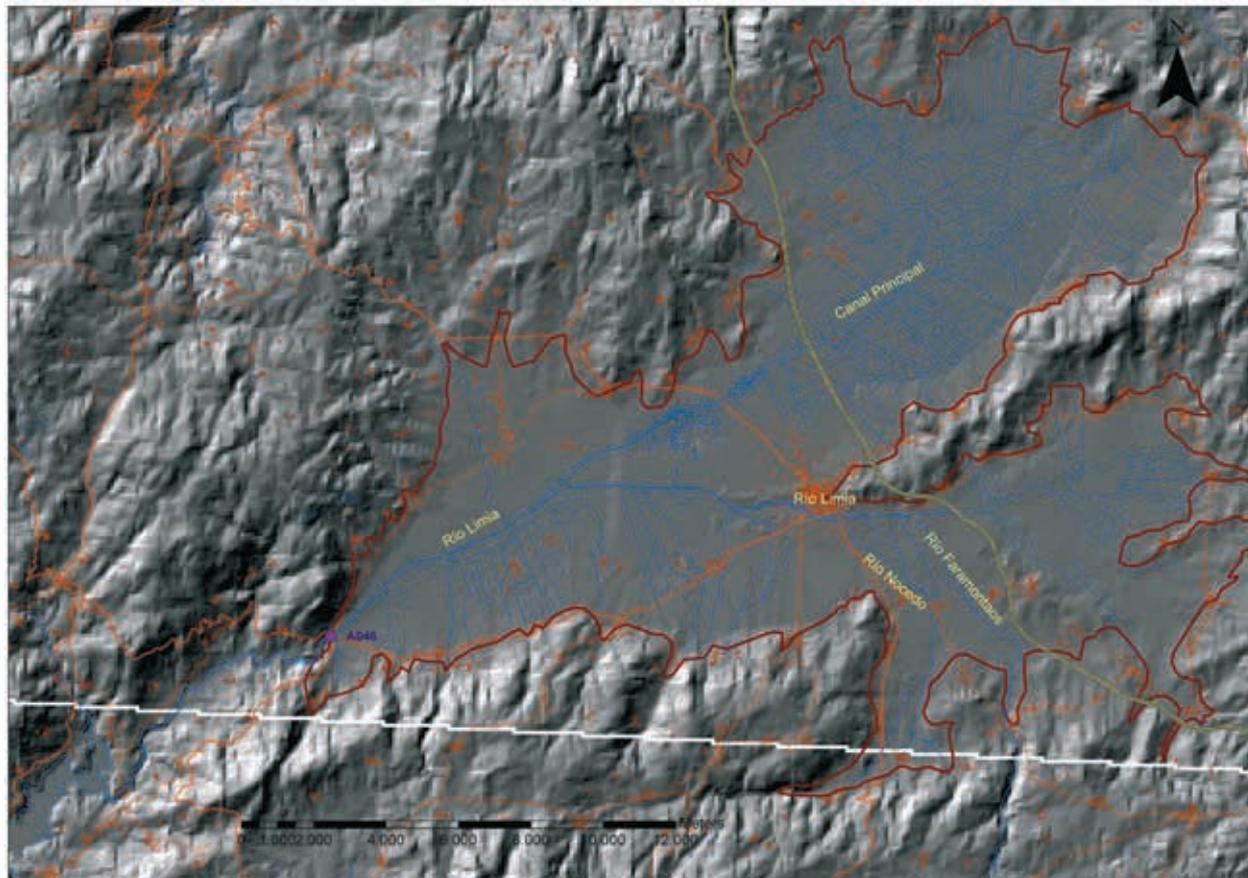


Figura 10. Situación de la estación Puente Linares. Red SAIH

sistemas específicos de tratamiento de datos tridimensionales.

Hidrogeología

La masa de agua subterránea (MASb) 011.006 Xinzo de Limia se corresponde con la antigua Unidad Hidrogeológica 01.27, dentro del ámbito territorial de la Demarcación Hidrográfica, y está delimitada en todos sus bordes por la MASb Cuenca Baja del Miño (011.002). Desde el punto de vista del sistema de explotación de los recursos hídricos la MASb se encuentra dentro del sistema denominado Limia. La extensión en superficie de esta masa coincide con el área situada a cotas más bajas; está bordeada por relieves montañosos constituidos por materiales graníticos y metamórficos. El límite subterráneo corresponde al sustrato impermeable constituido por los mismos materiales que estructuralmente conforman la cubeta. Cabe destacar que la definición actual de la MASb se ajusta a los materiales detríticos permeables. Si embargo, considerando el carácter semi endorreico de la cuenca, parte del área de recarga de la masa se localiza en el territorio pre-mioceno que

bordea la masa. Se estima que este hecho debe ser valorado en la gestión de los recursos hídricos, así como en las actuaciones encaminadas a la protección de garantizar la buena calidad del agua vertiente (figura 11).

En esta masa de agua se han definido dos acuíferos detríticos independizados, en su mayor parte, por un nivel arcilloso-lignífero. Este nivel no presenta una extensión geográfica completa al no estar representado en los bordes de la misma (figura 12), permitiendo la existencia de conexión entre ambos acuíferos, en las zonas en las que no existe dicho nivel. El acuífero superior está formado por arenas con niveles de gravas y pasadas de arcillas y limos. Presenta un espesor medio de 60-80 m alcanzando valores de 100-120 m, en el sector meridional de la antigua Laguna de Antela. Se trata de un acuífero libre cuyo nivel freático, muy próximo a la superficie del terreno, aflora en ocasiones, generando lagunas y zonas encharcadas. El inferior, litológicamente similar y con una potencia máxima de 120 m, presenta un régimen de semiconfinamiento, condicionado por el nivel intermedio que actúa como acuitardo. Una manifestación del semiconfinamiento del acuífero y de la

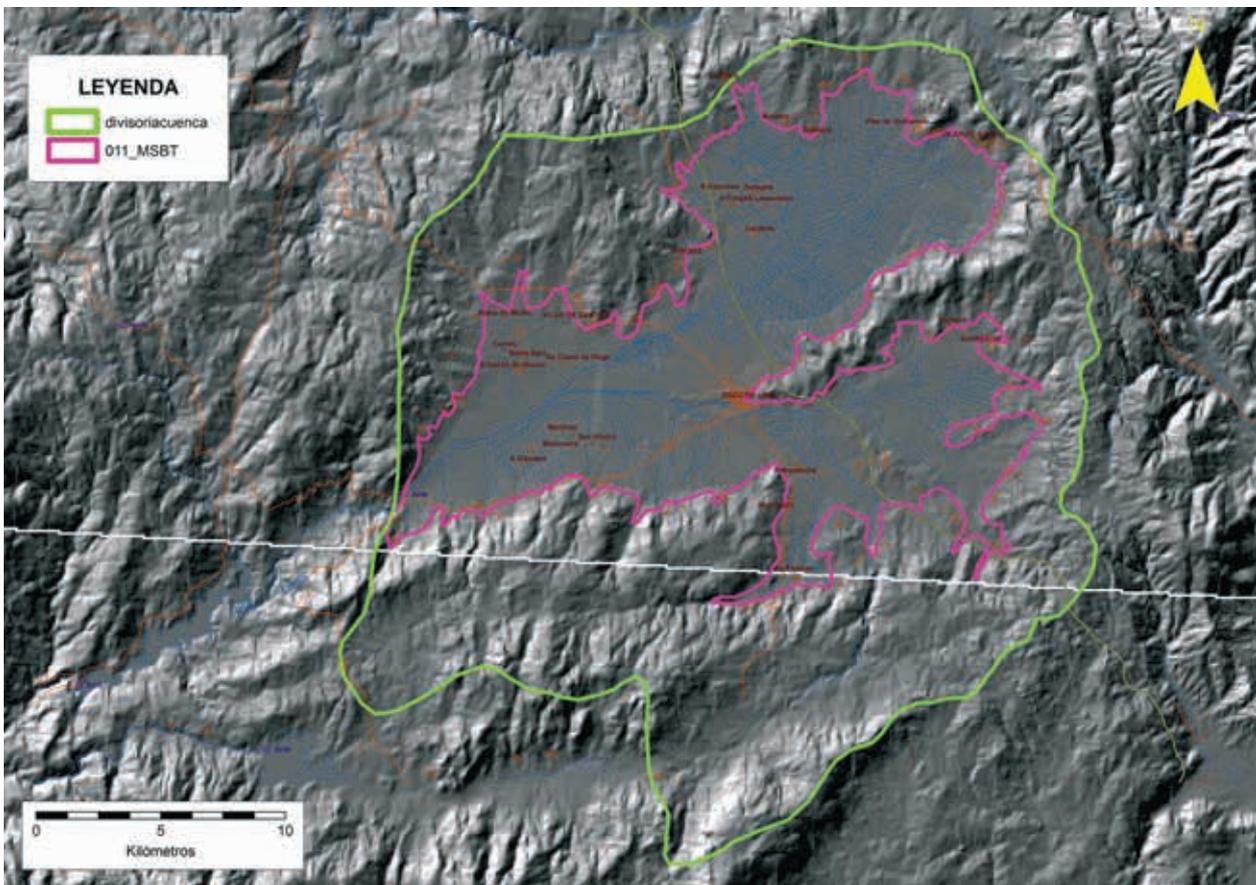


Figura 11. Delimitación de la MASb y área de recarga

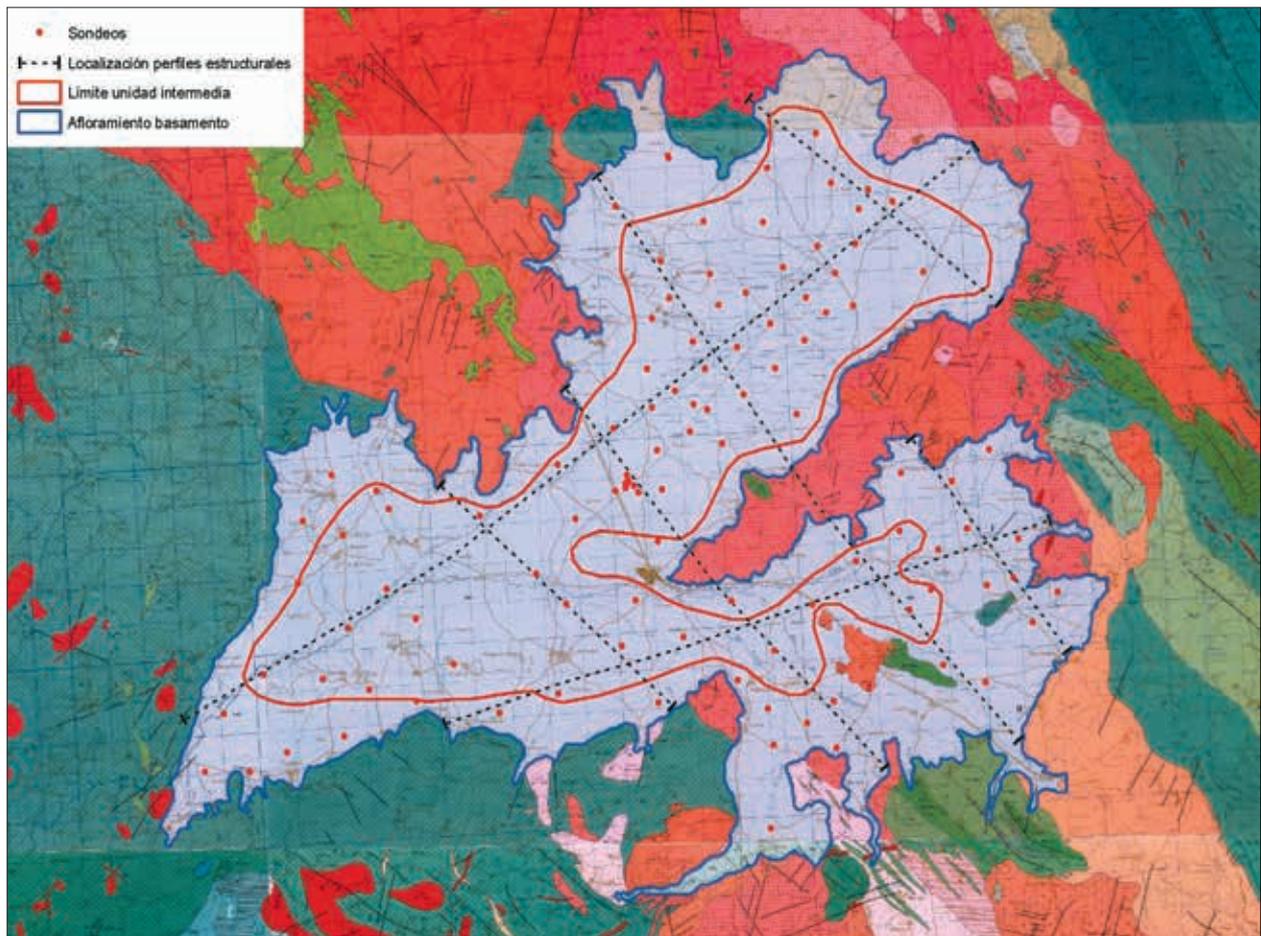


Figura 12. Límite de unidad intermedia

situación en carga de los niveles piezométricos es la existencia de dos sondeos surgentes en el centro de la depresión de Antela. La conexión hídrica está supeditada a la existencia o ausencia de la capa lignitífera intermedia de forma que en las zonas de borde donde los dos acuíferos están en contacto existe un flujo descendente que recarga el acuífero inferior, mientras que hacia el centro de la cuenca existe un flujo ascendente del acuífero inferior hacia el superior a través del acuitardo que lo separa, (figura 13).

Cálculo de reservas hídricas subterráneas

Teniendo en cuenta el volumen calculado a partir del modelo 3D y una porosidad media del 4,6%, se ha realizado una estimación del volumen de reservas hídricas en la Unidad Superior obteniéndose un valor de 380 hm³. Y mediante la realización de perfiles topográficos y la discretización de dicha unidad de acuífero en franjas de 20 en 20 m, se ha procedido al cálculo de volúmenes de agua en las tres formaciones geológicas (tabla 2).

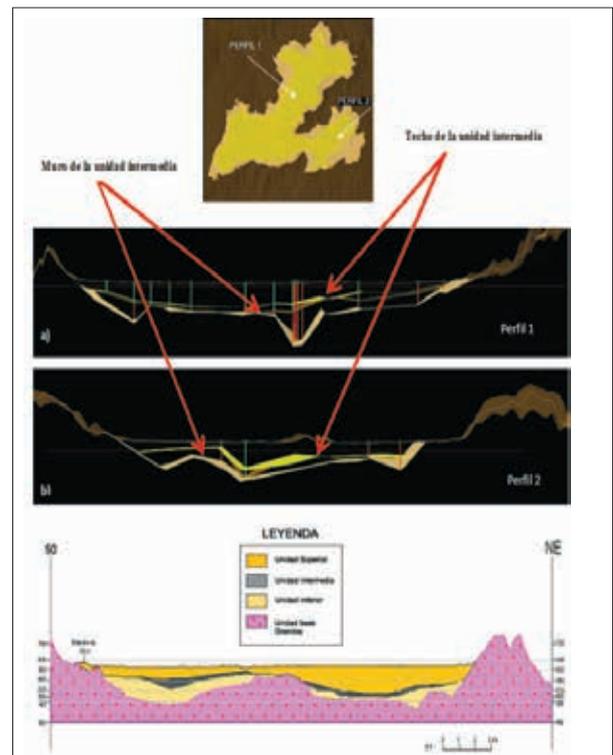


Figura 13. a) Perfiles estructurales b/ perfil topográfico con orientación SO-NE, disposición de las unidades y zócalo granítico

	Rango de cotas m s.n.m.	Volúmenes de la unidad superior		Reservas de agua	
		hm ³	hm ³ acumulados	hm ³ por rangos de cota	hm ³ acumulados por rangos de cota
Cota base Unidad Superior: 496 m	496-500	4,12	4,12	0,19	0,19
	500-520	173,54	177,66	7,95	8,14
	520-540	509,57	687,23	23,34	31,48
	540-560	861,09	1548,32	39,44	70,91
	560-580	1.606,79	3.155,11	73,59	144,50
Cota río Limia: 601 m	580-600	2.480,25	5.635,35	113,60	258,10
	600-620	2.516,10	8.151,46	115,24	373,34
	620-640	156,23	8.307,69	7,16	380,49
Cota más alta: 660 m	640-660	6,93	8.314,62	0,32	380,81
	TOTAL	8.315,00		380,81	

Tabla 2. Volúmenes correspondientes a las tres litologías consideradas.



Figura 14. Afloramiento del nivel freático en una explotación de áridos

Relación entre aguas superficiales y aguas subterráneas. Sistemas lagunares asociados al acuífero

Como ya se mencionó anteriormente, es importante recordar que en la zona norte, existió históricamente una laguna denominada Laguna de Antela. Dicho humedal, de carácter permanente, presentaba cierta estacionalidad de forma que en aguas altas todo el terreno permanecía inundado, mientras que en época de aguas bajas la superficie cubierta por el agua quedaba reducida, dando un aspecto de lagunas desagregadas. Las oscilaciones intra e interanuales estaban relacionadas con las condiciones climáticas y, por ende, con las fluctuaciones del nivel freático regional.

En la actualidad únicamente se localizan lagunas o zonas encharcadas en un pequeño sector situado al noroeste de Xinzo de Limia. Por otra parte, se han generado nuevos encharcamientos como consecuen-

cia de la extracción de áridos mediante el proceso de dragado, en las proximidades de Rairiz de Veiga. El origen de estas zonas húmedas se establece en la proximidad del nivel freático a la superficie, de forma que cualquier nueva vaguada creada, por causas naturales o por la acción antrópica puede dejar al descubierto el nivel freático (figura 14). La situación del nivel piezométrico es determinante en las variaciones que se producen en la relación "aguas superficiales-aguas subterráneas", ya que pequeñas oscilaciones en la piezometría generan cambios en el sentido de dicha relación.

Hidroquímica

Entre los aspectos más destacables del quimismo de las aguas subterráneas cabe indicar que la unidad inferior presenta una mineralización mayor que la correspondiente a la unidad superior, estableciéndose una conexión entre ambas a través del acuitardo, y por lo tanto, una

mezcla de aguas (figura 15). Los estudios realizados hasta la fecha han permitido establecer que la circulación de agua, probablemente, tenga lugar en sentido ascendente, es decir, el acuífero superior recibe aportes de la unidad inferior; si bien, esta afirmación debería ser corroborada mediante las investigaciones pertinentes.

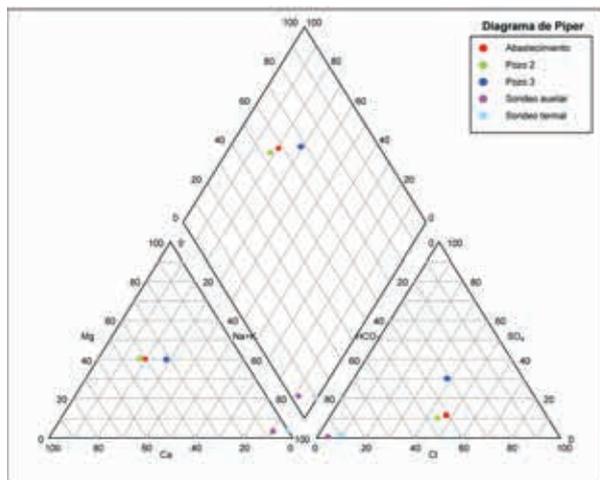


Figura 15. Diagrama de Piper.

Balance hídrico

Para la realización de un balance hídrico en el área de estudio se han establecido como entradas de agua al sistema (masa de agua subterránea), la precipitación y los retornos de regadío y como salidas, las extracciones para usos agrícola, humano e industrial, el drenaje del acuífero por los ríos, la evapotranspiración de áreas cultivadas con o sin riego y la evaporación.

La recarga de ambos acuíferos procede de la infiltración del agua de precipitación. Mientras que el acuífero superior se recarga directamente a partir la lluvia útil, el inferior lo hace únicamente en las zonas de borde donde existe conexión entre los dos acuíferos. Además de la precipitación caída sobre la superficie que ocupan los materiales detríticos se deben considerar los aportes procedentes de la escorrentía generada en las zonas más elevadas de la cuenca, debido a que, el drenaje de estas zonas se produce a través de la misma red hidrográfica. Las salidas del sistema tienen lugar a través de los cauces superficiales que, además de evacuar el agua superficial, reciben la descarga de los acuíferos presentes. La orografía de la cuenca con muy baja pendiente, condiciona ausencia de manantiales y que los afloramientos del nivel freático se produzcan en forma de charcos, lagunas o zonas húmedas. La circulación general del sistema, tanto para la escorrentía superficial como subterránea presenta

una dirección noreste-suroeste en la depresión de Antelario Limia y este-oeste en la depresión de Abavides (Figura 16). Por otra parte, se considera que no existen aportes de agua subterránea procedentes de las masas colindantes debido a la baja permeabilidad de los materiales que las forman (figura 17).

Para finalizar se adjunta una tabla-resumen en la que se desglosan los volúmenes de agua considerados para las diferentes entradas y salidas (tabla 3).

ENTRADAS	hm ³
1. Aportación al sistema	324,4
2. Aportación subterránea de MASb contiguas	-
3. Aportación cauces superficiales	-
4. Retorno Regadío	1,5-2,2
	325,9-326,6
SALIDAS	hm ³
1. Bombeos (agricultura, industria y abastecimientos)	15-22
2. Salidas subterráneas hacia MASb contiguas	0,0
3. Drenaje del acuífero por los ríos	307,2
4. Humedales	1,3
	323,7-330,5
Total (Entradas-Salidas)	2,2-3,9

Tabla 3. Resumen del balance hídrico.

Aguas termales

La presencia de aguas termales en la masa se puso de manifiesto durante la investigación minera llevada a cabo en los años 80, ha sido posteriormente estudiada (Seara, 2009). Dos de los sondeos perforados durante dicha investigación son surgentes en la actualidad y denotan cierta termalidad; en uno de ellos, denominado Sondeo Termal, el agua aflora en superficie con una temperatura de 25 °C y aunque en el otro (Sondeo Auxiliar) la temperatura en superficie es fría se ha podido comprobar que en profundidad alcanza una temperatura mayor que la de las aguas subterráneas. No se ha podido acceder a la columna litológica del Sondeo Termal, si bien debido a su profundidad de más de 200 m se estima que alcanza el acuífero inferior y el basamento paleozoico. En una de las labores de investigación se ha procedido a realizar un perfil de conductividad eléctrica del agua desde la superficie hasta la base del sondeo que ha puesto de manifiesto un brusco ascenso desde el m 180 asciende llegando a alcanzar la cifra 1500 µS/

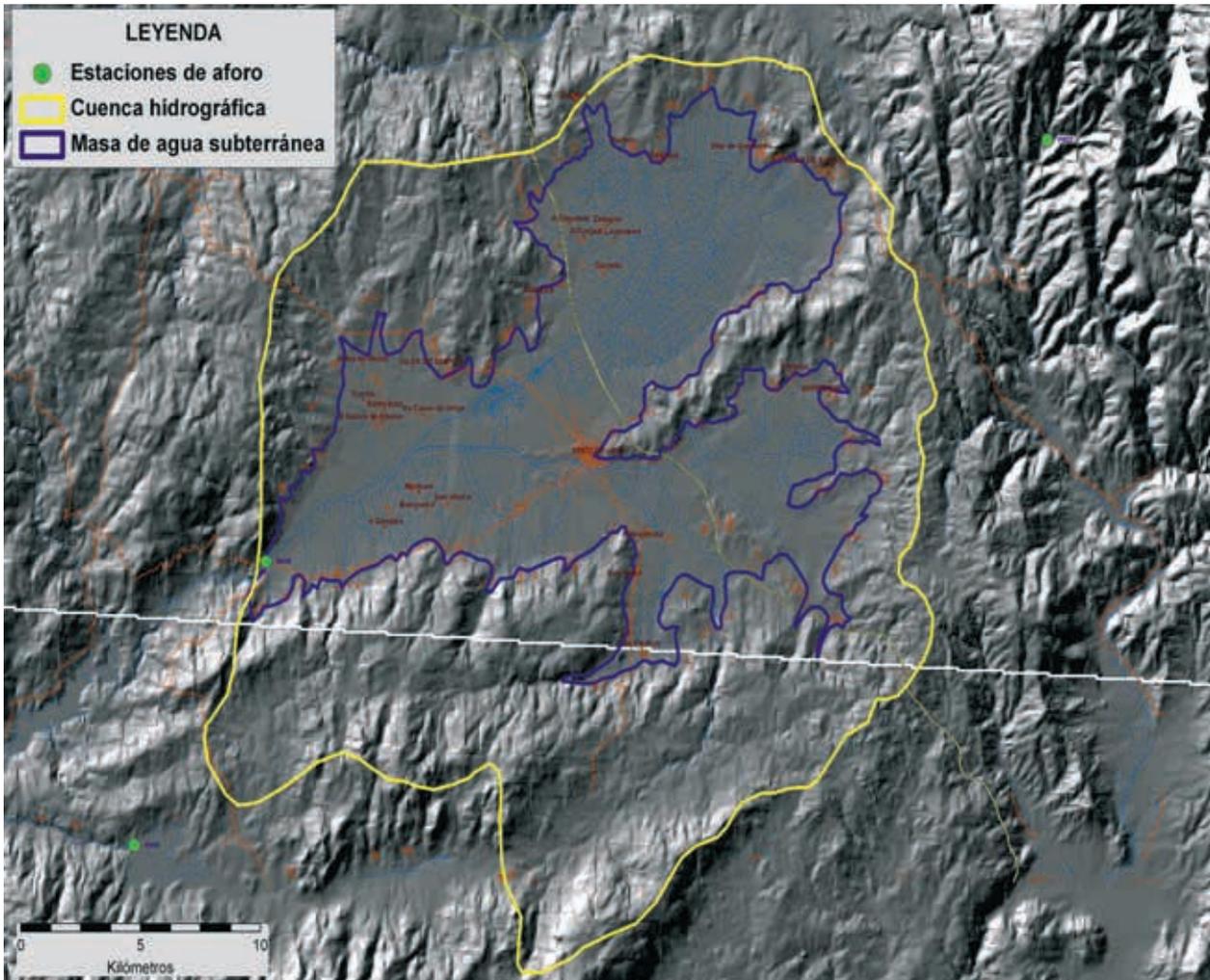


Figura 16. Delimitación de la cuenca hidrográfica del Río Limia hasta la estación de aforo de Puente Linares, junto con la traza de la MASb 011.006 Xinzo de Limia.



Figura 17. Aspecto de los materiales colindantes.

cm (figura 18), valor bastante superior a los medidos en el entorno. La temperatura evoluciona de forma uni-

forme con la profundidad habiéndose medido un valor máximo de 28,2 °C en la base del sondeo. Estos datos llevan a considerar que en esta zona existe un aporte de agua termal, de mayor mineralización, procedente, probablemente, del basamento paleozoico. El sondeo auxiliar está situado muy próximo al anterior, los valores de conductividad eléctrica alcanzan la cifra de 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la temperatura del agua asciende progresivamente hasta un valor de 26,2 °C, corroborando la hipótesis de que existe un aporte de agua de mayor conductividad y temperatura en la base del sondeo.

Vulnerabilidad

En la encomienda de gestión se realizó el estudio referente a la vulnerabilidad de los materiales frente la contaminación del agua subterránea; en la figura 19 se muestra la zonificación de los mismos, siendo los valores en esta masa entre moderados y muy elevados.

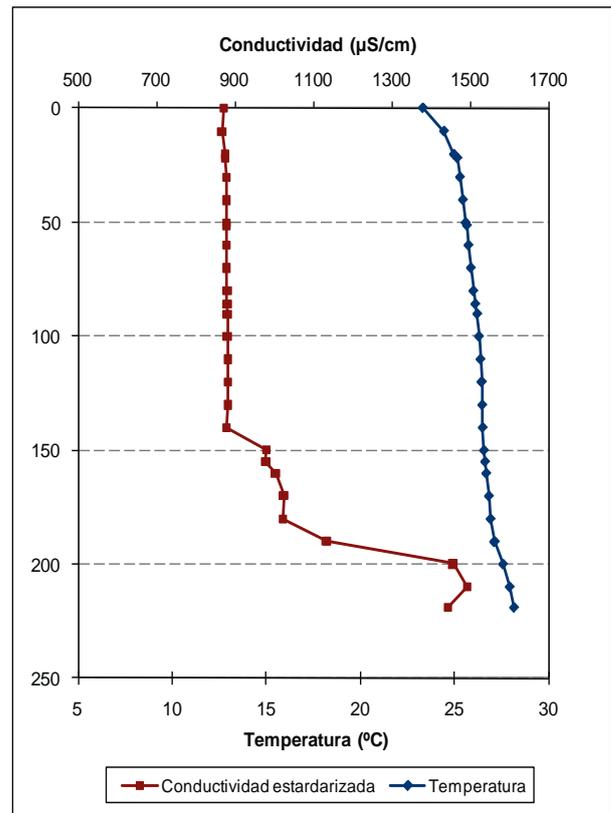


Figura 18. Aspecto actual del Sondeo Termal y perfil de temperatura y conductividad

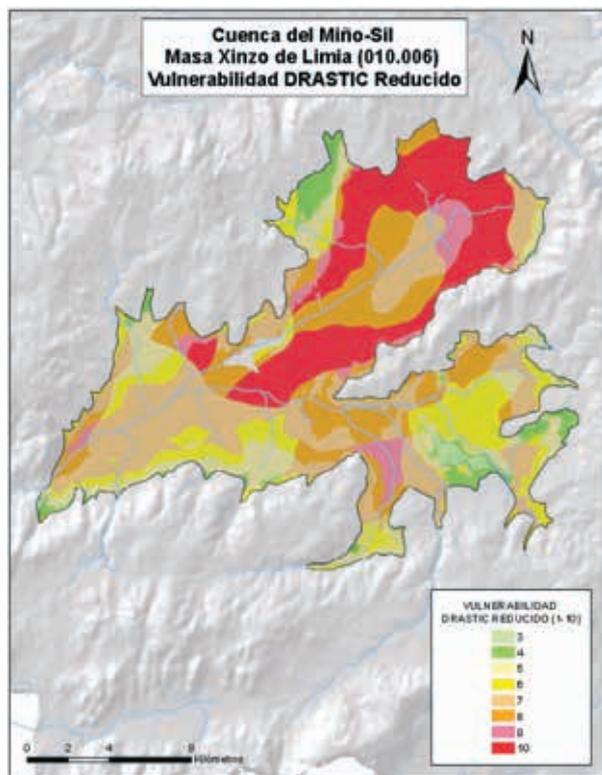


Figura 19. Mapa de Vulnerabilidad. (Fte: Encomienda de Gestión DGA-IGME 2007-2010).

CONSIDERACIONES GENERALES

Los primeros estudios realizados en la depresión terciaria de Xinzo de Limia datan del s. XIX y tenían como objeto la desecación de la laguna denominada *Laguna de Antela*, de carácter endorreico y que se interpreta como un afloramiento de las aguas subterráneas. Finalmente, la desecación de la laguna se llevó a cabo, por el Instituto Nacional de Colonización, entre finales de los años 50 y principios de los 60, con la finalidad de transformar el suelo en uso agrícola. Con posterioridad, a finales del s. XX, en relación con la presencia de lignitos en profundidad se desarrollaron varias investigaciones por parte del Instituto Geológico y Minero de España y Endesa, principalmente. Durante el transcurso de las mismas, se realizaron gran número de sondeos así como de perfiles geofísicos que permitieron elaborar el modelo geológico de la cuenca. Debido a la presencia de aguas subterráneas, y con el fin de su posible explotación minera, se procedió a la elaboración de un estudio hidrogeológico, en el que se obtuvieron datos de parámetros hidrogeológicos y piezometría y se estableció un modelo hidrogeológico conceptual. Los estudios posteriores, encaminados al uso y gestión del agua subterránea para regadío, han

sido realizados en su mayor parte por la Xunta de Galicia y han permitido mejorar el conocimiento de las características hidrogeológicas de la MASb. Además, han puesto a disposición numerosos piezómetros de control que permiten realizar un seguimiento de la evolución piezométrica. Por otra parte, cabe destacar, las redes de control del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, que cuentan con una estación SAICA en el río Limia en Puente Linares y respecto a las aguas subterráneas, dos puntos de la red de estado cuantitativo y dos puntos de la red de estado cualitativo.

La gran cantidad de información generada en el transcurso de las investigaciones ha permitido realizar una síntesis geológica y la elaboración de un modelo geológico 3D, mediante la aplicación de nuevas tecnologías. Este elemento que engloba toda (o la mayor parte) de la documentación generada sobre la zona constituye una herramienta básica que podrá ser utilizada para la modelización hidrogeológica de toda la MASb así como en la gestión del agua subterránea.

El modelo hidrogeológico conceptual elaborado a partir de la interpretación geológica de la cuenca, ha sido posteriormente corroborado con nuevos sondeos junto con las observaciones de campo realizadas. Se considera, por tanto que cada una de las dos unidades detríticas definidas en el modelo geológico constituyen sendos acuíferos, denominados *acuífero inferior* y *acuífero superior*, independizados hidráulicamente por el nivel lignitífero-arcilloso en la zona central de la cuenca, habiéndose definido mediante la interpretación de las columnas de sondeos, la extensión de este nivel. En el área en que ambos acuíferos están en contacto se produce la recarga del acuífero inferior a través del acuífero superior.

El modelo geológico realizado, junto con la estimación de un valor de porosidad media del 4,6%, ha permitido realizar un cálculo orientativo del volumen de reservas de agua en la unidad superior de 380 hm³ de los que, se calcula que unos 58 hm³ podrían corresponder a recursos renovables anualmente.

El límite actual de la MASb se restringe a los materiales permeables de edad terciaria-cuaternaria y se ajusta al contacto con las rocas ígneas y metamórficas de baja permeabilidad. Sin embargo, considerando el carácter semiendorreico de la cuenca, toda el agua caída en la superficie limitada por la divisoria de aguas superficiales es drenada de forma superficial o subterránea a

través de esta masa. Este hecho debe ser considerado en dos aspectos: a) para en el cálculo del volumen de agua correspondiente a la recarga del acuífero, ya que se deben contabilizar todos los aportes procedentes de la precipitación dentro del área correspondiente a la cuenca superficial y b) desde el punto de vista de la protección cualitativa de las aguas subterráneas, ya que cualquier contaminante vertido dentro del dicho área podría afectar al agua subterránea..

El balance hídrico se ha realizado para la totalidad de la MASb, considerando los aportes por precipitación correspondientes a toda la cuenca hidrográfica del río Limia hasta la estación de aforos de Puente Linares; los cuales para un año medio se estiman en unos 325 hm³. El principal uso del agua es el agrícola, y representa como máximo un 7% de la lluvia útil. En la actualidad, los excedentes hídricos de la cuenca se drenan a través del río Limia, La estación SAIH, gestionada por la Confederación Hidrográfica del Norte, situada en Puente Linares, permite el control de los recursos hídricos de la cuenca.

Para mejorar y completar el conocimiento de la MASb se considera necesario realizar un análisis pormenorizado de toda la información existente relativa a la hidroquímica de las aguas subterráneas y complementarla con muestreos a distintas profundidades a fin de estudiar, analizar e interpretar correctamente las diferencias de conductividad encontradas en los perfiles realizados. Por otro lado, a fin de garantizar la no afección relacionada con el uso agrícola del suelo, se considera de interés el control periódico de las aguas subterráneas haciendo especial hincapié en los parámetros asociados a dicho uso.

Una evaluación preliminar de la vulnerabilidad a la contaminación ha llevado a la observación de que la mayor parte de la superficie de la MASb presenta valores entre vulnerabilidad moderada y muy elevada, por lo que se considera necesario la protección adecuada de las aguas subterráneas ya que cualquier vertido realizado podría incidir de forma negativa sobre la calidad de las mismas, generando posibles restricciones al uso.

La presencia de aguas hipotermas en dos sondeos surgentes que atraviesan el acuífero inferior podrían estar relacionadas con aportes termales procedentes del zócalo ígneo, si bien se necesitaría la realización de una investigación de mayor detalle, que incluya, entre otros trabajos, la ejecución de sondeos que profundicen en el zócalo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dantín, J. (1942). Regiones naturales de España. Tomo I. C.S.I.C., Instituto Juan Sebastián Elcano, Madrid.
- Díez Montes, A., González Menéndez, L., Martínez Catalán, J.R. y Gallastegui, G. (2010). Mapa geológico digital continuo a escala 1:50.000 de Galicia Occidental. IGME.
- ENDESA (1991): Estudio de factibilidad de la explotación del yacimiento de lignitos de Ginzo de Limia (Ourense). *Empresa Nacional de Electricidad.*, 132 p. y vol. V anejos. Madrid.
- Fernández Rubio, R. y Asociados Consultores (1982): Yacimiento de lignitos de Ginzo de Limia. (Ourense). Estudio hidrogeológico preliminar. 314 p. Madrid.
- Fernández Rubio, R. y Asociados Consultores (1986): Estudio hidrogeológico infraestructural Lagoa Dántela (Ourense). 183 p. y 9 mapas. Madrid.
- Fontán Rodríguez, D. (1845). *Carta geométrica de Galicia*, Lemerrier, Paris.
- IGME (1974a): Mapa Geológico 1:50.000, Celanova (nº 263), Ginzo de Limia (nº 264). *Inst. Geol. y Min. de España*. Memoria y Hoja. Madrid.
- IGME (1982a): Investigación de lignitos en las cuencas limnicas Gallegas (Cuenca Ginzo de Limia). *Inst. Geol. y Min. de España*. 86 p.
- IGME (1982b): Sondeos para evaluación previa de reservas lignitíferas en Ginzo de Limia (Ourense). *Inst. Geol. y Min. de España*. 53 p.
- IGME (1986): Informe sobre el posible emplazamiento de residuos sólidos urbanos de Xinzo de Limia (Ourense). *Inst. Geol. y Min. de España*. 15 p.
- Julivert, M., Marcos, A. y Truyols, J. (1972). Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne, 4, 1-7.
- Seara Valero, J.R. (2009): Estudio Geológico y geofísico del Acuífero Termal de la Subcuenca de Antela, Provincia de Ourense. Fase 1, Dpto. Xeociencias Mariñas e Ordenación do Territorio. Facultad de Ciencias de Ourense. Universidad de Vigo. 123 p. Vigo.
- Xunta de Galicia (2002): Estudio Hidrogeológico para la Transformación en Regadío de la Comarca de "A Limia", (Ourense). Consellería de Agricultura, Gandería e Política Agroalimentaria.
- Xunta de Galicia (2003a): Características técnicas y resultados de los sondeos de captación de aguas subterráneas para el abastecimiento del regadío de la margen izquierda del canal principal de la Laguna de Antela. Concejos de Sandias, Sarreaus y Xinzo de Limia. Consellería de Agricultura, Gandería e Política Agroalimentaria.
- Xunta de Galicia (2003b): "Características técnicas y resultados de los sondeos de captación de aguas subterráneas para la mejora y consolidación de los regadíos en la comarca de A Limia, Ourense . Zona Laguna de Antela" Consellería de Agricultura, Gandería e Política Agroalimentaria.
- Xunta de Galicia (2006): "Proyecto de medidas correctoras-compensatorias y primer año de vigilancia ambiental (2006) del proyecto de transformación en regadío del secano de la Laguna de Antela". Consellería de Medio Rural.
- Xunta de Galicia (2007 a,b,c): Informe sobre los resultados de los piezómetros realizados en la comarca de "A Limia" (Ourense). Zonas de Parte Alta, Parte Baja Zona y Entre Ríos. Consellería de Medio Rural.
- Xunta de Galicia (2008): Informe sobre los resultados de los piezómetros realizados en la comarca de "A Limia" (Ourense). Zona de Porqueira. Consellería de Medio Rural.
- Xunta de Galicia (2009^a, b, c, e d, e): Informe sobre los resultados de los piezómetros realizados en la comarca de "A Limia" (Ourense). Zonas de Sarreaus, Trasmiras, Val de Ouro, Fontoiro (Villar de Barrio) y Medorra (Xunquera de Ambia). Consellería de Medio Rural.
- Zapata Tejedor, F. (1967): Desecación y saneamiento de la laguna de Antela. *Revista de Obras Públicas*, 115, tomo I (3026): 465-472

EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA DISPONIBLES EN
LAS MASb DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO: 030.008 LA
ALCARRIA, 030.015 TALAVERA, 030.018 OCAÑA Y 030.022 TIÉTAR

José María Ruiz Hernández



En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Evaluación de los recursos de agua subterránea disponibles en las MASb de la Demarcación Hidrográfica del Tajo: 030.008 La Alcarria, 030.015 Talavera, 030.018 Ocaña y 030.022 Tiétar*, llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

José M.^a Ruiz Hernández
Carolina Guardiola Albert

Colaboración:

Juan de Dios Gómez Gómez IGME
Empresa CRN para realización de trabajos auxiliares

EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA DISPONIBLES EN LAS MASb DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO: 030.008 LA ALCARRIA, 030.015 TALAVERA, 030.018 OCAÑA Y 030.022 TIÉTAR

INTRODUCCIÓN

A petición de las distintas Confederaciones Hidrográficas se han desarrollado actuaciones complementarias, como apoyo a los correspondientes Planes Hidrológicos de Cuenca en desarrollo. En este contexto, la Confederación Hidrográfica del Tajo solicitó el estudio de evaluación de los recursos de agua subterránea disponibles en las masas de agua subterránea 030.008 La Alcarria, 030.015 Talavera, 030.018 Ocaña y 030.022 Tiétar.

En síntesis, los trabajos realizados para cada una de ellas consistieron en:

- Revisar las cifras de recarga de cada MASb, partiendo de los datos de SIMPA-2 y la información bibliográfica disponible
- Revisar y actualizar los datos de extracciones
- Analizar y cuantificar las conexiones con masas de agua superficial y ecosistemas asociados
- Analizar los valores existentes de flujos interanuales medios requeridos para conseguir los objetivos medioambientales.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

El esquema metodológico de conceptos sobre recursos subterráneos empleados en la evaluación del estado cuantitativo de las MASb se resume en la figura 1.

Los aspectos claves en la cuantificación de los recursos renovables y disponibles se basan principalmente en el conocimiento de la recarga, las extracciones y la relación aguas superficiales y subterráneas para determinar la dependencia de la mismas sobre la evaluación de los caudales ambientales.

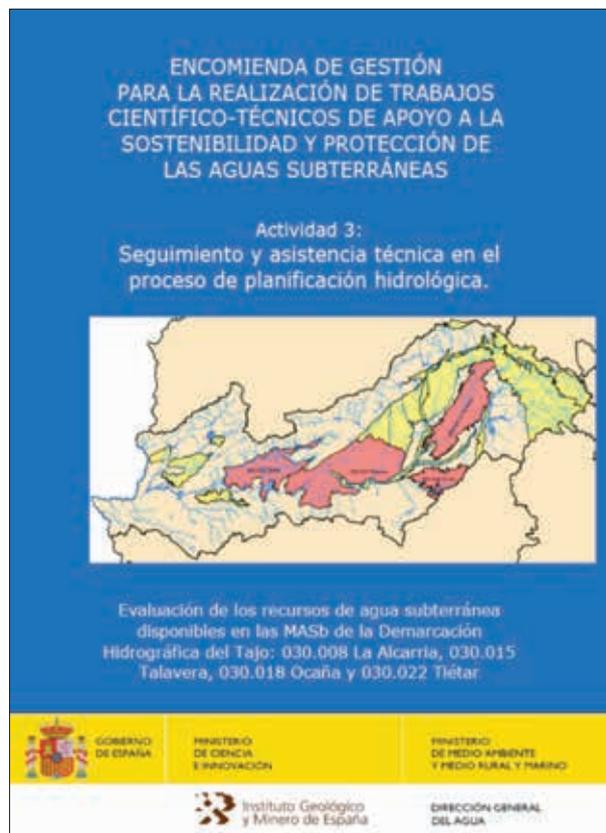
Recarga

Generalmente, en la mayoría de los estudios y trabajos en los que se ofrecen datos de balances hidrogeológicos

en relación con la estimación de los recursos subterráneos, el concepto de recarga, responde únicamente a los procedentes de la recarga directa de las precipitaciones o recarga por agua de lluvia y se asimilan al término de recurso natural renovable.

La estimación de los recursos subterráneos naturales se lleva a cabo fundamentalmente a partir de dos metodologías:

- A partir de los balances hidrogeológicos tradicionales de los acuíferos y que han sido consultados en la revisión bibliográfica. En estos estudios, a partir de la precipitación y con una estimación de la lluvia útil (precipitación menos evapotranspiración real), se



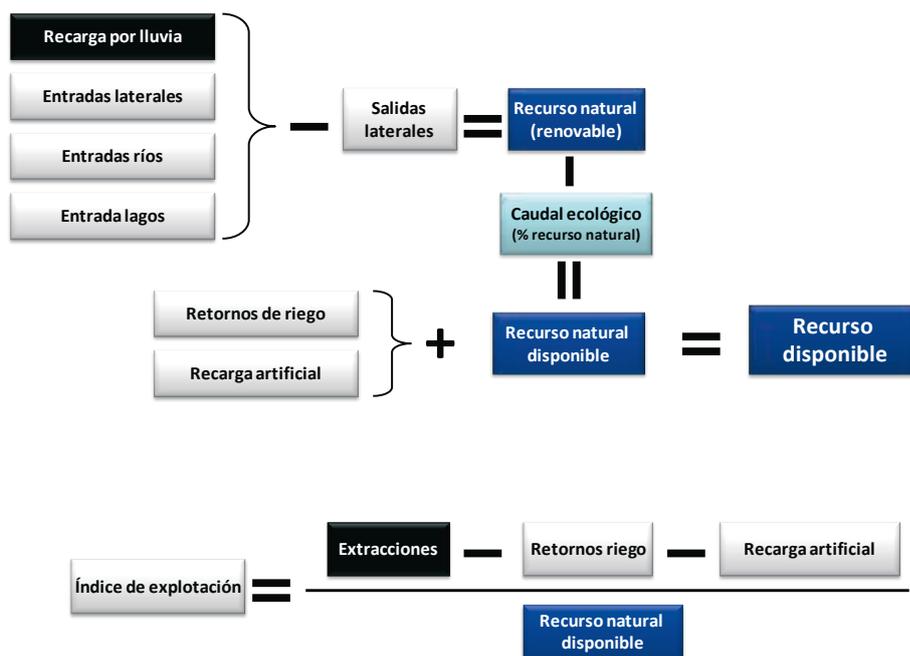


Figura 1. Esquema de evaluación del estado cuantitativo

aceptaba una hipótesis de porcentaje de infiltración según la litología y se multiplicaba por la superficie permeable de la unidad de estudio y se contrastaba con datos de caudales de manantiales y de ríos.

— A partir de modelos de simulación y transformación de lluvia en aportaciones o escorrentía mediante la calibración con datos principalmente foronómicos. Se asume que los resultados de estos modelos, con todas sus limitaciones, dan información de los caudales de base de los ríos, que en régimen natural, corresponderían a los drenajes o salidas de los acuíferos y por tanto a los recursos subterráneos renovables.

Uno de los trabajos que se llevó a cabo en este estudio consistió en la revisión de las cifras de recarga de cada MASb, partiendo de los datos del modelo SIMPA-2 y de la información bibliográfica disponible de estudios hidrogeológicos regionales.

En el apartado correspondiente a los recursos subterráneos de cada masa de agua subterránea estudiada, se detallaba la revisión bibliográfica llevada a cabo de datos de recarga mediante cuadros resumen y gráficos (ver figura 2), y se analizan con los de SIMPA-2 (ver figura 3).

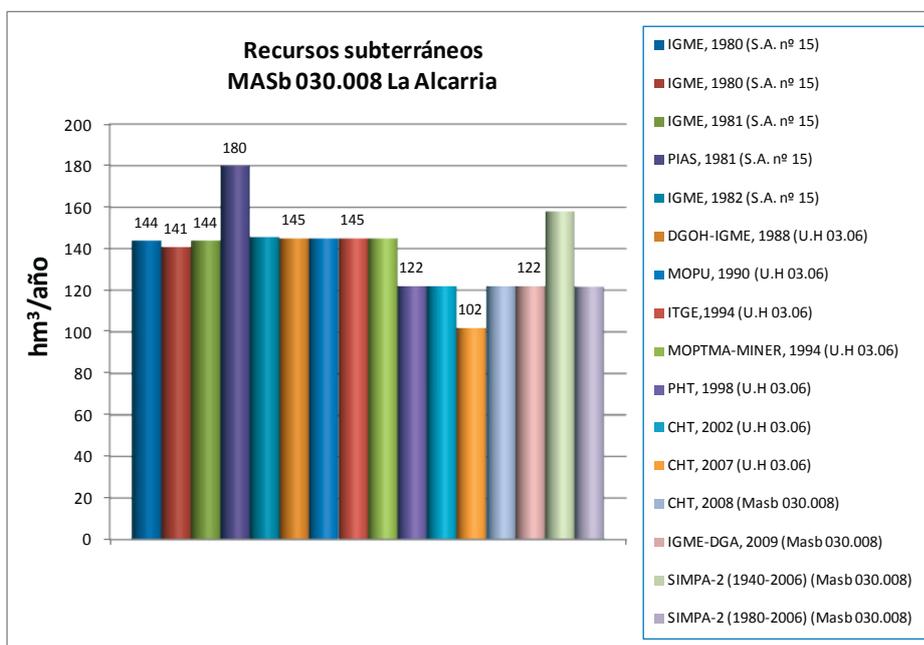
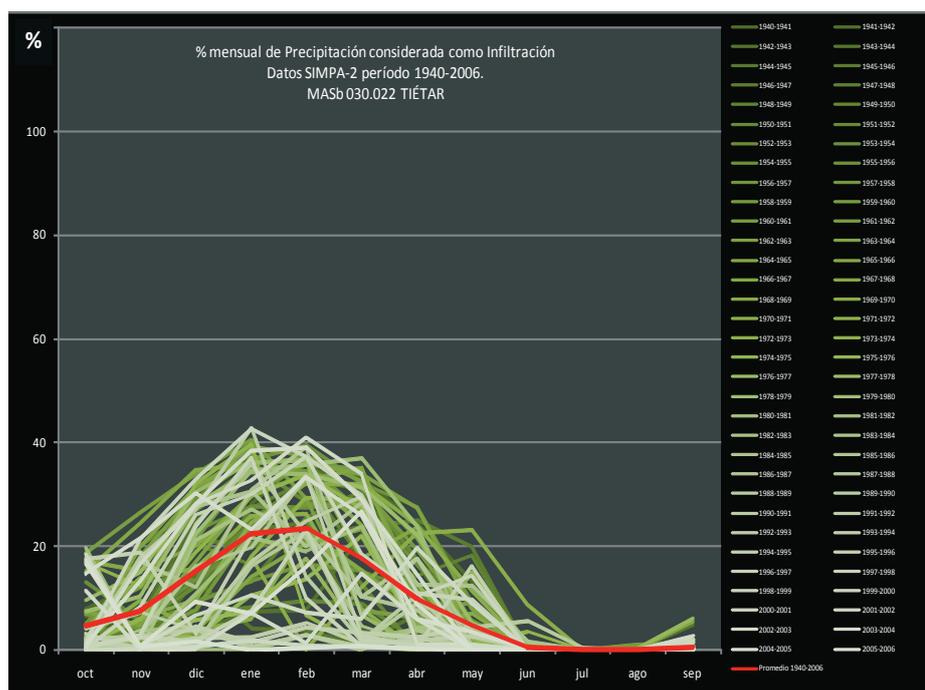


Figura 2. Valores de recarga por infiltración de agua de lluvia obtenidos de la revisión bibliográfica en las diferentes unidades en las que ha sido considerado el acuífero de La Alcarria (MASb 030.008).

Figura 3. Porcentaje de la precipitación que se considera como infiltración al acuífero mensualmente en todo el período de simulación según SIMPA-2 (MASb 030.022).



De la valoración de los distintos resultados obtenidos se puede extraer:

- En la masa de La Alcarria, los valores de recarga consultados y los ofrecidos por el modelo son similares.
- En la masa de Talavera, los valores del modelo parecen subestimados. Esto se debe a que considera un 8% de infiltración frente al 10-12% de estudios anteriores, y que el propio modelo no tiene en cuenta los aportes laterales ni la recarga a través de cauces ni depósitos cuaternarios.
- En la masa de Ocaña, llama la atención las estimaciones tan bajas realizadas con el SIMPA-2 (11-15 hm³/año). Una de las explicaciones puede ser que el límite de la masa de Ocaña no incluye la mayor parte de la cuenca hidrográfica del arroyo Martín Román, hacia el cual descarga subterráneamente el acuífero. Al no considerarse las salidas del acuífero al arroyo (la estación de aforos se encuentra fuera de la MASb en la unión con el río Tajo), la recarga estimada ha tenido que “compensar” esta falta de salidas calculándose más baja. Igualmente los porcentajes de infiltración respecto a la precipitación estimados por SIMPA2 (3%) contrastan con los utilizados en la bibliografía (10-15 %) para este acuífero y en general para acuíferos carbonatados.
- En la masa de Tiétar, parece que los valores que ofrece SIMPA2 están sobrevalorados. A pesar de tratarse de materiales detríticos terciarios con un

alto contenido en arcillas, considera hasta un 15 % de infiltración de la precipitación. Igualmente, el modelo no tiene en cuenta el flujo subsuperficial o hipodérmico, no distinguiendo entre infiltración “profunda” y la que se produce en áreas de menor permeabilidad dando lugar a una escorrentía subsuperficial que alcanza más o menos rápido los cauces. En el período 1980-2006 los recursos se cifran en 210 hm³, cifra más acorde al máximo establecido en otros estudios.

Extracciones o usos de agua subterránea

Las principales fuentes de información que se han utilizado para la realización de estos trabajos en los aspectos de cuantificación de los volúmenes de aguas subterráneas empleadas para regadío y abastecimiento, por los procedentes de coberturas gráficas y de tablas y bases de datos disponibles.

Coberturas gráficas:

- SigPac: registro público de carácter administrativo con información de las parcelas con usos o aprovechamientos agrarios definidos en 2009.
- Parcelario de zonas regables públicas: zonas de riego de iniciativa pública en 2009.
- Tomas de riego privado o captaciones de agua superficial para riego: datos sobre los volúmenes estimados de riego privado con agua superficial de Comisaría de Aguas.

Tablas y bases de datos:

- Alberca 2010: inventario de los derechos de uso de aguas subterráneas, por lo que, a falta de datos de extracciones reales, se dispone de los volúmenes comprometidos y en trámite de los expedientes de aprovechamiento recogidos por la Confederación Hidrográfica. A partir de esta base de datos, se han obtenido los volúmenes anuales por municipio para los distintos tipos de uso presentes del conjunto de captaciones, así como el número de éstas.
- Base de Datos "Pozos": Inventarios de puntos de agua realizados por parte de la CHT entre los años 1995 y 2001. Se han obtenido los volúmenes anuales extraídos por municipios para los distintos usos de las captaciones. La valoración y comparación con el resto de información se realiza en el apartado correspondiente de cada MASb.
- Encuesta de infraestructuras y equipamientos locales (EIEL) de 2008.
- Registro de captaciones para consumo humano: captaciones de abastecimiento a población (localización y volúmenes) de la Actividad 9 de la Encomienda IGME-DGA (figura 4).

Para la estimación de las extracciones de aguas subterráneas en las diferentes masas de agua objeto de estudio, se han seguido tres líneas metodológicas de trabajo

dependiendo del tipo de información aportada por cada una de las fuentes de información disponibles realizando un tratamiento de convergencia de datos usando el término municipal como unidad de trabajo.

Estas líneas de trabajo han sido:

- a) Estimación de regadíos de aguas subterráneas según usos de parcelas de riego del SigPac mediante SIG a través de cálculos de superficies mediante una hipótesis de trabajo planteada.
- b) Cálculo de extracciones de aguas subterráneas para abastecimiento a población y regadío mediante la utilización bases de datos.
- c) Contraste de datos generados y de los procedentes de la recopilación bibliográfica y valoración de los resultados.

Estimación de extracciones según usos de parcelas de riego mediante GIS

Se planteó la siguiente hipótesis de trabajo: las parcelas de riego catalogadas en el SigPac que no poseen una toma de riego privado superficial, que no pertenecen a una zona regable de iniciativa pública y que están a más de 100 metros de un cauce y/o una infraestructura tipo canal o acequia, podrían pertenecer a riego con agua subterránea (figura 5). Esta hipótesis de trabajo es muy conservadora, puesto que se han considerado unas distancias de tan sólo 100 m.

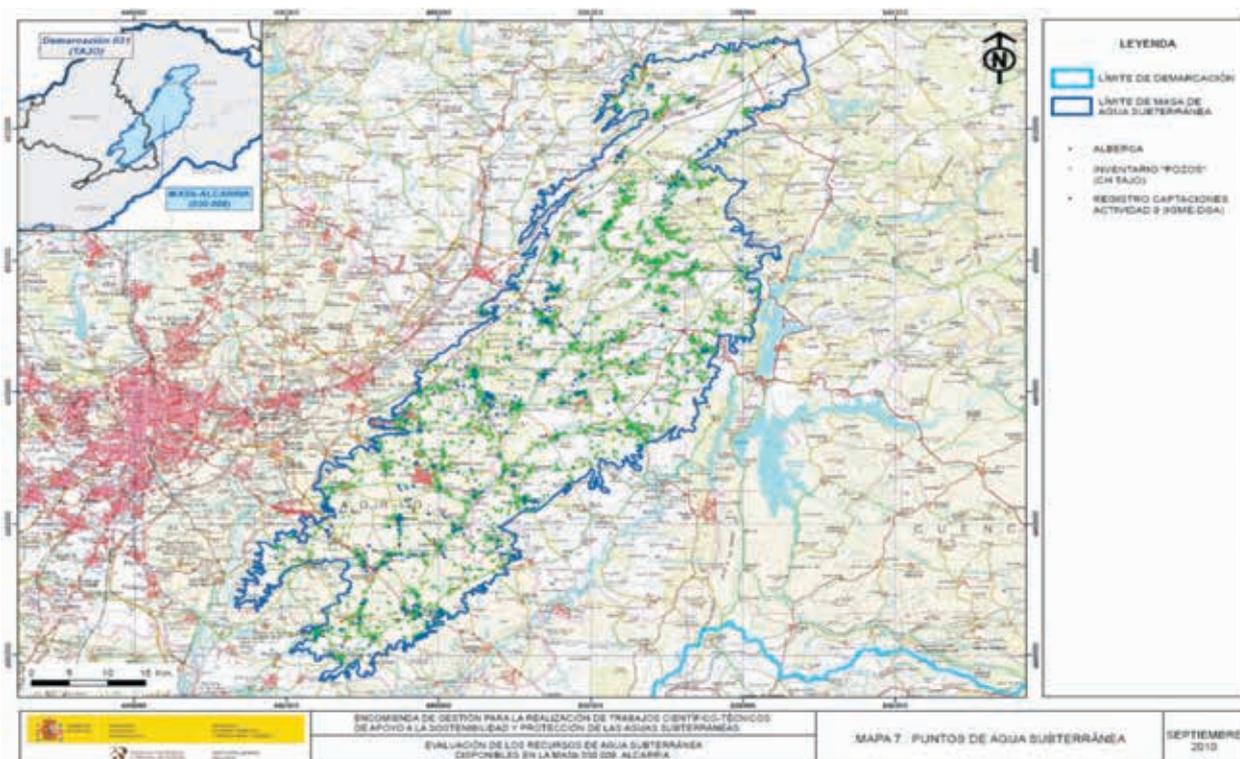
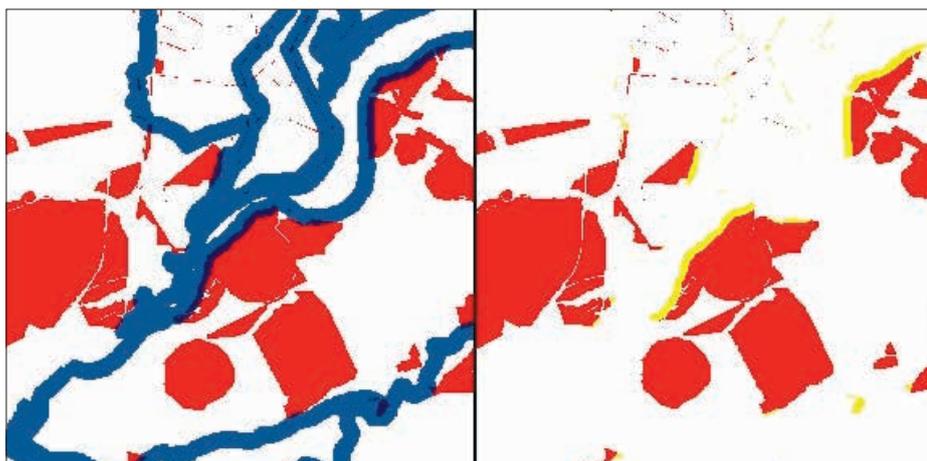


Figura 4. Ejemplo de mapa de puntos de agua (MASb 030.008)

Figura 5. Eliminación de parcelas SigPac, sin toma de riego privado y no perteneciente a zonas de riego público con buffer de 100 metros de la red de canales y acequias.



a cauces, canales y acequias. Lo ideal hubiera sido poder disponer de coberturas de cauces, acequias y canales con sus cotas altimétricas, que al cruzarse con un modelo digital de elevaciones, podría haberse considerado como criterio, además de la distancia, el de cota o altura por encima de la cual, los riegos existentes tendrían que considerarse con aguas subterráneas al quedar desconectadas de las infraestructuras de riego por gravedad.

El resultado final de este proceso consiste en una cobertura de datos SigPac, que se ha cuantificado por término muni-

cipal y por tipología de cultivo, con objeto de poder evaluar el volumen de riego estimado con aguas subterráneas, aplicando los datos de dotaciones por tipo cultivo según el ETI (CHTAJO, 2008). Las cifras obtenidas mediante la hipótesis planteada representan el máximo teórico de utilización de aguas subterráneas que podría darse (figura 6)

Ha resultado de interés observar la evolución en el tiempo de las zonas agrícolas de riego por teledetección de varios años (figuras 7 y 8), a partir del estudio realizado por TRAGSA para la CHT.

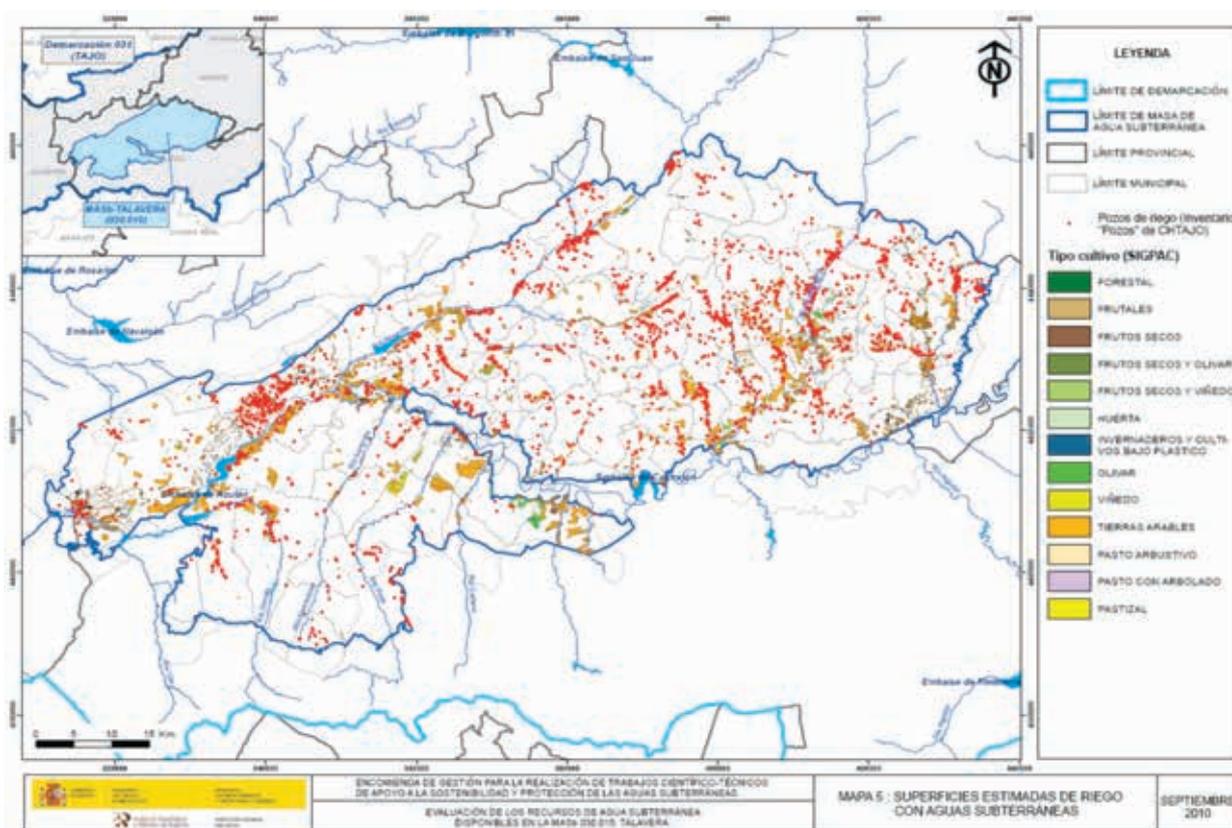


Figura 6. Superficies estimadas de riego con aguas subterráneas (MASb 030.015)

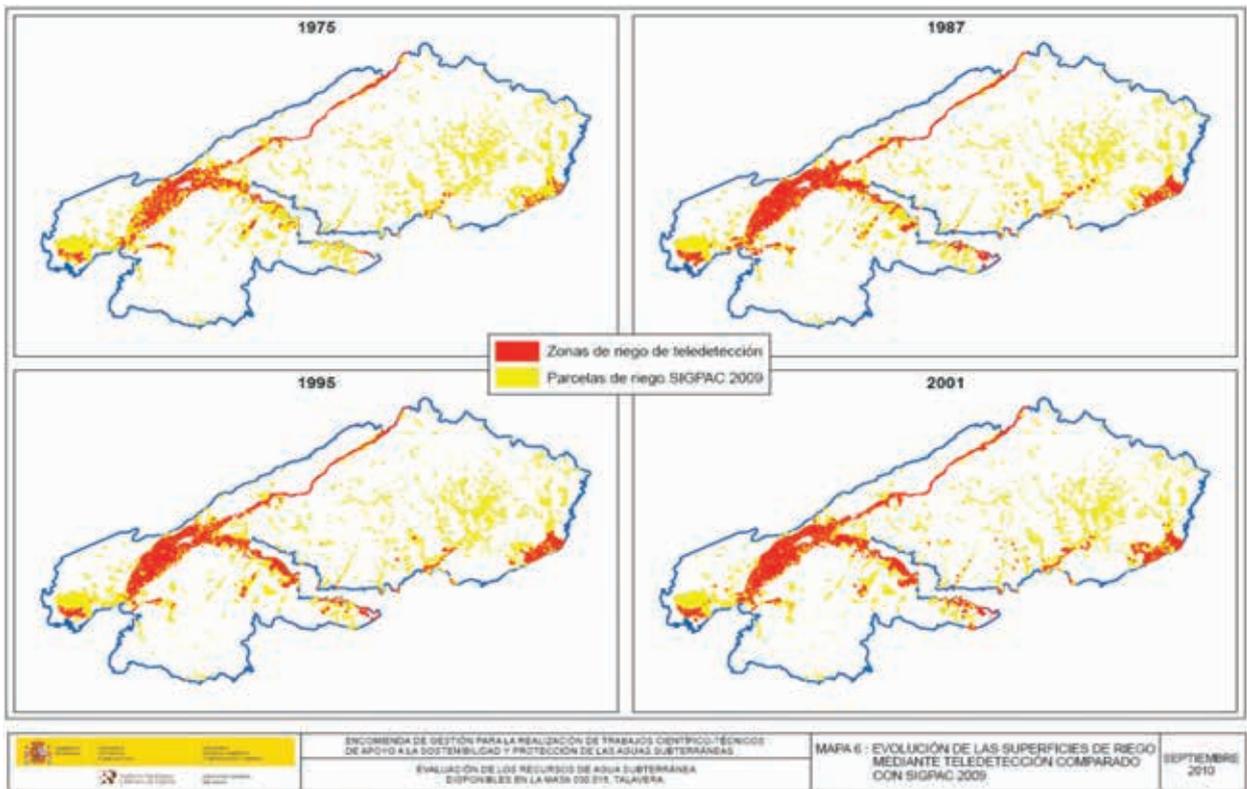


Figura 7. Evolución de las superficies de riego mediante teledetección (MASb 030.015)

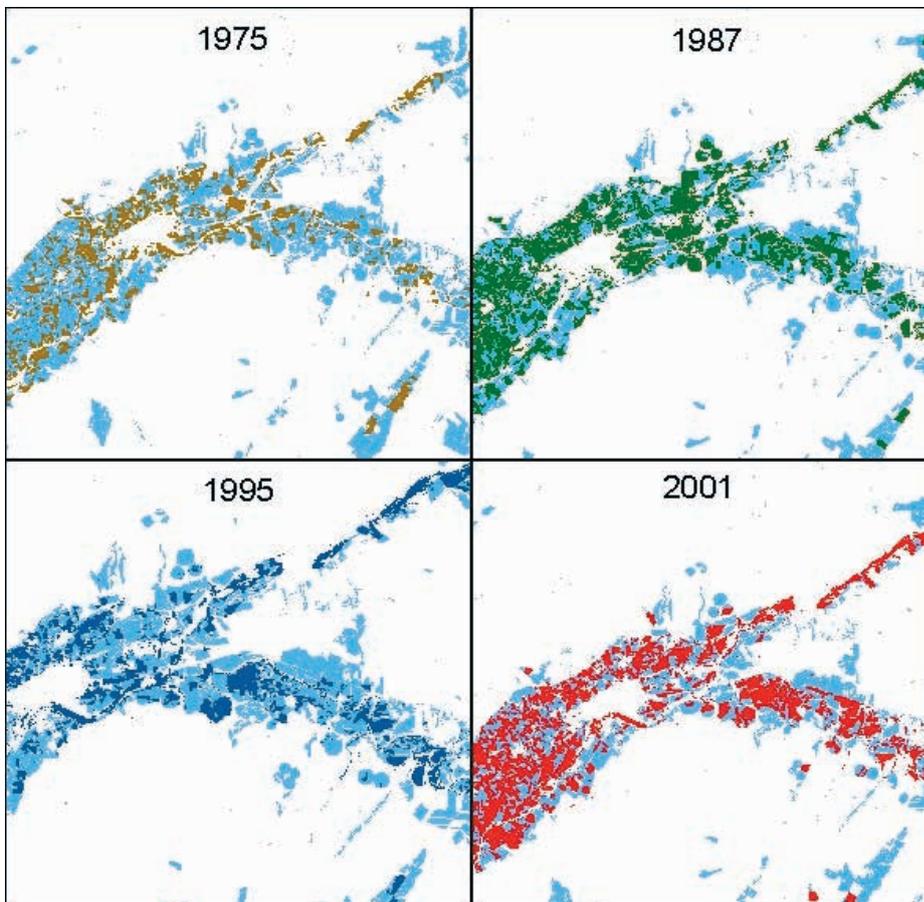


Figura 8. Detalle de superficies en regadío obtenidas mediante Teledetección frente a las Sigpac (azul claro)

Se aprecia en general una buena persistencia, a lo largo del tiempo, de las zonas de regadío, que además se corresponden bastante bien con la distribución de las parcelas del SigPac y por tanto se observa una estabilidad de las zonas de regadíos reales respecto a las parcelas declaradas como regadío. Esto valida y da robustez al parcelario de SigPac de 2009 en cuanto al uso de regadío, como fuente principal de la información gráfica sobre regadíos.

Resumen de estimaciones de extracciones o usos

A continuación se presentan resumidos los resultados obtenidos para riego y abastecimiento tras el tratamiento de la información disponible (tablas 1 y 2). En los cuadros de síntesis del apartado final de resultados obtenidos se valoran los mismos y su fiabilidad tras contrastarlos con los procedentes de diferentes fuentes de información.

Tabla 1. Resumen de estimaciones de extracciones de agua subterránea para riego según las distintas fuentes de información tratadas.

EXTRACCIONES DE AGUA PARA RIEGO (volúmenes en m ³ /año)						
FUENTE DE INFORMACIÓN		UNIDADES	ALCARRIA	TALAVERA	OCAÑA	TIÉTAR
SigPac	SUP_TOTAL	Ha	4.642	42.512	1.118	23.831
	VOL_TOTAL	m ³ /año	19.713.334	141.807.217	4.797.748	102.367.013
	SUP_SUB	Ha	1.942	22.182	822	8.806
	VOL_SUB	m ³ /año	8.213.344	92.972.890	3.539.058	37.955.097
ALBERCA 2010	USO_RIEGO	m ³ /año	2.939.567	31.384.614	10.873.199	3.035.367
	SUP_REGABLE	Ha	1.404	8.592	5.650	932
Inventario POZOS		m ³ /año	3.032.463	42.187.066	24.500.404	948.027

Tabla 2. Resumen de extracciones de agua subterránea para abastecimiento según las distintas fuentes de información tratadas.

VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN PARA ABASTECIMIENTO (m ³ /año)					
FUENTE DE INFORMACIÓN		ALCARRIA	TALAVERA	OCAÑA	TIÉTAR
ESTUDIO_JCLM (1997)	VOL_JCLM (m ³ /año)	612	10.838.000	2.273.000	827
ENCUESTA EIEL 2005-2008	Nº_CAPTACIONES	142	266	35	39
ACTIVIDAD 9-REGISTRO DE CAPTACIONES IGME	Nº_CAPTACIONES	424	372	110	26
	VOL_ANUAL (m ³ /año)	3.025.485	21.192.292	3.666.803	251.026
ALBERCA 2010	USO_ABASTEC (m ³ /año)	1.358.413	2.764.830	34.365	544.638
Inventario POZOS	USO_ABASTEC (m ³ /año)	3.200.790	22.049.169	4.072.143	282.122

RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS TRAMOS DE RÍO RELACIONADOS CON ACUÍFEROS

Partiendo de los trabajos realizados en la actividad 4 de la Encomienda DGA-IGME sobre la "Identificación de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, y descarga por manantiales" se llevó a cabo una valoración y revisión de los resultados obtenidos para cada MASb (tabla 3).

La valoración de resultados para las distintas masas estudiadas es:

- **030.008 La Alcarria:** Se aprecian descensos importantes de caudal en el río Tajuña en periodo de riegos, debido a los regadíos de la vega. De la cuantificación de la relación río-acuífero en los tramos más al norte de la MASb se desprenden

MASb	N° tramos ríos identificados con acuíferos	N° de tramos realizado cuantificación	Cuantificación			
			Nombre del tramo	parámetro de agotamiento (mes ⁻¹)	promedio escorrentía subterránea Hm ³ /año	% del total del caudal del río
030.008 Alcarria	4	3	Río Badiel	0.00996 (o semiagot. de 2.32 meses)	3.47	54
			Río Tajuña		38.3	
			Tramo Río Ungría	0.00425 (o semiagot. de 5.44 meses)	12.36	78
030.015 Talavera	6	3	Río Vallehermoso	0,02179 (o semiagot. de 1,06 meses)	0,16	11,05
			Río Pusa	0,00344 (o semiagot. de 6,72 meses)	7,97	22,61
			Río Sangreras	0,04545 (o semiagot. de 0,51 meses)	0,24	3,52
030.018 Ocaña	1	1	Arroyo Martín Román	0,0116 (o semiagot. de 1,99 meses.)	6,44	71.13
030.022 Tiétar	8	4	Tramos río Tiétar I y II	0,053 (o semiagot. de 0,44 meses)	808.1	15.44
			Tramos río Tiétar III y IV	0,034 (o semiagot. de 0,67 meses.)	261,5	19,9
			Tramos río Santa María I, II y III	0,025 (o semiagot. de 0,92 meses.)	6,74	18,5
			Tramo del río Alcañizo	0,0034 (o semiagot. de 6,84 meses.)	11,5	20,6

Tabla 3. Resultados obtenidos por MASb

unos porcentajes procedentes del drenaje del acuífero carbonatado alrededor del 60-70% de caudal de los ríos.

— **030.015 Talavera:** la información foronómica de la red oficial de aforos no ha podido utilizarse para la cuantificación, ya que todas las estaciones se encuentran en régimen influenciado, y las diferencias de caudales entre estaciones aguas abajo y arriba son en ocasiones negativas y sobre todo en períodos de estiaje, poniendo de manifiesto el alto grado de afección existente sobre el régimen de caudales. De los hidrogramas de las estaciones de la red oficial en régimen natural, el dato útil lo representa el porcentaje de escorrentía subterránea respecto al caudal total del río que varía, para los ríos Pusa, Vallehermoso y Sangrares, del 4 al 22% dependiendo del grado de conexión con el acuífero detrítico. Para el río Pusa, con mayor recorrido por el acuífero terciario y mayores caudales, recibe una escorrentía subterránea mayor,

del orden del 20% del caudal del mismo. Esta cifra, como en el caso del acuífero detrítico del Tiétar, puede valer como general para establecer la conexión del acuífero con estos ríos y permitir establecer un orden de magnitud para mantener los objetivos medioambientales.

— **030.018 Ocaña:** Existen dudas asociadas a la cuantificación a partir de los datos de la única estación de aforos existente. La estación de aforos del Arroyo Martín Román, aparte de estar fuera del límite de la MASb por lo que puede ser una causa de la subestimación de recurso por parte de SIMPA2, presenta un descenso en los caudales muy marcado, posiblemente influenciados por las tomas directas para riegos de la zona. El valor promedio drenado por las calizas del Páramo, a partir de la información foronómica es de 6.5 Hm³/año, muy inferior a los datos recopilados en la bibliografía por lo que se plantean dudas sobre el actual modelo conceptual de funcionamiento.

- **030.022 Tiétar:** el porcentaje de aportación subterránea al caudal del río, a partir de la descomposición del hidrograma, va del 15 al 20 %. Al disponer de estaciones de aforo al final de ríos o arroyos como el Alcañizo, que no están influenciados y que discurren exclusivamente por materiales terciarios, sus valores de aportes subterráneos, son extrapolables al resto del acuífero. Se ha de tener en cuenta que gran parte de los flujos subterráneos en esta MASb, tienen un carácter subsuperficial o hipodérmico que regresana la red superficial más o menos rápidamente.

CAUDALES ECOLÓGICOS O RESTRICCIONES MEDIOAMBIENTALES

Respecto a los caudales ecológicos o restricciones ambientales, hasta que no se estimen en todos los tramos de ríos relacionados con espacios o ecosistemas a proteger en período de estiaje (puesto que son los acuíferos los que mantiene los caudales de base en verano), no es posible determinar el requerimiento ambiental por MASb. Por ello se ha de recurrir a establecer como restricción medioambiental un porcentaje de los recursos subterráneos. Actualmente se están llevando a cabo los trabajos necesarios para su determinación y se reflejarán en el Plan Hidrológico de Cuenca.

Como se describe en el esquema metodológico de conceptos de recursos subterráneos anteriormente expuesto, el recurso susceptible de explotación es el denominado recurso natural disponible obtenido del recurso natural menos las necesidades ambientales (IPH art. 5.2.4.1). Como inicio, y en espera de contar con datos más precisos, se recomienda atribuir esta restricción medioambiental al 20% del recurso natural en todas las MASb para evitar que las masas de agua superficial asociadas no alcancen un buen estado por su régimen hidrológico como se cita en el art. 5.1.2.1.1.2 de la I.P.H. Este porcentaje ha sido también empleado en las Demarcaciones del Duero y Ebro para el cálculo del recurso disponible.

RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de la valoración de resultados que se ha llevado a cabo de las distintas fuentes de información disponibles sobre recursos subterráneos y sobre las distintas estimaciones realizadas sobre usos o extracciones, se elaboraron los siguientes cuadros para cada una de las masas estudiadas. Debido a la cantidad de información recopilada y tratada de diferentes fuentes de datos, se recomienda la consulta del informe para conocer la metodología aplicada y las limitaciones y fiabilidad de los datos empleados, aunque se haya intentado aquí un ejercicio de sintetizar en un cuadro los que se estiman mejores.

Igualmente en cada una de las masas estudiadas se incluyen como anejos las siguientes tablas y mapas, realizados a partir de un proyecto GIS para cada una ellas y de las bases de datos generadas por cada una de las fuentes de información utilizadas.

Tablas

- Volúmenes estimados de extracciones para regadío y para abastecimiento a partir del tratamiento de la información disponible por Término Municipal
- Volúmenes autorizados y Volúmenes en trámite por TT.MM de la MASb extraídos de la base Alberca 2010.

Mapas:

- Mapa 0: Situación de la MASb (Topografía base)
- Mapa 1: Situación de la MASb (Modelo digital del terreno)
- Mapa 2: Unidades de delimitación de acuífero (Sistema acuífero, UH y MASb)
- Mapa 3: Litológico
- Mapa 4: Tratamiento de información de regadíos
- Mapa 5: Superficies estimadas de riego con aguas subterráneas
- Mapa 6: Evolución de las superficies de riego mediante teledetección comparado con SigPac 2009
- Mapa 7: Puntos de agua subterránea.
- Mapa de estaciones de control y medida de caudales (act. 4 Encomienda DGA-IGME)
- Mapa sinóptico de la relación río-acuífero (act. 4 Encomienda DGA-IGME)

Cuadro síntesis de evaluación de RECURSOS DISPONIBLES, EXTRACCIONES e INDICE DE EXPLOTACIÓN de la MASb 030.008 La Alcarria								
Recurso natural subterráneo (recarga media hm ³ /año)	Observaciones (ver apartado B)	Usos o extracciones (hm ³ /año)			Observaciones (ver apartado C)	Recurso natural disponible (Hm ³ /año)	Observaciones (ver apartado 6 de la memoria)	Índice de explotación
		riego	abto.	TOTAL				
120-140	<p>Se estima que un 75-80 % de la escorrentía total corresponde a escorrentía subterránea</p> <p>La infiltración se puede estimar en un 12-18 % de la precipitación</p> <p>Los valores de recarga consultados y los ofrecidos por SIMPA-2 para el período 1980-2006 son convergentes.</p>	4	3	7-8	<p>Regadío: a partir de ALBERCA 2010 completados hasta la superficie estimada por SigPac de riego con aguas subterráneas.</p> <p>Abto.: convergencia del inventario POZOS y Registro de captaciones DGA-IGME.</p> <p>TOTAL: ALBERCA 2010 da un resultado total de 9 hm³/año entre V autorizados y en trámite.</p>	96-112	Se ha considerado como restricciones medioambientales el 20 % del recurso natural	0.06-0.08

Cuadro síntesis de evaluación de RECURSOS DISPONIBLES, EXTRACCIONES e INDICE DE EXPLOTACIÓN de la MASb 030.015 Talavera								
Recurso natural subterráneo (recarga media hm ³ /año)	Observaciones (ver apartado B)	Usos o extracciones (hm ³ /año)			Observaciones (ver apartado C)	Recurso natural disponible (Hm ³ /año)	Observaciones (ver apartado 6 de la memoria)	Índice de explotación
		riego	abto.	TOTAL				
180-200	<p>Los valores de SIMPA-2 están subestimados respecto a los valores a los valores utilizados en anteriores estudios y respecto a los coeficientes de infiltración considerados.</p> <p>El % de infiltración más utilizado estaría en torno al 10 % de la precipitación (en el SIMPA-2 se considera menor)</p>	35-40	15-20	50-60	<p>Regadío: la superficie y el volumen estimados mediante la hipótesis de trabajo con SigPac resultan muy elevados. Se consideran más acordes las cifras ofrecidas por el inventario "POZOS" y por el ALBERCA 2010 para uso exclusivo de regadío, aunque sean algo inferiores.</p> <p>Abto.: se consideran convergentes las cifras ofrecidas por el Registro de captaciones DGA-IGME y las del inventario "POZOS".</p> <p>TOTAL: de la división por TT.MM englobados en la MASb realizada mediante el tratamiento de los datos de la base de ALBERCA 2010, las cifras totales de volúmenes autorizados y en trámite, alcanzan los 44 hm³/año, cifra algo menor que la obtenida.</p>	144-160	Se ha considerado como restricciones medioambientales el 20 % del recurso natural	0.31-0.42

Cuadro síntesis de evaluación de RECURSOS DISPONIBLES, EXTRACCIONES e INDICE DE EXPLOTACIÓN de la MASb 030.018 Ocaña								
Recurso natural subterráneo (recarga media hm ³ /año)	Observaciones (ver apartado B)	Usos o extracciones (Hm ³ /año)			Observaciones (ver apartado C)	Recurso natural disponible (hm ³ /año)	Observaciones (ver apartado 6 de la memoria)	Índice de explotación
		riego	abto.	TOTAL				
35-40	<p>SIMPA-2 parece que infravalora los valores de recursos subterráneos (11-15 hm³/año) por diversas causas (aplica un % muy bajo de infiltración).</p> <p>Los valores de recursos de la bibliografía son más elevados (55-65 hm³/año) aunque existen varias dudas.</p> <p>Se recomienda llevar a cabo tareas de control hidrométrico en manantiales y cauces y control de extracciones para mejorar la estimación.</p>	8-10	2-3	10-13	<p>Regadío: tras la valoración de distintas fuentes se consideran más apropiados los datos de ALBERCA 2010. Los aportados por el tratamiento de SigPac parecen escasos debido a que existen regadíos con aguas subterráneas de la MASb fuera del límite de la misma. Por otra parte los valores del inventario POZOS parecen excesivos.</p> <p>Abto.: se consideran convergentes los valores utilizados en estudios anteriores con los del Registro de captaciones DGA-IGME y el inventario POZOS.</p> <p>TOTAL: los datos de ALBERCA 2010 de los TT.MM que se han considerado incluidos en la MASb y los consultados de la revisión bibliográfica son coherentes.</p>	28-32	Se ha considerado como restricciones medioambientales el 20 % del recurso natural	0.31-0.45

Cuadro síntesis de evaluación de RECURSOS DISPONIBLES, EXTRACCIONES e INDICE DE EXPLOTACIÓN de la MASb 030.022 Tiétar								
Recurso natural subterráneo (recarga media hm ³ /año)	Observaciones (ver apartado B)	Usos o extracciones (hm ³ /año)			Observaciones (ver apartado C)	Recurso natural disponible (Hm ³ /año)	Observaciones (ver apartado 6 de la memoria)	Índice de explotación
		riego	abto.	TOTAL				
150-170	<p>Los valores de SIMPA-2 se consideran sobreestimados (210-260 hm³) debido a que no se distingue entre recarga que alimenta al acuífero en profundidad y escorrentía subsuperficial o hipodérmica, y a que considera como infiltración un porcentaje muy elevado (15 %) de la precipitación.</p> <p>Considerando los valores de la bibliografía (150-200 hm³) se opta por una cifra más baja al descontar una parte como recarga "rechazada" por escorrentía subsuperficial o hipodérmica. Se podría aplicar el método del número de curva para cuantificar este aspecto.</p>	15-20	1-2	16-22	<p>Regadío: La estimación llevada a cabo mediante la hipótesis de trabajo utilizando SigPac es elevada, teniendo en cuenta el uso importante de las aguas superficiales en la MASb (se debería modificar la hipótesis de cálculo de 100 a 200 m de distancia a cauces y/o infraestructuras de riego). Se propone una estimación en base a la superficie obtenida del SigPac y a las dotaciones obtenidas del ALBERCA (uso agrícola)</p> <p>Abto.: Todas las fuentes de información empleadas dan una cifra convergente y muy baja.</p> <p>TOTAL: Se estima un total de utilización basado en el peso del uso para regadío, con las incertidumbres expresadas, aunque los datos de ALBERCA 2010 arrojan unos volúmenes totales en trámite y autorizados de sólo unos 5 hm³.</p>	120-135	Se ha considerado como restricciones medioambientales el 20 % del recurso natural	0.12-0.18

CONSIDERACIONES FINALES

Se adjunta en la tabla 4 la síntesis de la evaluación de los recursos disponibles, extracciones e índice de explotación de las MASb estudiadas. Tanto para la evaluación de recursos subterráneos, como para las extracciones se ha contado con información bibliográfica y con la obtenida del tratamiento de la información disponible (coberturas, bases de datos etc.). En cada apartado específico de cada MASb se ha realizado una valoración de resultados en la que se describen la metodología aplicada, las limitaciones y fiabilidad de los datos empleados.

A continuación se resumen una relación de trabajos que se proponen para mejorar los aspectos relacionados con la evaluación de recursos, extracciones y cuantificación de la relación río-acuífero en las MASb estudiadas:

En la MASb 030.008 La Alcarria:

- Revisión sobre el terreno de las extracciones fundamentalmente en el río Tajuña
- Establecimiento de una red de hidrometría de caudales en distintos puntos de ríos y arroyos.
- Establecimiento de una red hidrométrica en manantiales que permita cuantificar el volumen de descarga de la MASb.
- Se ha contar con un indicador de sequía relacionado con las aguas subterráneas, debido al alto porcentaje que sobre los ríos y arroyos representan las aguas subterráneas, que podría consistir en la toma automática de caudales de descarga de manantiales representativos, en el nacimiento de ríos, como los de Las Fuentes de la Alcarria.

En la MASb 030.015 Talavera:

- Se deberían de llevar a cabo medidas experimentales del coeficiente de infiltración sobre distintos

emplazamientos representativos de los materiales de la MASb lo que aportaría valores distribuidos del mismo para ser utilizados en la cuantificación de recursos.

- Actualización sobre el terreno de extracciones de aguas subterráneas para abastecimientos de grandes urbanizaciones, abastecimientos autónomos e industria.
- Para intentar mejorar el conocimiento de la relación río-acuífero se deberían actualizar los inventarios de vertidos de aguas residuales y de tomas directas en los ríos principales.

En la MASb 030.018 Ocaña:

- Como la información del coeficiente de infiltración es un parámetro clave para la valoración del recurso natural renovable por recarga del agua de lluvia, se propone la realización de medidas experimentales in situ y la aplicación de métodos hidrodinámicos e hidroquímicos para la estimación de la recarga en el páramo.
- Establecer una red hidrométrica de control de las aguas subterráneas para lo cual se pueden emplear las secciones medidas por el IGME desde el año 1981.
- Establecimiento de un indicador de sequía en la MASb a partir de los caudales drenados por el acuífero tras la revisión e inventario de los manantiales existentes en la masa que drenen tanto al arroyo Martín Román como al río Tajo.
- Revisión de las extracciones que se realizan en la MASb, así como de los aprovechamientos mediante tomas directas en el Arroyo Martín Román.

En la MASb 030.022 Tiétar:

- Aplicación del método de estimación del número de curva para distinguir entre el flujo subsuperficial o hipodérmico que da lugar a una escorrentía que alcanza más o menos rápido los cauces super-

MASb	Recurso natural subterráneo (recarga media hm ³ /año)	Usos o extracciones (hm ³ /año)			Recurso natural disponible (hm ³ /año)	Índice de explotación
		riego	abto.	TOTAL		
030.008 La Alcarria	120-140	4	3	7-8	96-112	0.06-0.08
030.015 Talavera	180-200	35-40	15-20	50-60	144-160	0.31-0.42
030.018 Ocaña	35-40	8-10	2-3	10-13	28-32	0.31-0.45
030.022 Tiétar	150-170	15-20	1-2	16-22	120-135	0.12-0.18

Tabla 4. Evaluación de Recursos disponibles, extracciones e índice de explotación.

ficiales y la recarga por infiltración que alimenta al acuífero en profundidad.

- Se debe realizar un estudio claro de los aprovechamientos en esta MASb tanto de regadío como de abastecimientos porque las cifras de volúmenes totales consultadas varían bastante
- Aunque existen numerosas zonas húmedas catalogadas como LICs y ZEPAs (hasta 27) no hay información disponible para la cuantificación de la relación con el acuífero asociado. Se podría realizar un estudio básico de estas zonas húmedas implantando una infraestructura mínima para permitir el control de parámetros como la profundidad del agua en las mismas y niveles de agua subterránea en puntos próximos, para su caracterización hidrogeológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Confederación Hidrográfica del Tajo (1998) Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, de aprobación del Plan Hidrológico del Tajo.
- Confederación Hidrográfica del Tajo (2002) La cuenca del Tajo en cifras. 2º edición. 150 pp.
- Confederación Hidrográfica del Tajo-OPH (2002). Normas para el otorgamiento de autorizaciones de investigación o concesiones de agua subterránea para cada unidad hidrogeológica. Tomo 6. Unidad Hidrogeológica 03.06 La Alcarria.
- Confederación Hidrográfica del Tajo (2005). Informe Resumen de los artículos 5 y 6 de la DMA. En: http://www.chtajo.es/otros/directiva_marco.htm.
- Confederación Hidrográfica del Tajo (2007) Plan especial de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía de la cuenca hidrográfica del Tajo.
- Confederación Hidrográfica del Tajo (2007) Estudio general sobre la demarcación hidrográfica del Tajo. Parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo. (Ver. Julio 2007)
- Confederación Hidrográfica del Tajo (2008). Esquema provisional de temas importantes. Parte española
- DGOH-IGME (1988). Delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características. (código S.I.D: 37036)
- IGME (1981). Síntesis de datos hidrogeológicos y de calidad destinados al Plan hidrogeológico de la cuenca del Tajo. Informe técnico G- 11/81. (Código S.I.D: 35076)
- IGME (1983). Proyecto para estudios de gestión y conservación de acuíferos en las cuencas del Tajo, alto Gadiana, Guadalquivir e Islas Baleares. Informe síntesis de gestión del agua en la cuenca del Tajo para El Plan Hidrológico Nacional. Tomo II (Código S.I.D: 35146)
- IGME (1985). Síntesis hidrogeológica de Castilla-La Mancha.
- IGME-DGA (2009) Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Actividad 2: del Acuerdo para la Encomienda de Gestión por el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General del Agua) al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.
- ITGE (1979). Proyecto de investigación hidrogeológica de la cuenca del Tajo. Informe técnico nº 3. Cuenca del Tajuña. Usos actuales y futuros del agua. (Código S.I.D: 35032).
- ITGE (1980). Proyecto de investigación hidrogeológica de la cuenca del Tajo. Estudio hidrogeológico de La Alcarria. Sistema nº 15. Informe Técnico nº C.A.4. (Código S.I.D: 35047)
- ITGE (1981) P.I.A.S Estudio hidrogeológico de la cuenca del Tajo. (Código S.I.D: 35084)
- ITGE (1983). Estudio hidrogeológico de detalle del páramo de Brihuega. Sistema acuífero nº 15. (Código S.I.D: 35120)
- ITGE (1997). Convenio entre la Consejería de Obras Públicas de Castilla-La Mancha y el ITGE para apoyo a la elaboración de un plan director regional de abastecimiento de agua a poblaciones. 3 V. (Código S.I.D: 37082)
- Kaber Y. (1984) Hidrogeología regional de la cuenca del río Tajuña (provincias de Madrid y Guadalajara). Tesis doctoral.
- Maestro, M.ª T. et al. (1986) Contribución al conocimiento geológico de las calizas de los Páramos. En: Jornadas sobre el karst en Euskadi. Tomo II. Págs.: 275-285.
- Servicio Geológico del MOPU (1990). Unidades hidrogeológicas de la España peninsular e Islas Baleares.
- Villarroya F. y Rebollo L.F (1978). Funcionamiento hidrogeológico del Karst de La Alcarria: la mesa de Chinchón-Villarejo de Salvanés (Madrid). En: Estudios Geológicos n.º 34, 3. Págs.:231-240.

ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS DISPONIBLES PARA CADA MASA DE AGUA
SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA

Luis Martínez Cortina



En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Estimación de los recursos disponibles para cada Masa de Agua Subterránea de la Cuenca Alta del Guadiana, basada en el análisis de los informes y referencias bibliográficas precedentes y en los datos de infraestructura hidrogeológica y conocimiento experto del IGME*, llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

Luis Martínez Cortina
Miguel Mejías Moreno
José María Ruiz Hernández
José Ángel Díaz Muñoz
Raquel Morales García

ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS DISPONIBLES PARA CADA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA

INTRODUCCIÓN

El proceso de planificación hidrológica establecido a partir de la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, plantea la exigencia de determinar los recursos disponibles para cada una de las masas de aguas subterráneas identificadas.

Uno de los objetivos del presente trabajo ha sido esa determinación de los recursos disponibles en las masas de aguas subterráneas de la cuenca alta del río Guadiana (en adelante CAG). Esta cuantificación es una tarea compleja, no sólo por las dificultades e incertidumbres propias de los procesos hidrológicos a cuantificar, sino también por las especiales características y situación de la cuenca, y por la difícil aplicación conceptual de las definiciones oficiales de recursos renovables y disponibles. La CAG se caracteriza hidrológicamente por la significativa interrelación entre las aguas superficiales y las subterráneas. Sus características geológicas y de relieve otorgaban a esta zona semiárida su principal singularidad: la presencia de más de un centenar de humedales, generalmente en zonas deprimidas del terreno, en un conjunto que bajo el nombre de La Mancha Húmeda, y con una superficie máxima de encharcamiento de unos 250 km², fue declarado por la UNESCO, en 1980, Reserva de la Biosfera.

En los años 70 del pasado siglo, la mejora y abaratamiento de las técnicas de perforación de pozos, el gran avance de la ciencia hidrogeológica, y especialmente la invención de la bomba de turbina, ejercieron de motores iniciales de un desarrollo intensivo del regadío con aguas subterráneas, que originó una imparable escalada de las extracciones de agua. Esto trajo consigo, en el contexto de los años 1970s y 1980s, un notable progreso económico y social en la región, impulsado por el sector agrícola como ocupación primordial y con una importante actividad industrial girando en torno a

la agricultura. Junto a estos beneficios, se produjeron cambios muy importantes en la hidrología general de la cuenca. La principal consecuencia negativa de estos cambios fue el grave impacto ecológico sufrido por muchas de las zonas húmedas, situadas principalmente en la Llanura Manchega, en la zona central de la CAG. Hoy día, los caudales en El Vicario, punto de cierre de la CAG, han quedado reducidos a la escorrentía superficial que se produce en episodios meteorológicos muy húmedos, como el que se produjo en 2010.

La singularidad de la zona y de los procesos ocurridos ha motivado que la CAG sea objeto de interés desde muy distintos campos del conocimiento, y lugar de referencia a nivel nacional e internacional por sus implicaciones hidrológicas, medioambientales y socioeconómicas. Asimismo, la CAG ha sido protagonista de un gran número de leyes y otras decisiones administrativas que han intentado, con mayor o menor éxito, racionalizar el aprovechamiento de los recursos hídricos.

En este contexto, la cuantificación de los recursos hídricos subterráneos de la CAG, tanto en lo que se refiere a los almacenados, como a los que se recargan anualmente, o a los que podrían —o deberían— aprovecharse, ha sido tradicionalmente uno de los aspectos más planteados desde el punto de vista del conocimiento hidrogeológico.

El presente trabajo no se limita a una determinación cuantitativa de los recursos disponibles, sino que incide en la importancia de conocer y considerar adecuadamente los conceptos a los que los valores numéricos responden. La determinación de los recursos disponibles no es algo que pueda basarse exclusivamente en criterios hidrológicos, por lo que se ha optado previamente por acercarse de la forma más precisa posible desde un punto de vista hidrogeológico a la cuantificación de los recursos subterráneos, y por realizar un análisis crí-

tico de las definiciones oficiales de recursos renovables y disponibles. Se insiste así en la importancia conceptual de los términos que se están cuantificando y en el conocimiento del comportamiento del sistema, pues se considera que las cifras por sí solas no representan suficientemente el conocimiento del mismo.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

Las estimaciones, consideraciones y conclusiones con respecto a los diferentes aspectos aquí recogidos son fruto de los trabajos y estudios que el IGME viene realizando en la CAG desde principios de los años 1970, de la información bibliográfica disponible procedente de diversos autores, universidades, organismos e instituciones, de la información aportada por la Confederación Hidrográfica del Guadiana, y de la experiencia y conocimiento de la zona por parte de los autores.

En el desarrollo del trabajo se plantea un marco general de la CAG, que resume brevemente algunos aspectos geográficos, climatológicos e hidrogeológicos, una descripción del funcionamiento hidrológico del sistema, y finalmente la cuantificación de los recursos subterráneos de las masas de aguas subterráneas de la CAG.

Descripción general de la zona de estudio

Marco geográfico

La CAG (figura 1) se localiza en la submeseta meridio-

nal castellana, en la zona más oriental de la cuenca hidrográfica del mencionado río. Comprende la cuenca drenada por el río Guadiana hasta la zona ocupada actualmente por el embalse de El Vicario, en las cercanías de Ciudad Real.

Atendiendo a su divisoria de aguas superficiales, ocupa una extensión de unos 18.900 km², de los más de 55.500 km² que componen la demarcación española de la cuenca hidrográfica del río Guadiana. La CAG distribuye su superficie entre las provincias de Ciudad Real (casi el 50%), Cuenca (casi el 25%), Toledo y Albacete, todas ellas pertenecientes a la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha.

Orográficamente se caracteriza por un suave relieve, por lo que la zona central es conocida como Llanura Manchega. En toda esa zona la cota está ligeramente por encima de los 600 m s.n.m., mientras que hacia las zonas de serranía la cota aumenta, hasta alcanzar los 1.200 m s.n.m.

Marco climatológico

La CAG tiene un clima de tipo mediterráneo-continental, marcado por su lejanía al mar y el relativo aislamiento que producen las cadenas montañosas que la circundan.

Los registros de temperatura se caracterizan por marcadas oscilaciones térmicas, con valores que pueden alcanzar hasta -10 °C en invierno y 40 °C en verano.



Figura 1. Mapa de la cuenca alta del río Guadiana, con la división en unidades hidrogeológicas y masas de agua subterránea.

Las temperaturas medias de los meses de enero y julio están en torno a los 5 °C y 25 °C respectivamente. La temperatura media de la región es del orden de 14 °C.

La precipitación media anual se sitúa en torno a los 425 mm/año. Si consideramos su contribución específica a la escorrentía es la más seca entre las cuencas y subcuencas españolas de un tamaño comparable, con una escorrentía total media que apenas alcanza los 30 mm/año.

El reparto de la precipitación es muy desigual, tanto interanualmente como estacionalmente. Hay años con una precipitación media inferior a los 250 mm, mientras que en el extremo opuesto hay años con precipitaciones superiores a los 600 mm. Estadísticamente hay más años con valores inferiores a la precipitación media, pero los años húmedos se desvían más de la media.

Las precipitaciones más importantes suelen tener lugar en los meses de noviembre a enero, con otro máximo relativo en abril y mayo. Para el conjunto de la cuenca puede extrapolarse una precipitación media en abril o noviembre de unos 50–60 mm/mes. Por su parte, los meses más secos son julio y agosto, con valores medios del orden de 5–15 mm/mes. Es bastante frecuente que las lluvias tengan un carácter tormentoso, con fuertes aguaceros de escasa duración localizados geográficamente en una zona relativamente reducida.

La variabilidad espacial de la precipitación a lo largo de la cuenca, en cuanto a valores medios, no es demasiado alta. La mayor parte tiene valores históricos medios entre 400 y 500 mm/año. Es en las zonas más elevadas, en las cabeceras de los ríos, donde se sobrepasan estos valores.

Así, en la zona central (Mancha Occidental I y II), el valor medio anual se sitúa en torno a los 400–425 mm. Hacia la zona occidental (Rus-Valdelobos), y en zonas cercanas al Campo de Montiel, la precipitación media está en torno a los 450 mm/año. A medida que nos alejamos de la Llanura Manchega y aumenta la cota topográfica, lo hace también el valor de la precipitación media histórica. Al norte llegan a alcanzarse valores medios de unos 500 mm/año en la zona de cabecera del río Riansares, y 550–600 mm/año en las cabeceras de Záncara y Gígüela. En Montiel, con una precipitación media de unos 450 mm/año, se superan los 500 mm/año en las zonas más elevadas, como las cabeceras de los ríos Azuer y Cañamares, o en la zona oriental y suroriental.

Marco hidrogeológico administrativo

Desde un punto administrativo, los acuíferos de la CAG han sido clasificados según varias divisiones y denominaciones en los últimos 30 años, atendiendo a diferentes criterios geológicos, hidrogeológicos, o simplemente de gestión hidrológica. Estas divisiones se iniciaron en los años 1970s con la clasificación en sistemas acuíferos establecida por el Programa Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PNIAS), basado principalmente en la cartografía hidrogeológica. En 1988 se adoptó la división en Unidades Hidrogeológicas, definidas con una mezcla de criterios administrativos e hidrogeológicos. Por último, la DMA estableció como unidad de gestión la masa de aguas subterráneas (MASb).

En la tabla 1 puede verse resumida esta evolución de la clasificación hidrogeológica administrativa de los acuíferos de la CAG.

En lo que respecta a la evaluación de los recursos hídricos subterráneos, estas diferentes clasificaciones dificultan el análisis de los estudios históricos existentes, pues las distintas estimaciones no suelen estar referidas a ámbitos territoriales coincidentes.

Funcionamiento hidrológico de la cuenca alta del Guadiana

Comportamiento en régimen natural

El funcionamiento hidrológico de la CAG en régimen natural, está caracterizado por la gran interrelación existente entre las aguas superficiales y las subterráneas.

La zona central del sistema, que en la actualidad comprende principalmente las MASb de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, es conocida como la Llanura Manchega por sus características topográficas, y resulta clave en el funcionamiento de todo el sistema, actuando básicamente como colector del mismo.

Las entradas de agua en dichas masas centrales proceden de la recarga directa de la lluvia, de los flujos laterales de otros acuíferos con niveles piezométricos más altos (más importantes en el caso de Mancha Occidental II), y de la infiltración de los ríos, cuando sus cauces están por encima del nivel piezométrico (Záncara, Guadiana al salir del Campo de Montiel, Azuer). Las salidas en régimen natural se producían por drenaje del acuífero en las zonas de descarga (particularmente importantes

Sistemas acuíferos (S.A. n.º) (1979)	Sup. (km²)	Uds. hidrogeológicas (UH) (1988)	Sup. (km²)	Masas de agua subterránea (MASb) (2006)	Sup. (km²)
S-19 (S.A. n.º 19) Sierra de Altomira	4.370	UH 04.01 Sierra de Altomira	2.706	040.001 Sierra de Altomira	2.575
				040.002 La Obispalía	489
S-20 (S.A. n.º 20) Mancha de Toledo	3.400	UH 04.02 Lillo-Quintanar UH 04.03 Consuegra-Villacañas	1.013 1.202	040.003 Lillo-Quintanar	1.101
				040.004 Consuegra-Villacañas	1.605
S-23 (S.A. n.º 23) Mancha Occidental	5.000	UH 04.04 Mancha Occidental UH 04.05 Ciudad Real	5.126 1.050	040.005 Rus-Valdelobos *	1.716
				040.006 Mancha Occidental II	2.396
				040.007 Mancha Occidental I	2.002
S-24 (S.A. n.º 24) Campo de Montiel	2.700	UH 04.06 Campo de Montiel	2.582	040.010 Campo de Montiel	2.198
	15.470		13.682		16.109

Tabla 1. Evolución de la división administrativa de los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana (sistemas acuíferos, unidades hidrogeológicas, masas de agua subterránea).

* El ámbito geográfico de la masa de aguas subterráneas de Rus-Valdelobos comprende zonas que correspondían a las unidades hidrogeológicas de Sierra de Altomira, Mancha Occidental y Campo de Montiel.

en los Ojos del Guadiana y Tablas de Daimiel), y por evapotranspiración desde las zonas húmedas y las riberas de los ríos. En esta situación natural la circulación del agua subterránea tenía un sentido general hacia el oeste. La figura 2 (García Rodríguez y Llamas, 1992) muestra un perfil longitudinal muy esquemático de la zona central, desde las zonas de descarga en el oeste (Mancha Occidental I) a las áreas de recarga en el este (Rus-Valdelobos). La superficie libre señalada para 1972 puede considerarse representativa de una situación del sistema (respecto a niveles) cercana a la natural.

Las interacciones con las MASb adyacentes, especialmente con las de Sierra de Altomira al norte y Campo de Montiel al sur, son complejas, con conexiones no muy claramente definidas, debido a las complicadas características geométricas, hidrogeológicas y estructurales de las zonas de contacto. Además, en el extremo oriental del sistema, donde se sitúa la MASb Rus-Valdelobos, existe un límite hidrogeológico con la MASb Mancha Oriental (cuenca del Júcar), que cambia ligeramente de posición según las variaciones de los niveles piezométricos.

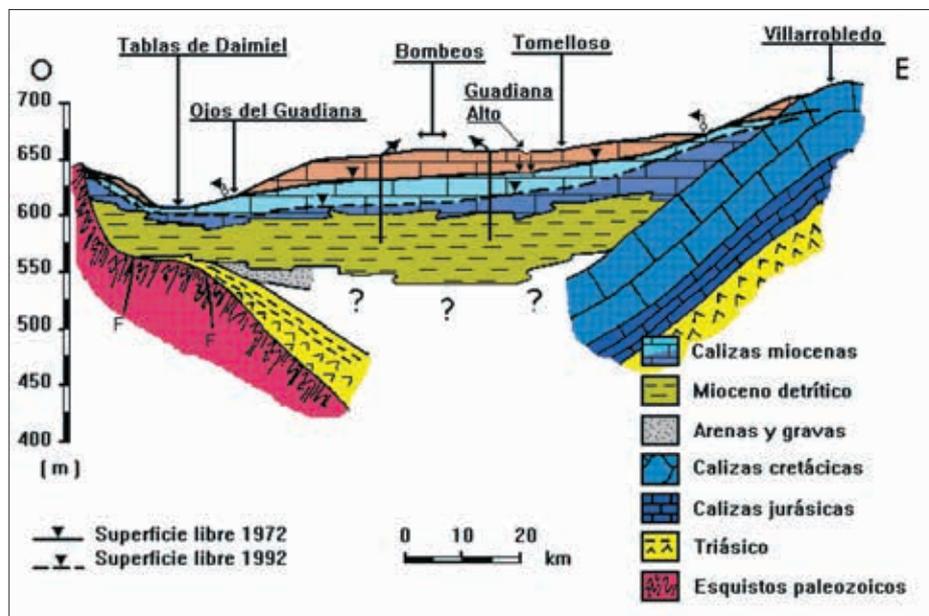


Figura 2. Perfil longitudinal de la Llanura Manchega (García Rodríguez y Llamas, 1992)

Al sur del sistema, la MASb de Campo de Montiel es un acuífero de tipo kárstico, muy fracturado, constituido principalmente por materiales jurásicos. Funciona como un acuífero libre, con un comportamiento del flujo subterráneo muy condicionado por las fracturas existentes y su dirección, mientras que su piezometría se caracteriza por oscilaciones notables relacionadas con episodios de lluvias importantes o secuencias secas. La lluvia constituye su fuente de recarga, mientras que la descarga se produce principalmente a través de manantiales situados principalmente en los bordes oeste y sur de la masa, o bien inmersos dentro de la misma, dando lugar a ríos como el Guadiana Alto, Azuer, Cañamares o Jabalón. La mayor parte del flujo subterráneo se transfiere hacia la Llanura Manchega, bien superficialmente a través de la escorrentía generada en el Guadiana Alto, o bien a través de la transferencia lateral hacia los acuíferos de Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, cuantitativamente importante, como se verá posteriormente en los balances hídricos.

Por lo que respecta a las masas situadas al norte de la Llanura Manchega, la MASb de la Sierra de Altomira se recarga principalmente por la infiltración del agua de lluvia y de la escorrentía superficial, mientras que la descarga natural se produce por drenaje hacia los ríos, a través de manantiales, y por descargas laterales hacia la Llanura Manchega y hacia las masas de Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas. En su parte más septentrional el drenaje tiene lugar hacia el río Gigüela, mientras que en su zona meridional el agua circula hacia los ríos Záncara, Saona y Rus, y hacia las comentadas masas adyacentes. En las MASb de Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas, la recarga se produce por infiltración de la lluvia, y en algunas zonas por infiltración de ríos, especialmente durante el estiaje. El sentido de circulación del agua en los acuíferos triásico y mioceno tiene una clara componente hacia los ríos Riansares y Gigüela. En el acuífero cámbrico la circulación es hacia el norte, con drenaje hacia el río Amarguillo. Otras descargas del sistema se producen por evapotranspiración en zonas encharcadas y por escorrentía subterránea hacia la Llanura Manchega.

La capacidad de autorregulación de los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana

Partiendo de una hipotética situación histórica en la que no se extraía agua de los acuíferos, el sistema en su conjunto (considerada su divisoria hidrogeológica), puede considerarse en una situación *media* de equilibrio, con unas entradas procedentes de la recarga de la lluvia y de la infiltración de los ríos en tramos en que estos son

influentes; y unas salidas equivalentes constituidas por las descargas a ríos y zonas húmedas en las zonas de drenaje del sistema, y por la evapotranspiración desde el propio acuífero, en zonas con el nivel freático cercano a la superficie. Estas descargas contribuían a mantener unos determinados valores de la escorrentía subterránea en el caudal de los ríos y una cierta superficie de zonas húmedas.

En esta situación natural del acuífero, las secuencias húmedas o secas producen ligeros ascensos o descensos de los niveles piezométricos en torno a la posición de equilibrio. Esto se traduce en pequeñas variaciones de las descargas de los acuíferos, y por tanto del caudal circulante por los ríos. El consiguiente aumento o disminución de las áreas inundadas y de descarga, incide a su vez en la existencia de un mayor o menor volumen de evapotranspiración, que viene a compensar en cierta medida el balance del sistema, contribuyendo a mantener los niveles próximos a unos valores medios. Este comportamiento es representativo de la capacidad de autorregulación de los acuíferos de la CAG.

Esta autorregulación se pone también de manifiesto cuando en dichos acuíferos comienza a realizarse un aprovechamiento de las aguas subterráneas. Inicialmente se produce un descenso (en principio pequeño si las extracciones lo son), de los niveles piezométricos, y una disminución de las descargas a los ríos y zonas húmedas, lo que se traduce en un menor caudal circulante por los ríos y una reducción de la superficie de humedales. A su vez, esto conlleva una disminución de la salida por evapotranspiración.

Mientras existe conexión entre los acuíferos y las corrientes superficiales y zonas húmedas, se mantiene este comportamiento autorregulador.

Comportamiento en régimen perturbado

Con la intensa explotación de las aguas subterráneas, producida especialmente en la Llanura Manchega a partir de la década de los 70 del pasado siglo, el funcionamiento del sistema ha sufrido importantes modificaciones. El descenso de los niveles piezométricos (figura 3) ha hecho que en las masas centrales del sistema el acuífero haya quedado descolgado de las corrientes superficiales. A partir de ese momento se rompe el comportamiento autorregulador anteriormente analizado.

Esta desconexión supone la desaparición de la aportación subterránea del acuífero al caudal de los ríos.

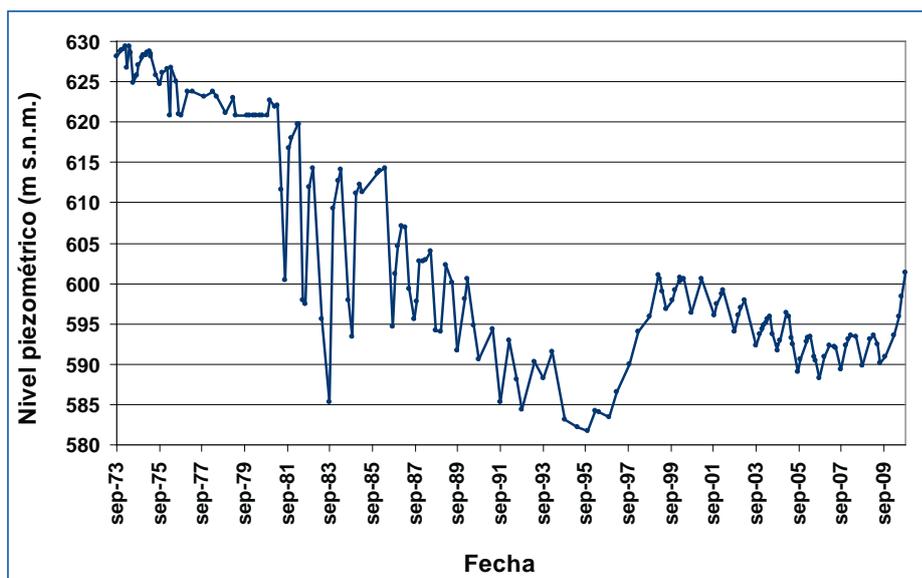


Figura 3. Evolución piezométrica en un punto de control del IGME (1930-40040) cercano a los Ojos del Guadiana (término municipal de Villarrubia de los Ojos).

Así, las áreas húmedas se han reducido drásticamente, y muchas zonas y ríos que antes recibían la descarga del acuífero, han pasado a ser áreas de recarga, donde se produce infiltración. El esquema de flujo se encuentra ahora condicionado en muchos lugares por los descensos de nivel producidos. Por ejemplo, la formación de conos de bombeo en la parte central y occidental de la Llanura Manchega hace que el flujo se dirija desde los contornos del sistema hacia dicha zona central. En esta situación perturbada, que es la que se ha producido en la zona central del sistema (masas de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos) los cauces se limitan a recoger la escorrentía superficial, que con frecuencia se infiltra totalmente en los acuíferos sin llegar al final de la cuenca, al embalse de El Vicario.

Es importante diferenciar este comportamiento de las masas centrales de la CAG con las MASb laterales. Dadas sus características, las masas situadas al norte de las tres anteriores (La Obispalía, Sierra de Altomira, Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas) no han tenido una extracción de aguas subterráneas significativas en comparación con las de la Llanura Manchega, salvo en las zonas más próximas a la misma, y los problemas de alteraciones sobre el régimen natural son más moderados.

En el caso de la MASb del Campo de Montiel, su carácter kárstico y fracturado produce un comportamiento muy condicionado por la pluviometría y caracterizado por notables oscilaciones piezométricas. A su vez, estas oscilaciones condicionan de forma muy estacional la situación de las zonas húmedas de la masa, y en concreto de las Lagunas de Ruidera, un conjunto de lagunas escalonadas que discurren en dirección noroeste

dentro del Campo de Montiel. El acuífero no ha sufrido alteraciones drásticas con respecto a su funcionamiento en régimen natural, como sucedía en las masas centrales de la cuenca. Las importantes oscilaciones de los niveles piezométricos obedecen más en este caso a las secuencias pluviométricas que a las extracciones de agua, que se mantienen en valores moderados. Desde un punto de vista cuantitativo, el descenso generalizado de niveles en las masas de Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, a las que descarga lateralmente el acuífero del Campo de Montiel, ha inducido un cierto incremento de dicha transferencia (IGME, 2008), que se cuantifica de forma aproximada en el apartado de balances hídricos.

LA CUANTIFICACIÓN DE LOS RECURSOS SUBTERRÁNEOS. RESULTADOS OBTENIDOS

La cuantificación de los recursos subterráneos de la CAG ha sido, tradicionalmente, uno de los principales retos en el ámbito del conocimiento hidrológico del sistema.

En los numerosos trabajos desarrollados hasta la fecha sobre la CAG, o sobre alguna zona parcial de la misma, pueden encontrarse diversos intentos de confeccionar balances hídricos o de cuantificar de alguna manera los recursos hídricos subterráneos. Es difícil comparar unos con otros o tratar de realizar una síntesis basada en varios de ellos, debido a los distintos ámbitos geográficos de cada trabajo, y a la diferente forma de plantear los términos y el concepto del balance. Así, términos como *recarga*, *recarga de la lluvia*, *infiltración*, *recarga natural*, *recarga neta*, *recarga eficaz*, *recarga indirecta*, *recursos renova-*

bles, recursos disponibles, escorrentía subterránea, componente base, flujo base, aportación subterránea y otros, son utilizados sin la existencia de un criterio científico común claro, lo que suele inducir a confusión. Tampoco las definiciones oficiales ayudan a clarificar este tema, pues no siempre parecen responder a los conceptos a los que tratan de hacer referencia.

Así, los términos y definiciones establecidos de forma oficial en los instrumentos de Planificación Hidrológica, derivados de definiciones bastante genéricas procedentes de la DMA, no siempre tienen una interpretación hidrogeológica clara. De ahí que, en general, su estimación no se esté haciendo de una forma homogénea y que no siempre esté claro el concepto representado por las cifras obtenidas.

Sin embargo, los balances hídricos que desglosan de forma detallada cada una de las entradas y salidas de agua en las MASb constituyen la mejor herramienta para analizar cuantitativamente los recursos subterráneos del sistema, y para evaluar las repercusiones que las acciones antrópicas tienen en su funcionamiento. En concreto, y desde un punto de vista hidrogeológico, permitirán estimar cómo y en qué cantidad se ven afectados los diferentes términos del balance ante la explotación de los acuíferos.

Estimación de balances hídricos en la cuenca alta del Guadiana

Partiendo de los modelos numéricos realizados durante el proyecto europeo GRAPES, y considerando también otros trabajos desarrollados tanto por el IGME como por otros organismos y fuentes, se han estimado los balances hídricos detallados de cada una de las MASb de la CAG en tres situaciones distintas (tablas 2 y 3).

Los dos primeros balances (columnas de *régimen natural* y de *situación 1950s*) están referidos a situaciones históricas del sistema. La primera correspondería al funcionamiento del sistema en régimen natural, sin extracciones ni ningún otro efecto antrópico ejercido sobre el mismo. La segunda correspondería a la situación de equilibrio alcanzada por el sistema después de una extracción mantenida en el tiempo de unos 60 Mm³/año, que puede considerarse representativa de los años 50 del pasado siglo, anterior al gran desarrollo del regadío con aguas subterráneas. Por último, la tercera situación estimada sería representativa aproximadamente de la situación actual.

Resulta muy interesante comparar los balances hídricos en las dos primeras situaciones históricas. Esa comparación nos permite estimar la repercusión de ese primer escalón de extracciones en la disminución de las descargas a los ríos y en el descenso de la evapotranspiración, relacionado a su vez de forma bastante directa con la disminución de la superficie de las zonas húmedas.

Estos cambios se producen de forma apreciable únicamente en las masas centrales de la cuenca, en las que se concentraban prácticamente todas las extracciones. Por eso, las situaciones en régimen natural y en los años 1950s se desglosan solamente en esas masas, que son las consideradas en la tabla 3.

Sobre estos balances hay que puntualizar que consideran la teórica división hidrogeológica, que como se indicó anteriormente no es fija, y por tanto no consideran posibles transferencias laterales con otras cuencas. Si consideramos las divisorias de cuencas existirían intercambios principalmente desde el Tajo y hacia el Júcar. Sería en este caso necesaria la mejora del conocimiento para acotar la incertidumbre existente, aunque en base a diversas estimaciones no parece que este intercambio pueda tener una incidencia significativa en los balances. Por su parte, la tabla 4 representa el balance hídrico del conjunto cerrado de toda la CAG, en el que las transferencias laterales entre masas quedan lógicamente anuladas entre sí.

En este balance total puede verse que la aportación de los acuíferos a la escorrentía al final de la cuenca (El Vicario) en régimen natural, venía dada principalmente por las descargas procedentes del Gigüela, del Záncara, y del tramo Ojos del Guadiana-Tablas de Daimiel, cercanas cada una de ellas a los 100 Mm³/año. En régimen natural, esta escorrentía subterránea suponía aproximadamente el 70 % de la aportación al flujo total, lo que da una idea de la gran importancia que las aguas subterráneas tienen en el funcionamiento de la cuenca. En años secos esta importancia relativa de la componente subterránea aumentaba aún más.

Como puede verse en los balances de la situación actual, la aportación del tramo Ojos del Guadiana-Tablas de Daimiel ha desaparecido totalmente, mientras que las correspondientes a los ríos Záncara y Gigüela han quedado reducidas a algunos tramos de las masas situadas al norte de la Llanura Manchega. Como además la zona central de la cuenca es en esta situación área de infiltración en su totalidad, los caudales en El Vicario

MASA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (MASB)	LA OBISPALÍA				SIERRA ALTOMIRA				LILLO-QUINTANAR				CONSUEGRA-VILLAC.				CAMPO DE MONTIEL				
	RN/50s		ACT.		RN/50s		ACT.		RN/50s		ACT.		RN/50s		ACT.		RN/50s		ACT.		
	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	
Términos del balance hídrico																					
Recarga lluvia	15	-	15	-	80	-	80	-	80	-	28	-	28	-	35	-	35	-	132	-	132
Evapotranspiración	-	-	-	-	-	10	-	10	-	7	-	7	-	2	-	2	-	23	-	23	-
Acuífero→Río (Záncara)	-	6	-	6	-	24	-	24	-	17	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero→Río (Gigüela)	-	7	-	7	-	15	-	15	-	9	-	9	-	8	-	8	-	7	-	7	-
Acuífero→Río (Riansares)	-	-	-	-	-	8	-	8	-	5	-	5	-	16	-	16	-	-	-	-	-
Acuífero→Río (Saona)	-	-	-	-	-	3	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero→Río (Amarguillo)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	5	2	1	-	-	-	-
Acuífero→Río (Córcoles)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	3	2	2
Acuífero→Río (Guadiana Alto)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	53	4	46
Acuífero→Río (Azuer + Cañamares)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	14
Transferencia lateral (La Obispalía)	-	-	-	-	2	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Transferencia lateral (Altomira)	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	3	-	3	-	1	-	1	-	-	-	-
Transferencia lateral (Lillo-Quintanar)	-	-	-	-	-	3	-	3	-	3	-	3	-	-	-	-	-	2	-	-	-
Transfer. lateral (Consuegra-Villacañas)	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-	1	-	3	-	3	-	-	-	-	-
Transfer. lateral (Mancha Occidental I)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-
Transfer. lateral (Mancha Occidental II)	-	-	-	-	-	15	-	15	-	17	-	17	-	-	-	-	-	-	-	37	-
Transferencia lateral (Rus-Valdelobos)	-	-	-	-	-	3	-	3	-	3	-	3	-	-	-	-	-	-	5	-	7
Extracciones (descontados retornos)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	20	-	-	-	-	-	22	-	-	8
TOTAL	15	15	15	15	82	82	82	82	82	82	35	35	31	31	44	44	48	137	137	138	138

Tabla 2. Balance hídrico en régimen natural y en la situación actual, correspondiente a las MASb de La Obispalía, Sierra de Altomira, Lillo-Quintanar, Consuegra-Villacañas y Campo de Montiel.

MASA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (MASB)	MANCHA OCCIDENTAL I						MANCHA OCCIDENTAL II						RUS-VALDELOBOS						
	RN		1950s		Actual		RN		1950s		Actual		RN		1950s		Actual		
	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	
Recarga lluvia	70	-	70	-	70	-	108	-	108	-	108	-	108	-	32	-	32	-	-
Evapotranspiración	-	57	-	54	-	-	-	53	-	46	-	-	-	18	-	16	-	-	-
Acuífero → Río (Záncara)	-	10	-	7	-	-	5	57	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Gigüela)	9	64	7	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Rus)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3	1	2	1	-
Acuífero → Río (de Ojos G. a Tablas D.)	-	94	-	81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Guadiana, tras Tablas D.)	-	5	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Azuer, tras Vallehermoso)	16	1	19	1	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Córcoles)	-	-	-	-	-	-	2	13	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Guadiana, tras Montiel)	-	-	-	-	-	-	72	2	70	2	56	-	-	-	-	-	-	-	-
Transferencia lateral (Altomira)	-	-	-	-	-	-	15	-	15	-	17	-	3	-	3	-	3	-	-
Transfer. lateral (Consuegra-Villacañas)	2	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Transfer. lateral (Mancha Occidental I)	-	-	-	-	-	-	-	134	-	130	-	66	-	-	-	-	-	-	-
Transfer. lateral (Mancha Occidental II)	134	-	130	-	66	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	19	-	12	-
Transferencia lateral (Rus-Valdelobos)	-	-	-	-	-	-	20	-	19	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-
Transferencia lateral (Campo de Montiel)	-	-	-	-	-	-	37	-	37	-	43	-	5	-	5	-	7	-	-
Extracciones (descontados retornos)	-	-	-	26	-	147	-	-	-	30	-	170	-	-	-	4	-	-	31
TOTAL	231	231	228	228	147	147	259	259	256	256	236	236	41	41	41	41	43	43	43

Tabla 3. Balance hídrico en régimen natural, en los años 1950s y en la situación actual, correspondiente a las MASb de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos.

Tabla 4. Balance hídrico del conjunto de masas de la cuenca alta del Guadiana, en régimen natural, en los años 1950s y en la situación actual.

	Régim. natural		Situación 50s		Situación actual	
	ENT.	SAL.	ENT.	SAL.	ENT.	SAL.
Recarga lluvia	500	–	500	–	500	–
Evapotranspiración	–	195	–	183	–	50
Acuífero → Río (Riansares)	2	28	2	28	–	21
Acuífero → Río (Gigüela)	16	100	14	91	7	24
Acuífero → Río (Rus)	1	3	1	2	1	–
Acuífero → Río (Saona)	–	3	–	3	–	–
Acuífero → Río (Záncara)	5	97	5	78	–	23
Acuífero → Río (Amarguillo)	1	5	1	5	2	1
Acuífero → Río (Córcoles)	4	16	4	10	2	2
Acuíf. → Río (Guadiana Alto, en Montiel)	3	53	3	53	4	46
Acuífero → Río (Guadiana, tras Montiel)	72	2	70	2	56	–
Acuífero → Río (de Ojos G. a Tablas D.)	–	94	–	81	–	–
Acuífero → Río (Guadiana, tras Tablas D.)	–	5	–	4	–	–
Ac. → Río (Azuer + Cañam., en Montiel)	–	18	–	18	–	14
Acuíf. → Río (Azuer, tras Vallehermoso)	16	1	19	1	9	–
Extracciones (descontados retornos)	–	–	–	60	–	400
TOTAL	620	620	619	619	581	581

están hoy día prácticamente reducidos a la escorrentía superficial en periodos de importantes lluvias.

Los balances deben ser interpretados con mucha cautela y sin perder de vista la realidad conceptual que representan. No hay que olvidar que tratan de representar situaciones medias no reales. Desde el punto de vista cuantitativo aportan valores que por si solos no definen adecuadamente el comportamiento verdadero. Por ejemplo, en las relaciones acuífero-río, simplifican mediante un único *valor medio* relaciones que en muchas zonas de la cuenca cambian el comportamiento relativo (río ganador o perdedor), según la secuencia meteorológica o la época del año.

Las incertidumbres en cuanto a su aproximación a la realidad son aún mayores en el caso del tercer balance, que trata de representar la situación actual del sistema. Su estado profundamente perturbado hace aún más difícil hablar de valores medios. Siguiendo la filosofía comparativa de los dos estados anteriores se ha pretendido representar el punto de equilibrio (entendido como balances y niveles piezométricos constantes, y por tanto sin variación en el almacenamiento, equilibrando entradas y salidas) que alcanzaría el sistema si se mantuvieran en el tiempo las acciones actuales sobre el mismo (considerando unas extracciones totales en la CAG

de unos 400 Mm³/año). No es una situación, por tanto, que represente a un momento concreto del sistema, pero aporta una aproximación teórica a la cuantificación actual de los balances hídricos.

La estimación de recursos renovables en la cuenca alta del Guadiana

A partir de los balances hídricos estimados anteriormente sería sencillo determinar los recursos renovables de cada MASb, siempre y cuando el concepto que se pretende transmitir con ese término estuviera claramente establecido.

Sin embargo, tanto la definición que parece esbozar la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) (contenida dentro de la definición de recursos disponibles), como el concepto que parece derivarse etimológicamente del término, no parecen ser interpretables de una forma clara y única. La IPH señala que “El recurso disponible se obtendrá como diferencia entre los recursos renovables (recarga por la infiltración de la lluvia, recarga por retorno de regadío, pérdidas en el cauce y transferencias desde otras MASb) y los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos y para prevenir los efectos negativos causados por la intrusión marina”. La IPH parece así asimilar los

recursos renovables al conjunto de todas las entradas que recibe la MASb. Debido a esta falta de claridad en conceptos y definiciones, van a analizarse tres interpretaciones diferentes del término, que en cualquier caso pondrán en evidencia la relativa representatividad del valor estimado.

Para ello se va a considerar como ejemplo la MASb del Campo de Montiel en régimen natural. Su balance hídrico (agrupando las infiltraciones y drenajes de los diferentes ríos), sería el indicado en la tabla 5.

ENTRADAS (Mm ³ /año)		SALIDAS (Mm ³ /año)	
Recarga lluvia	132	Drenaje acuífero	74
Infiltración ríos	5	Evapotranspiración	21
		Salidas laterales	42
TOTAL ENTRADAS	137	TOTAL SALIDAS	137

Tabla 5. Balance hídrico de la masa de agua subterránea del Campo de Montiel, en régimen natural.

— *Interpretación 1*: Sería la que parece derivarse de la lectura de la IPH, y que en las tablas de balances hídricos del apartado anterior correspondería con el *Total* de las columnas de entradas. Así, el recurso renovable entendido como el total de las entradas sería de 137 Mm³/año.

Hay que hacer aquí la consideración de que los retornos, principalmente del regadío, se han englobado en los balances hídricos dentro del término de salida por bombeos, descontándolos de los mismos. La IPH los considera parte de los recursos renovables, por lo que estrictamente habría que incrementar las extracciones en una cierta cantidad y considerar ese mismo incremento como entrada por retornos. Existe mucha incertidumbre al respecto, pero los retornos podrían estimarse en un 10% de la cifra de extracciones.

— *Interpretación 2*: Otra posible interpretación sobre la estimación de los recursos renovables consistiría en detraer de la cifra de entradas totales, las salidas por evapotranspiración y las salidas laterales a otras masas (o al mar cuando fuera el caso). De esta forma, el recurso renovable se asimilaría a la descarga del acuífero en manantiales y a las corrientes superficiales en tramos de ríos ganadores, lo que supondría la aportación del acuífero a la escorrentía (escorrentía subterránea). La cifra de recursos renovables sería en este caso de 74 Mm³/año.

— *Interpretación 3*: Una tercera posibilidad de interpretar los recursos renovables vendría dada por la diferencia entre la recarga procedente de la lluvia y la evapotranspiración a la atmósfera. En cierto modo, y especialmente si lo consideramos para una cuenca o subcuenca cerrada en su conjunto, es el valor que más se puede identificar etimológicamente con el concepto de recurso subterráneo renovable. Representaría, por así decirlo, el recurso neto que se renueva en la relación con la atmósfera. La infiltración de los ríos, las descargas del acuífero, o las entradas y salidas laterales constituyen procesos hidrológicos en los que el recurso procede previamente de la escorrentía superficial, de la propia recarga del acuífero, de las descargas del mismo, etc. En el caso de la CAG estos procesos son, además, especialmente relevantes, siendo habitual que lo que se drena del acuífero en una masa se infiltre en otra, y vuelva a descargarse en superficie aguas abajo.

Sin embargo, y desde un punto de vista del recurso hídrico subterráneo, ese balance neto entre la recarga de la lluvia y la evapotranspiración que se va a la atmósfera, sí que constituye *el nuevo agua* generada, que actúa de *motor* contribuyendo a desencadenar el resto de procesos que tienen lugar en el acuífero.

En valores medios a largo plazo, y con ligeras matizaciones, la recarga media procedente de la lluvia puede considerarse constante, pues no se considera en este trabajo el posible efecto del cambio climático. A este respecto, la incertidumbre con respecto a los escenarios futuros es muy alta, especialmente en la CAG, que por sus características concentra las recargas importantes en años muy húmedos. Así, una previsible distribución más extrema de la pluviometría puede incrementar los valores de dichas puntas de recarga, compensando en cierta medida la disminución de las precipitaciones. En todo caso hay que señalar que la IPH considera para la Demarcación del Guadiana una disminución con respecto a la aportación natural del 11%, para incorporar el efecto del cambio climático. Por su parte la evapotranspiración varía en función de la situación del sistema y supone en términos del balance una pérdida del recurso generado hacia la atmósfera, si bien, especialmente en cuencas como la CAG es un indicador de la buena salud hidrológica de las zonas húmedas. Como se decía anteriormente esta diferencia entre recarga de la lluvia y evapotranspiración tiene aún mayor sentido de renovabilidad si consideramos la cuenca en su conjunto.

En este tercer caso, los recursos renovables de la masa del Campo de Montiel en régimen natural serían de $132-21 = 111 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

La utilidad conceptual de los recursos renovables, en cualquiera de las formas anteriormente definidas es muy relativa y limitada. Estas cuantificaciones que reducen los elementos del balance a un valor numérico aislado no representan cuantitativamente la evolución del comportamiento del flujo subterráneo. Pueden resultar interesantes y descriptivos en algunos casos, pero tienen el peligro de reducir a un solo número procesos más complejos. Además pueden inducir a ciertos errores de interpretación, cuando se utilizan estos valores con determinados fines, sin considerar de forma adecuada el comportamiento del sistema y lo que representan conceptualmente.

En cualquier caso, si se interpretan los recursos renovables como el conjunto de todas las entradas a las masas, en la forma que parece desprenderse de la IPH (*Interpretación 1*), los valores en régimen natural para cada una de las MASb de la CAG, serían, a tenor de las tablas de balances hídricos anteriores, y hecha la salvedad de los retornos, los indicados en la tabla 6.

Masas de agua subterránea (MASb)	Recurso renovable ($\text{Mm}^3/\text{año}$)
Sierra de Altomira	82
La Obispalía	15
Lillo-Quintanar	35
Consuegra-Villacañas	44
Mancha Occidental I	231
Mancha Occidental II	259
Rus-Valdelobos	41
Campo de Montiel	137

Tabla 6. Estimación de recursos subterráneos renovables, en régimen natural, para las masas de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana (No sumables para la cuenca en conjunto).

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas anteriormente, parece aconsejable insistir en el escaso significado que las cifras por sí solas tienen si no se considera adecuadamente lo que las mismas representan y el funcionamiento conjunto de todo el sistema. Uno de los errores detectado a menudo, y especialmente cuando se consideran trabajos aislados de algunos de los acuíferos, unidades hidrogeológicas o masas del sistema, es asimilar la suma de los recursos anteriores a una especie de recursos conjuntos de toda la cuenca. Es evidente

que los recursos renovables de las cifras anteriores, considerados como las entradas en cada masa (*Interpretación 1*), están contabilizados varias veces en distintas masas (por ejemplo, parte de lo que entra como recarga de la lluvia en el Campo de Montiel es transferido lateralmente a Mancha Occidental II, y contabilizado como recurso renovable en ambas masas). Los reiterados procesos de descargas e infiltraciones del flujo subterráneo que tienen lugar en la CAG condicionan también estas cifras.

Si en lugar de considerar de forma independiente cada masa, consideramos el conjunto de toda la CAG, y aplicamos sobre él la definición oficial de recursos renovables entendida como en el cálculo anterior (*Interpretación 1*), puede verse que el recurso renovable en situación natural sería de $620 \text{ Mm}^3/\text{año}$, y aún así habría que hacer las mismas consideraciones con respecto a la contabilización de recursos.

Desde este punto de vista del conjunto de la cuenca, resulta particularmente interesante analizar el balance “recarga de la lluvia menos evapotranspiración” (*Interpretación 3*), de acuerdo con lo comentado en este apartado. Puede verse que ese valor, para el conjunto de la CAG, era de unos $305 \text{ Mm}^3/\text{año}$ en régimen natural, y está en torno a los $450 \text{ Mm}^3/\text{año}$ en la situación actual.

La estimación de recursos disponibles en la CAG

La aplicación de la definición oficial de recursos disponibles de la IPH en la CAG, está condicionada por la situación de los acuíferos centrales de la cuenca. Según dicha definición, a los recursos renovables habría que restarles los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos. Pero dichos flujos sólo pueden existir en la zona central de la CAG si se vuelve a producir la conexión entre acuíferos y corrientes superficiales. Obviamente, esto se produciría de forma más rápida cuanto menores sean las extracciones, y por tanto cuanto más próximos a 0 estén los recursos disponibles.

En situaciones como ésta, el cálculo de los recursos disponibles a través de la definición no parece viable sin considerar otros factores y condicionantes en la toma de decisiones. Parece así adecuado recomendar unos valores para los recursos disponibles que tengan en cuenta la situación y el conocimiento general existente, y sin perder de vista el funcionamiento de los procesos hidrológicos anteriormente descritos y el objetivo último

de recuperación hidrológica y medioambiental del sistema hídrico de la CAG.

Con estas consideraciones, la recomendación consistiría en establecer los recursos disponibles en dos fases. En una primera fase, y partiendo de la situación actual, el recurso total disponible en el conjunto de la CAG se establecería en unos 275 Mm³/año. Con esta cifra total de extracciones se producirían (como valor medio, a medio plazo) ascensos de 1 metro anual en los niveles piezométricos de las zonas en las que los descensos han sido mayores. Un reparto adecuado de estos recursos disponibles podría ser el mostrado en la tabla 7.

Masas de agua subterránea (MASb)	Recurso disponible (Mm ³ /año)
Sierra de Altomira	20
Lillo-Quintanar	2
Consuegra-Villacañas	15
Mancha Occidental I	95
Mancha Occidental II	110
Rus-Valdelobos	25
Campo de Montiel	8

Tabla 7. Recomendación de recursos subterráneos disponibles para las masas de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana.

Sobre estas cifras podrían hacerse matices que incrementarían los recursos disponibles en algunas de las masas laterales en zonas que tuvieran escasa repercusión para la zona central de la cuenca (norte de Altomira, Lillo-Quintanar, La Obispalía). Por otra parte, para la masa del Campo de Montiel, de muy distinto funcionamiento como se ha explicado, se ha considerado un valor cercano al utilizado realmente en los últimos años, aunque dicho valor del recurso disponible podría incrementarse en secuencias húmedas, prestando especial atención a la ubicación de las extracciones.

Con esta cuantificación de recursos disponibles se produciría una recuperación importante de niveles piezométricos, pero sería necesaria una segunda fase aún más restrictiva en cuanto a recursos disponibles, para poder recuperar la conexión del acuífero con corrientes superficiales y zonas húmedas, al menos de una forma estacional, en secuencias húmedas. Ese valor podría estar, en principio, en torno a los 150 Mm³/año para el conjunto de la cuenca, y con los mismos matices de posibilidad de ciertos incrementos en las masas laterales.

CONSIDERACIONES FINALES

Como intento de acercarse de la forma más precisa posible, desde un punto de vista hidrogeológico, a la cuantificación de los recursos subterráneos de las MASb, se ha estimado el balance hídrico para cada una de ellas (considerando todas las entradas y salidas) en tres situaciones diferentes del sistema: en régimen natural, supuesto que no se ejerce ninguna acción antrópica sobre el sistema; en la situación poco influenciada que representaría la moderada extracción *histórica* realizada con norias hasta finales de los años 1950s; y por último en la situación actual, o más exactamente, en el punto de equilibrio que se alcanzaría manteniendo aproximadamente las extracciones actuales y su distribución, que representa una situación profundamente perturbada del sistema respecto a las dos anteriores.

Con respecto a la cuantificación de recursos subterráneos renovables y disponibles en los términos definidos en los documentos oficiales de Planificación Hidrológica, se han realizado una serie de consideraciones al respecto de dichas definiciones y de la dificultad de su aplicación. En este sentido parece necesaria una mayor claridad en la definición de los recursos renovables, y en cualquier caso, se debe tener en cuenta el sentido conceptual de la cifra obtenida en relación a la definición que se considere.

En lo que respecta a los recursos disponibles también se han señalado limitaciones importantes en su aplicación con criterios hidrogeológicos. Su determinación difícilmente puede establecerse sin considerar factores con pesos importantes en la toma de decisiones: sociales, económicos, políticos, legales, etc. En todo caso, se propone que la estimación de los recursos subterráneos disponibles parta de un conocimiento hidrogeológico cualitativo, que considere adecuadamente los procesos hidrológicos que tienen lugar en un sistema y su evolución; y cuantitativo, representado por balances hídricos detallados y su evolución. Sólo en este marco puede darse sentido a términos que traten de cuantificar los recursos mediante valores aislados.

Con estas consideraciones, y con las matizaciones que se han hecho a lo largo del texto, se ha realizado una recomendación sobre los recursos disponibles, que a grandes rasgos pasa por establecer una primera fase con unos recursos disponibles del orden de 275 Mm³/año para el conjunto de MASb de la CAG, y con una cierta distribución de los mismos. Esto llevaría a una notable recuperación de los niveles piezométricos, que

tendría un límite aunque estas cifras de aprovechamiento del recurso se mantuvieran en el tiempo.

Es importante tener claro desde el principio que para la recuperación hidrológica y medioambiental definitiva del sistema, la cifra final de extracciones mantenidas en el futuro tendrá que ser aún bastante más restrictiva. Como referencias, por debajo de 200 Mm³/año se produciría previsiblemente la aportación del acuífero en algunas zonas de descarga, al menos estacionalmente en secuencias húmedas; mientras que haría falta llegar hasta unos 60 Mm³/año para mantener la situación de los años 50 del pasado siglo. En el rango comprendido entre esas cifras irían aumentando paulatinamente los caudales de descarga, las épocas en las que los ríos se comportarían como ganadores, y la superficie de las zonas húmedas. Sin embargo, si las extracciones se mantienen en los niveles inicialmente mencionados de 275 Mm³/año, el esfuerzo será inútil desde el punto de vista de recuperación de zonas húmedas, porque para los efectos de funcionamiento de las mismas es indiferente que el nivel piezométrico esté a 15 metros que a 40 metros.

El comportamiento y evolución del sistema, en esa primera fase de reducción real de las extracciones, está claramente definido, dentro de los márgenes de incertidumbre propios de cualquier proceso hidrológico. El periodo de transición hacia esa segunda fase más ambiciosa, permitiría analizar la evolución real del sistema dentro de las particularidades del escenario que se vaya desarrollando, comprobando el cumplimiento de las tendencias esperadas. A su vez, esto permitirá acotar algunas de las incertidumbres existentes, relacionadas, por ejemplo, con la incidencia de posibles cambios relativos en la distribución geográfica de las extracciones, aumento relativo de las extracciones procedentes del

acuífero profundo, repercusión de un posible incremento de las extracciones en las zonas periféricas del sistema, mayor precisión en determinar la relación final entre las extracciones mantenidas y la recuperación alcanzada, incidencia del cambio climático, etc. De esta manera, en la segunda fase podrían tomarse decisiones más ajustadas a las necesidades del sistema.

Es evidente que si las extracciones se reducen desde el principio aún más de las cifras indicadas, o antes se consigue pasar a esa segunda fase más restrictiva, más cerca se estará de la recuperación hídrica y medioambiental del sistema. En cualquier caso, parece *hidrológicamente justo* que en la valoración de los recursos disponibles en esta primera fase de recuperación se tenga en cuenta el incremento que ha habido en la *disponibilidad* de agua no evapotranspirada a la atmósfera como consecuencia de la situación perturbada en la que se encuentra el sistema, permitiendo que ese incremento, estimado en unos 125-150 Mm³/año, se destine precisamente a la recuperación del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- García Rodríguez, M. y Llamas, M. R. (1992). Aspectos hidrogeológicos en relación con la génesis y combustión espontánea de las turbas de los Ojos del Guadina. *Actas del III Congreso Geológico de España*. Salamanca, 23-26 junio, tomo 2: 285-293.
- IGME (2008), *Marco hidrológico del Campo de Montiel en el contexto de un modelo de gestión participativa de una masa de aguas subterráneas*. Convenio de colaboración entre el IGME y la Conferderación Hidrográfica del Guadiana. Instituto Geológico y Minero de España, 40 pp.

PROPUESTA DE ZONIFICACIÓN, BASADA EN CRITERIOS GEOLÓGICOS E
HIDROGEOLÓGICOS, DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADIANA

María Elena Galindo Rodríguez



En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Propuesta de zonificación, basada en criterios geológicos e hidrogeológicos, de la Cuenca Alta del río Guadiana*, llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

María Elena Galindo Rodríguez
Luis Martínez Cortina
Miguel Mejías Moreno

Colaboración:

Empresa IDRENA para realización de trabajos auxiliares

PROPUESTA DE ZONIFICACIÓN, BASADA EN CRITERIOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS, DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADIANA

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio es realizar una subdivisión en aquellas masas de agua subterránea del Alto Guadiana, que puedan presentar zonas con comportamientos hidrogeológicos diferenciados. Ante la ausencia de metodologías previas para este tipo de trabajo, se procedió a crear una, que permitiera definir y delimitar posibles áreas aisladas hidrodinámicamente.

Las masas de agua subterránea (MASb) objeto de estudio son: 040.001 Sierra de Altomira, 040.002 La Obispalía, 040.003 Lillo-Quintanar, 040.004 Consuegra-Villacañas, 040.005 Rus-Valdelobos, 040.006 Mancha Occidental II, 040.007 Mancha Occidental I y 040.010 Campo de Montiel.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada se ha basado en el estableci-

miento y definición de criterios geológicos e hidrogeológicos que permitan caracterizar y determinar posibles límites hidrogeológicos dentro de las distintas MASb. Estos límites precisarán de estudios posteriores capaces de determinar la desconexión hidráulica entre las subzonas propuestas.

Como producto final, consecuencia de esta metodología, se elaboró un mapa con las distintas subzonas establecidas y sus límites, así como unas tablas con los criterios utilizados para la delimitación de cada subzona. En la figura 1 se esquematizan las distintas subzonas resultantes.

Para la realización de esta propuesta de zonificación dentro de cada MASb se utilizó como mapa base, el mapa geológico de la zona (figura 2). La identificación y delimitación de estos límites, se han establecido en base a la presencia de una serie de factores geológicos que pudieran determinar cierta posibilidad de cierre.

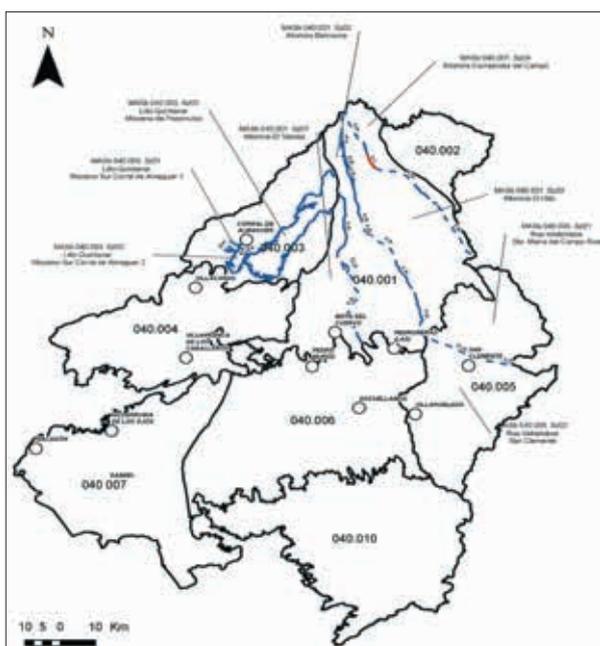


Figura 1. Delimitación de posibles subzonas

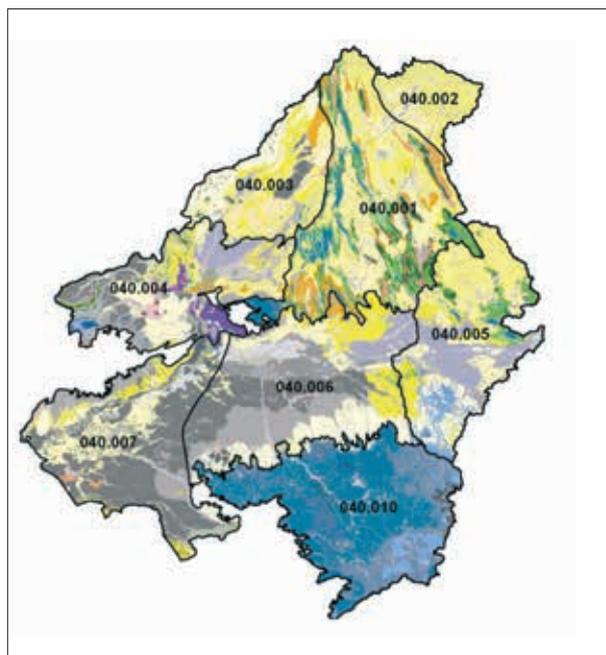


Figura 2. Mapa base

Para ello, se ha dotado de un peso, o grado de fiabilidad de cierre, a cada uno de los factores geológicos observados en los distintos cortes geológicos consultado en las hojas MAGNAS 1:50.000. Como apoyo a éstos, además, se han tenido en cuenta una serie de criterios hidrogeológicos, (parámetros hidráulicos, presencia de manantiales, confinamiento, etc.), con el fin de ratificar la fiabilidad de los cierres establecidos.

A cada uno de los límites de las distintas subzonas definidas, se le ha asignado un código de color en función de la fiabilidad de cierre, indicándose mediante iniciales el factor geológico e hidrogeológico detectado. Dicho límite se realizará con trazo continuo cuando se establezca a partir de información constatada y en trazo discontinuo cuando el límite definido es supuesto. En aquellos casos en que se observa la presencia de confinamiento en el acuífero, se indicará con un trazado alternante de rayas y puntos.

Respecto al código de color definido según el grado de fiabilidad, se ha asignado el rojo para valores muy altos de fiabilidad de cierre, el verde para valores altos y el azul para valores medios. De esta forma, si se observa un cabalgamiento que pone en contacto materiales permeables, se representará con un trazado en color azul y con las iniciales c.p.

Todos los criterios de cierre valorados en cada una de MASb en las que se ha propuesto la mencionada zo-

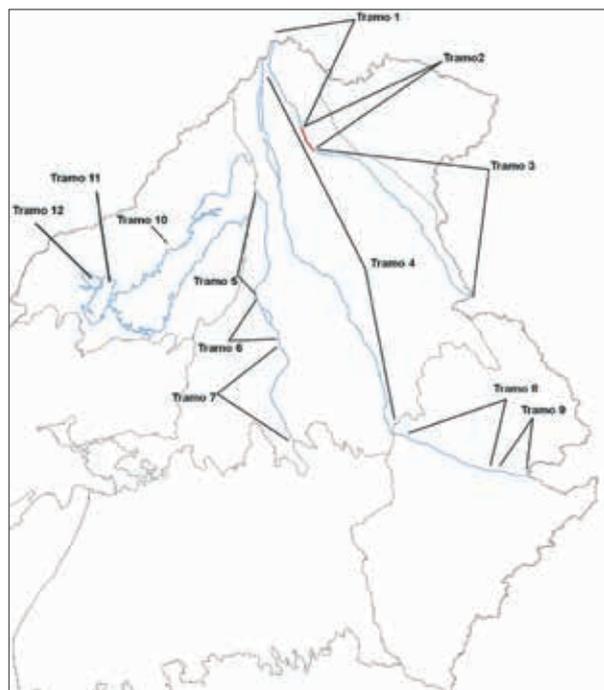


Figura 3. División de los límites en tramos.

nificación y la ponderación de su fiabilidad, se han descrito en unas tablas definidas para cada una de las subzonas, indicando la presencia o ausencia de los factores geológicos e hidrogeológicos y su efectividad de cierre. También se presenta una columna de referencia de la información, en la que se indica la fuente bibliográfica donde consultar los criterios observados. (tabla 1)

Igualmente, para facilitar la identificación en el mapa del factor detectado en cada cierre, se han subdividido los cierres en tramos (figura 3) indicando mediante las iniciales, los criterios de cierre observados en cada uno.

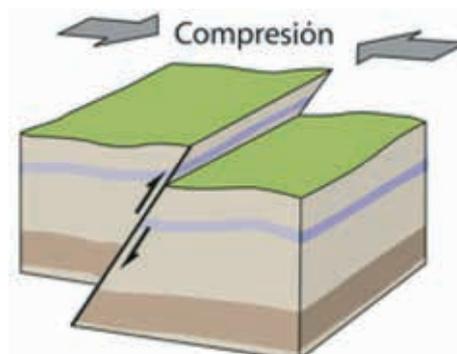
CRITERIOS DE CIERRE

Los criterios de cierre están constituidos por los siguientes factores geológicos:

Fiabilidad de cierre MUY ALTA

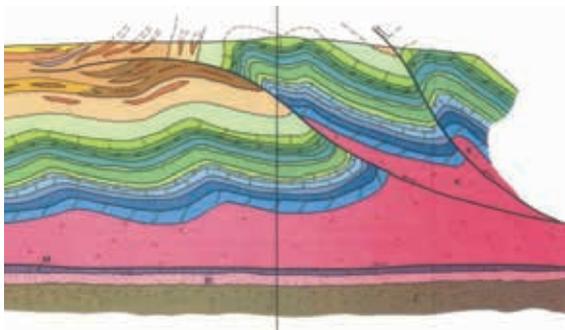
Está constituida por:

- *Diapiros salinos sin karstificación (d.s)*. Son estructuras geológicas intrusivas, formadas por masas de evaporitas (en muchos casos acompañadas de arcillas) que proceden de niveles estratigráficos muy plásticos sometidos a gran presión, que ascienden por las capas sedimentarias de la corteza terrestre, atravesándolas y deformándolas. Adquieren forma de cilindro, seta o gota y suelen ser de gran tamaño. Implican un límite al flujo de las aguas subterráneas (barrera hidrogeológica), por lo que se les confiere una fiabilidad de cierre elevada. Su nomenclatura en el mapa, si aparece, es d.s.
- *Estructuras compresivas (c.i. y f.i.imp)*: Las estructuras compresivas se refieren a *fallas inversas* y *cabalgamientos* entre materiales permeables e impermeables.



Una *falla inversa* es una ruptura de los estratos a través de la cual se ha producido un desplazamiento relativo, en el que las rocas de posición estratigráfica inferior son empujadas hacia arriba, por encima de los estratos anteriormente suprayacentes, debido a un régimen de esfuerzos compresivos en el que se produce acortamiento de terreno.

Un *cabalgamiento* es un tipo de falla inversa, generalmente con un plano de falla de bajo ángulo (menor de 45°), donde los materiales del bloque levantado montan sobre los del bloque hundido. Los cabalgamientos también se deben a regímenes compresivos o de acortamiento y requieren de mayores esfuerzos, pudiendo tener carácter regional.



El desarrollo de fallas inversas y cabalgamientos implica una serie de procesos que favorecen la impermeabilización de la zona de fractura, como son: desarrollo de espejos de falla, desarrollo de minerales de la arcilla y recristalización de minerales como resultado de la milonitización.

Para este estudio se han considerado estos cierres vinculados a confrontación entre *materiales permeables con impermeables* (ej, arenas con margas y yesos) como muy alta fiabilidad de cierre. Su nomenclatura en el mapa sería *f.i.imp* para la falla inversa y *c.i.* para el cabalgamiento.

Fiabilidad de cierre ALTA

Está constituida por:

- *Fallas normales impermeables (f.imp, y f.imp.m.c):* Una *falla normal* es una ruptura de los estratos a través de la cual se ha producido un desplazamiento relativo, en el que las rocas de posición estratigráfica superior son empujadas hacia abajo, por debajo de los estratos suprayacentes, debido a un régimen de esfuerzo distensivo en el que hay un acortamiento de terreno.

Las fallas normales presentan menor grado de milonitización / cataclasis por lo que pueden presentar menor resistencia al cierre hidrodinámico de una zona. Por tanto se le da una fiabilidad de cierre inferior al de las fallas inversas.

A las fallas normales que ponen en contacto materiales permeables confinados con materiales impermeables (*f.imp*), así como a las fallas que tienen presencia de manantiales de agua subterránea de origen conocido que ascienden a favor del plano de fractura (*f.imp.m.c.*), se les ha dotado de una fiabilidad de cierre alta.

Fiabilidad de cierre MEDIA

Está constituida por los siguientes factores geológicos:

- *Fallas inversas (f.i.p) y cabalgamientos (c.p)* vinculados a confrontación entre materiales permeables, tendrán fiabilidad de cierre media debido a la posibilidad de que la zona de contacto entre los materiales permeables no esté impermeabilizada y desconectada.
- *Fallas normales en acuíferos libres* entre materiales permeables (*f*).
- *Fallas normales que ponen en contacto materiales permeables confinados* y con presencia de manantiales de aguas subterráneas de origen desconocido (*f.imp.m.d.*) que ascienden a favor del plano de fractura.
- *Discordancia Erosiva (d.e):* Se denomina así a la superficie de erosión o a cualquier otra solución de continuidad que separa unos estratos más jóvenes de otros más antiguos. En general, representa una interrupción en la sedimentación durante la cual los materiales pueden sufrir procesos de erosión, deformación y precipitación química impermeabilizantes en mayor o menor grado. Este es el caso de los paleosuelos, de las costras ferruginosas y siliciclásticas.

CRITERIOS HIDROGEOLÓGICOS DE APOYO AL CIERRE DE LAS ZONAS DEFINIDAS PARA CADA MASb.

Los criterios de apoyo al cierre están constituidos por los siguientes factores hidrogeológicos:

Fiabilidad de cierre MUY ALTA

- *Transmisividad.* Zonas próximas entre sí que tengan valores de transmisividad que presenten grandes di-

ferencias, implican comportamientos hidrogeológicos diferentes.

- *Piezometría*. Zonas que presenten piezometrías distintas, implican comportamientos hidrogeológicos diferentes; tanto por variaciones en los niveles (diferencia de valores para condiciones hidrogeológicas diversas), como por el comportamiento de las isopiezas en su distribución (isolineas con orientaciones muy distintas).
- *Direcciones preferentes de flujo*. Las direcciones preferentes de flujo pueden marcar zonas con comportamientos hidrogeológicos distintos, indicados por direcciones y sentidos de flujo separados y sin influencia entre ellos. Por ejemplo, paleocanales, karstificaciones asociadas a la alineación de fracturas, etc.
- *Zonas aflorantes con barrera impermeable*. Se produce cuando un afloramiento actúa de barrera impermeable, produciendo 2 áreas de recarga diferenciadas a ambos lados del mismo. Por ejemplo, un plutón granítico aflorante que define áreas de recarga a cada lado.

Fiabilidad de cierre ALTA

- *Zonas aflorantes de recarga con flujos opuestos*. Se da cuando hay una zona de recarga en la que el flujo sigue sentidos opuestos a cada lado de la misma; ya sea debido a la fracturación de la zona aflorante, a la estratificación, etc. Un ejemplo sería el núcleo de un anticlinal a partir del cual el agua se infiltra y se desplaza en sentidos opuestos.
- *Porosidad*. Al igual que en el caso de la transmisividad serían zonas próximas entre sí, con valores de porosidad (entendida como porosidad eficaz) muy distintos, que daría lugar a comportamientos hidrodinámicos e hidrogeológicos diferentes.

Fiabilidad de cierre MEDIA

- *Confinamiento*. Hace referencia a una posible zonación en la vertical, en el caso de presencia de un acuífero que en unas zonas sea confinado y en otras sea libre. El comportamiento hidrodinámico del acuífero generalmente es independiente la parte confinada de la libre.
- *Presencia de manantiales*. Se consideran aquellos que indican un afloramiento del agua en una discontinuidad geológica, relacionada con una falta de conexión entre materiales permeables con materiales impermeables, es decir, indican la presencia de una barrera de baja permeabilidad entre dos zonas hidrogeológicas.

- *Calidad Química*. Composiciones químicas muy diferenciadas de zonas próximas pueden indicar modelos de funcionamiento hidrogeológico diferentes. Este factor es de especial interés si va asociado a alguno de los factores descritos anteriormente.

RESULTADO DE LA ZONIFICACIÓN

Tras analizar la documentación consultada se ha procedido a zonificar las masas de agua subterránea de la cuenca alta del río Guadiana.

Del total de las ocho masas de agua subterránea consideradas, se han encontrado criterios para proponer la zonificación en tres: la MASb 040.001 Sierra de Altomira, la 040.003 Lillo-Quintanar y la 040.005 Rus-Valdelobos.

Con los datos disponibles, en las MASb 040.002 La Obispalía, 040.004 Consuegra-Villacañas, 040.006 Mancha Occidental II y la 040.007. Mancha occidental I, no se han encontrado evidencias que permitan establecer una zonificación efectiva. Según la bibliografía consultada, en la MASb 040.010 Campo de Montiel, los procesos de fracturación, asociados a procesos diapíricos, y los procesos de plegamiento, podrían definir un cierto aislamiento local, sin embargo no se puede confirmar que constituyan zonas independientes.

En total se han diferenciado 9 subzonas, las cuales se reparten entre las siguientes MASb:

*MASb. 040.001. Sierra de Altomira:

- Subzona 01 Altomira-El Toboso
- Subzona 02 Altomira-Belmonte
- Subzona 03 Altomira-El Hito
- Subzona 04 Altomira-Carrasposa del Campo

*MASb. 040.003. Lillo-Quintanar

- Subzona 01 Lillo-Quintanar. Mioceno Sur Corral de Almaguer 1
- Subzona 02 Lillo-Quintanar. Mioceno Sur Corral de Almaguer 2
- Subzona 03 Lillo-Quintanar. Mioceno de Pozorrubio

*MASb. 040.005. Rus-Valdelobos

- Subzona 01 Rus-Valdelobos. Sta María del Campo Rus
- Subzona 02 Rus-Valdelobos. San Clemente

A continuación se detallan los criterios utilizados para establecer las mencionadas subzonas.

MASb. 040.001. SIERRA DE ALTOMIRA_

Subzona 01 Altomira-El Toboso (figuras 7 y 8).

La información consultada ha sido la siguiente:

- Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 608, 633, 661, 689, 715.
- Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las UUHH de la CAG. Confederación Hidrográfica del Guadiana. MMA. 2004.
- Plan de geología continua GEODE
- Base de Datos Aguas XXI del IGME

Esta subzona consta de 623 km² aproximadamente, el carácter químico general del agua es sulfatada cálcica y

sulfatada bicarbonatada-cálcica y está limitada por los límites de la propia MASb y por las estructuras de los tramos 5, 6 y 7.

En el tramo 5 se observa un cabalgamiento que afecta a los materiales jurásicos. En el tramo 7 el cabalgamiento corta los materiales jurásicos, cretácicos y llega a afectar a los del Terciario.

En el tramo 6 la falla inversa pone en contacto la formación impermeable del Triásico (Keuper) con las formaciones jurásicas y cretácicas, haciendo que el Triásico impermeable llegue casi hasta la superficie del terreno. Además, en el tramo 5 afloran manantiales, figura 8.

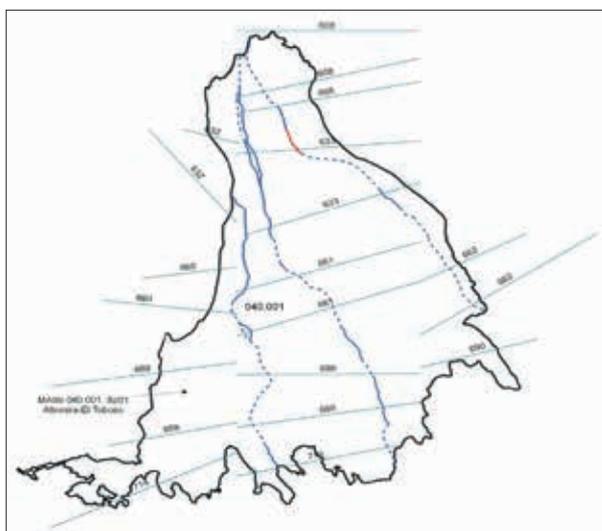


Figura 7. MASb 040.001. Subzona 01 Altomira-El Toboso Cortes Geológicos

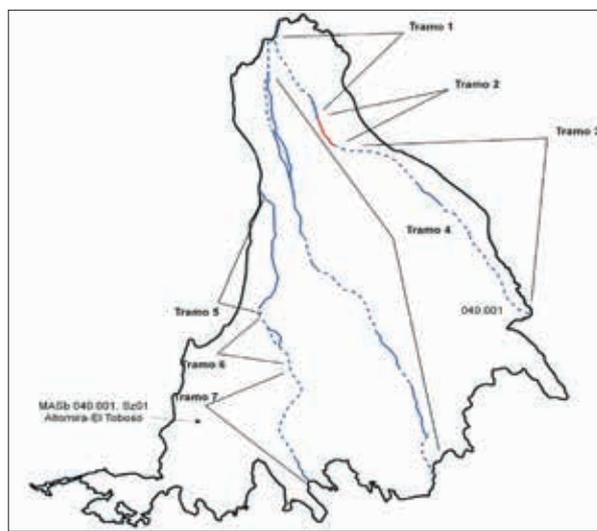


Figura 8. MASb 040.001. Subzona 01 Altomira-El Toboso. Tramos

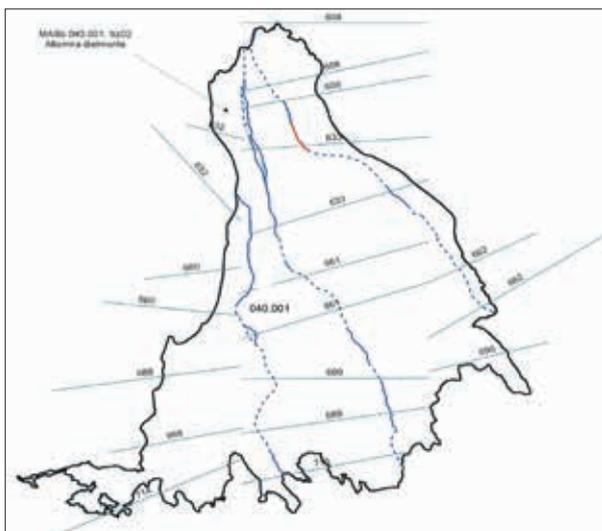


Figura 9. MASb 040.001. Subzona 02 Altomira-Belmonte. Cortes geológicos.

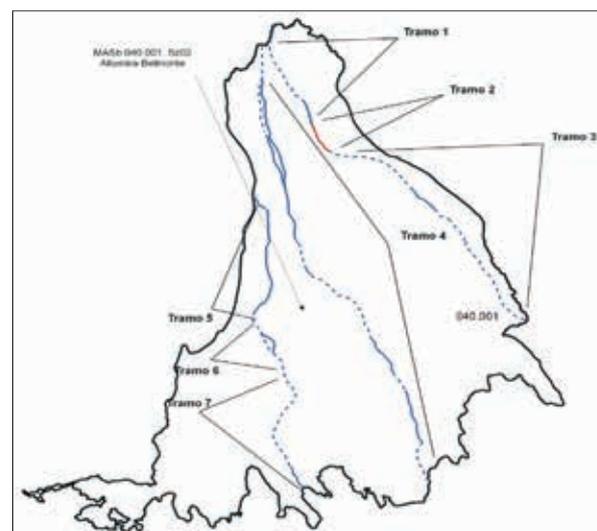


Figura 10. MASb 040.001. Subzona 02 Altomira-Belmonte. Tramos.

Subzona 02 Altomira-Belmonte (figuras 9 y 10)

La información consultada es la siguiente:

- Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 608, 633, 661, 689, 715.
- Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las UHH de la CAG. Confederación Hidrográfica del Guadiana. MMA. 2004.
- Plan de geología continua. GEODE
- Base de Datos Aguas XXI del IGME.

Esta subzona tiene una superficie de 731 km² aproximadamente, el carácter químico general predominante del agua es bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sulfatada-cálcica. La subzona está delimitada por los tramos 4, 5, 6 y 7.

En el tramo 4 se identifica un cabalgamiento que afecta a las formaciones jurásicas y cretácicas, si bien en la parte media del tramo, a la altura del corte geológico del MAGNA 633 II-II', el cabalgamiento pone en contacto los materiales jurásicos con los del Terciario.

En el tramo 5 se observa un cabalgamiento que afecta a los materiales jurásicos. En el tramo 7, el cabalgamiento corta los materiales jurásicos, cretácicos y llega a afectar a los terciarios. En el tramo 6, la falla inversa detectada pone en contacto la formación impermeable del Triásico (Keuper) con las formaciones jurásicas y cretácicas, haciendo que el Triásico llegue casi hasta la superficie del terreno.

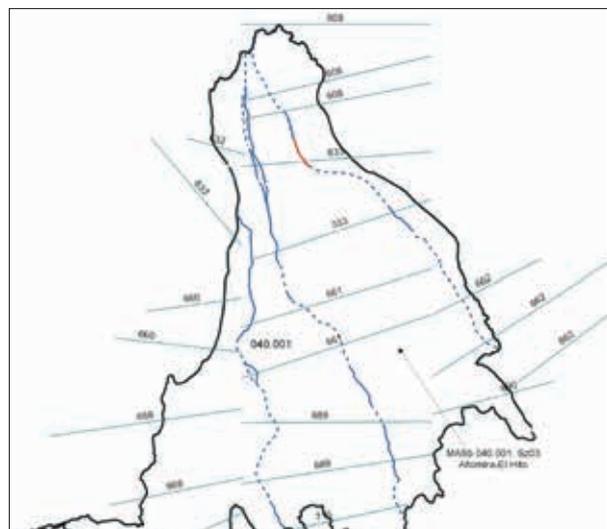


Figura 11. MASb 040.001. Subzona 03 Altomira-El Hito. Cortes Geológicos

Además, en los tramos 4 y 5 afloran manantiales, figura 10.

Subzona 03 Altomira-El Hito (figs. 11 y 12)

La información consultada es la siguiente:

- Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 608, 633, 661, 662, 689, 715.
- Plan de geología continua. GEODE
- Base de Datos Aguas XXI del IGME

Esta subzona consta de 975 km² aproximadamente, el carácter químico general predominante del agua es bicarbonatada cálcica, y sulfatada cálcica. Está delimitada por los tramos 1, 2, 3 y 4.

Los tramos 1 y 3 están afectados por un cabalgamiento que afecta a los materiales del Triásico, Cretácico y Terciario. En el tramo 2 hay presencia de cabalgamientos que pone en contacto materiales del Paleógeno inferior con materiales del Mioceno inferior. Este cabalgamiento también afecta materiales cretácicos. El cabalgamiento a lo largo del tramo 4 afecta a materiales del Jurásico y del Cretácico, si bien en la parte media del tramo, a la altura del corte geológico del MAGNA 633 II-II', el cabalgamiento pone en contacto los materiales jurásicos con los del Terciario

En materiales permeables, en los tramos 1, 3 y 4 aparecen manantiales, figura 12.

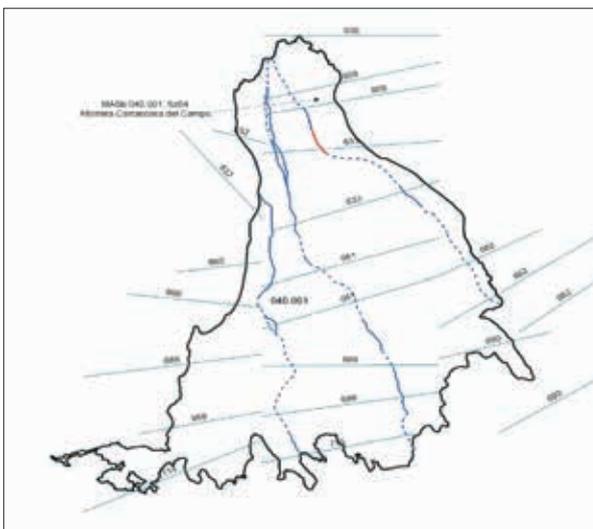


Figura 12. MASb 040.001. Subzona 03 Altomira-El Hito. Tramos.

Subzona 04 Altomira-Carrascosa del Campo (figuras. 13 y 14).

- La información consultada es la siguiente:
- Hojas MAGNA 1:50.000 n° 633, 662 y 608.
 - Plan de geología continua. GEODE
 - Base de Datos Aguas XXI del IGME

Esta subzona consta de 245 km² aproximadamente, el carácter químico general predominante del agua es sulfatada cálcica. La subzona está limitada por los límites de la propia masa de agua y por las estructuras de los tramos 1, 2 y 3.

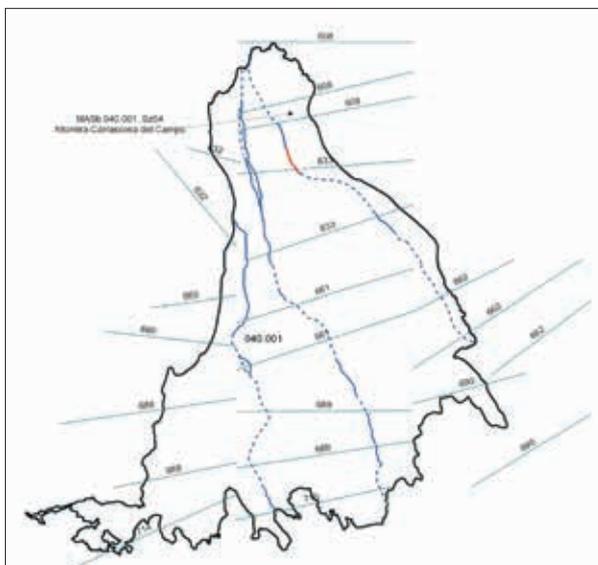


Figura 13. MASb. 040.001. Subzona 04 Altomira-Carrascosa del Campo. Cortes geológicos.

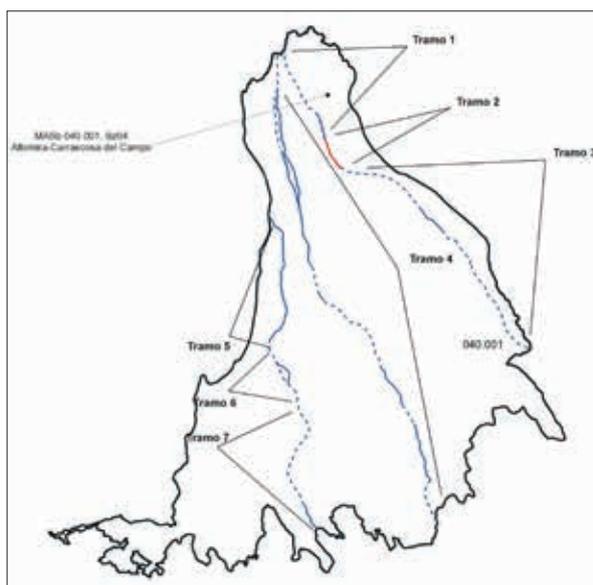


Figura 14. MASb. 040.001. Subzona 04 Altomira-Carrascosa del Campo. Tramos.

Los tramos 1 y 3 están afectados por un cabalgamiento que corta a los materiales del Triásico, Cretácico y Terciario. En el tramo 2 hay presencia de cabalgamientos que pone en contacto materiales del Paleógeno inferior con materiales del Mioceno inferior. Este cabalgamiento también afecta materiales cretácicos.

En materiales permeables, en los tramos 1 y 3 aparecen manantiales, figura 14.

MASb 004.003 Lillo-Quintanar

Subzona 01 Lillo-Quintanar. Mioceno Sur Corral de Almaguer 1. (figura 15)

La información consultada es la siguiente:

- Hojas MAGNA 1:50.000 n° 659.
- Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Demarcación Hidrográfica del Guadiana. 2009. Apoyo a la caracterización de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. MAS: 040.003 Lillo-Quintanar.

Esta subzona consta de 7 km² aproximadamente. No hay datos disponibles de calidad química. Toda la subzona está limitada por el tramo 12, el cual se trata de una discordancia erosiva

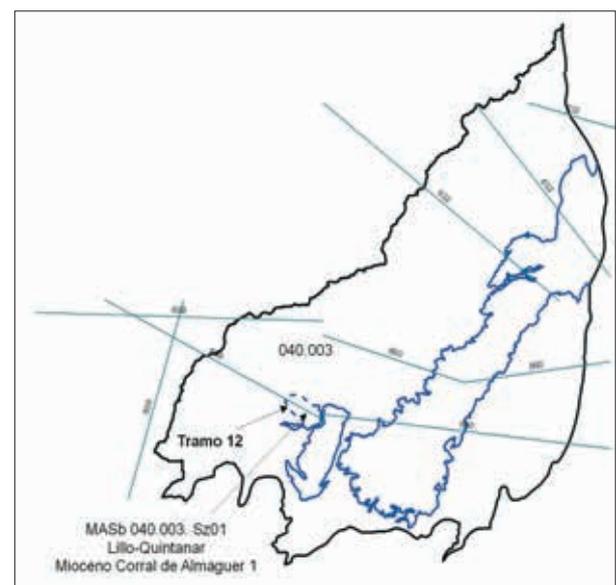


Fig. 15. MASb 040.003. Subzona 01 Lillo-Quintanar Mioceno Sur Corral de Almaguer 1

Subzona 02 Lillo-Quintanar. Mioceno Sur corral de Almaguer 2 (fig. 16)

La información consultada es la siguiente:

- Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 660.
- Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Demarcación Hidrográfica del Guadiana. 2009. Apoyo a la caracterización de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. MAS: 040.003 Lillo-Quintanar.

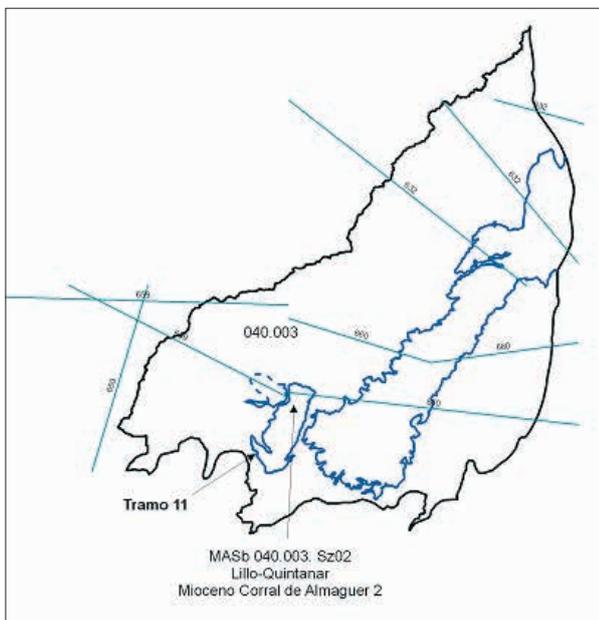


Figura 16. MASb 040.003. Subzona 02 Lillo-Quintanar Mioceno Corral de Almaguer 2

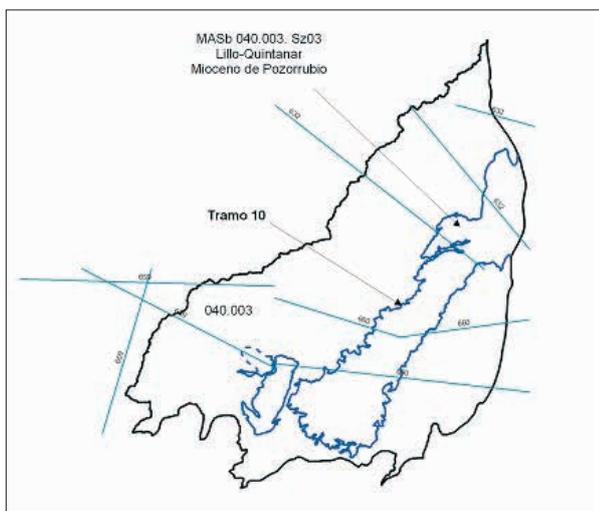


Figura 17. MASb 040.003. Subzona 03 Lillo-Quintanar Mioceno de Pozorrubio

Esta subzona consta de 25 Km² aproximadamente. No hay datos disponibles de calidad química. Toda la subzona está limitada por el tramo 11, el cual se trata de una discordancia erosiva.

Subzona 03 Lillo-Quintanar. Mioceno de Pozorrubio (figura 17)

La información consultada es la siguiente:

- Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 660 y 632.
- Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Demarcación Hidrográfica del Guadiana. 2009. Apoyo a la caracterización de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. MAS: 040.003 Lillo-Quintanar.
- Plan de geología continua. GEODE
- Base de Datos Aguas XXI del IGME.

Esta subzona consta de 235 Km² aproximadamente, el carácter químico general predominante del agua es sulfatada-bicarbonatada cálcica. Toda la subzona está limitada por el tramo 10, el cual se trata de una discordancia erosiva. Además encontramos manantiales como apoyo al criterio de cierre.

MASb. 040.005. RUS-VALDELOBOS

Subzona 01 Rus-Valdelobos. Sta María del Campo Rus. (figura 18)

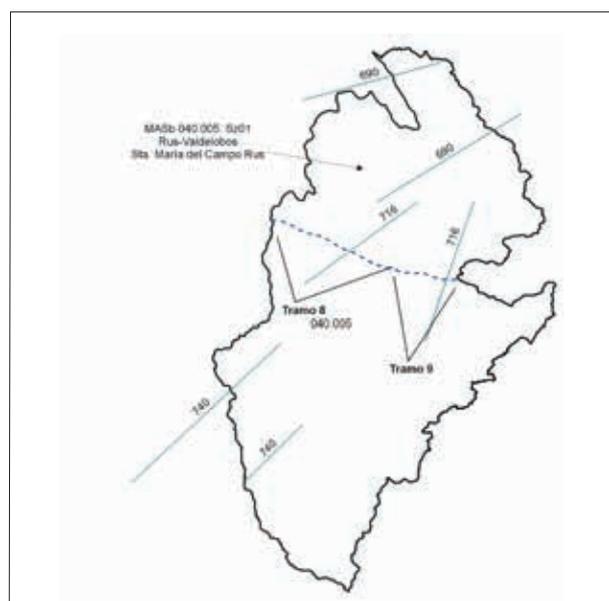


Figura 18. MASb 040.005 Subzona 01 Rus-Valdelobos Sta. María del Campo Rus

La información consultada es la siguiente:

- Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 716.
- Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las UUHH de la CAG. Confederación Hidrográfica del Guadiana. MMA. 2004.

Esta subzona tiene una superficie de 638 Km² aproximadamente. El carácter químico general predominante del agua es sulfatada cálcica. La subzona está limitada por los límites de la propia masa de agua y por las estructuras de los tramos 8 y 9.

En el tramo 8 las fallas inversas cortan a las formaciones jurásicas y cretácicas poniéndolas en contacto con los materiales terciarios. En el tramo 9 se identifica un cabalgamiento que afecta a las formaciones jurásicas.

Subzona 02 Rus-Valdelobos. San Clemente

La información consultada es la siguiente:

- Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 716.
- Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las UUHH de la CAG. Confederación Hidrográfica del Guadiana. MMA. 2004.

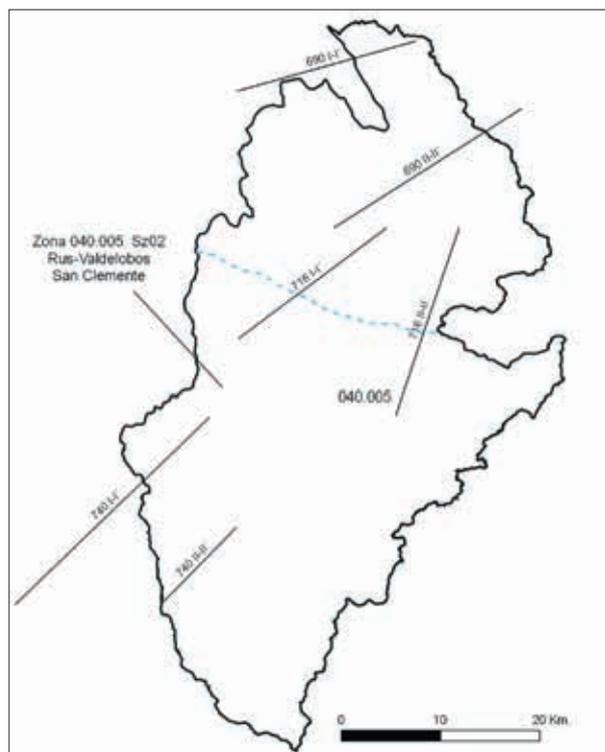


Figura 19. MASb 040.005 Subzona 02 Rus-Valdelobos San Clemente

Esta subzona consta de 1078 km² aproximadamente, el carácter químico general del agua predominante en la parte norte es de composición sulfatada cálcica. Hacia el sur pasa a predominar el carácter bicarbonatado cálcico.

La subzona está limitada por los límites de la propia masa de agua y por las estructuras de los tramos 8 y 9, figura 19.

En el tramo 8 las fallas inversas cortan a las formaciones jurásicas y cretácicas poniéndolas en contacto con los materiales terciarios. En el tramo 9 se identifica un cabalgamiento que afecta a las formaciones jurásicas.

Se ha realizado una consulta a la tabla de datos de análisis químicos de la Base de Datos Aguas XXI del IGME para el periodo 2000-2002. Se ha obtenido un total de 380 análisis que corresponden a 118 puntos de muestreo. Se ha procedido a la caracterización del agua en esos puntos, si bien no ha podido extraerse un criterio "sensu stricto" que ayude a justificar la zonación.

De igual forma, se ha realizado una consulta a la tabla de datos piezométricos de la Base de Datos Aguas XXI del IGME con el objetivo de elaborar la superficie piezométrica del acuífero mesozoico de la Sierra de Altomira (figura 20). Se optó por utilizar las medidas correspondientes al año 2010, con un total de 14 medidas.

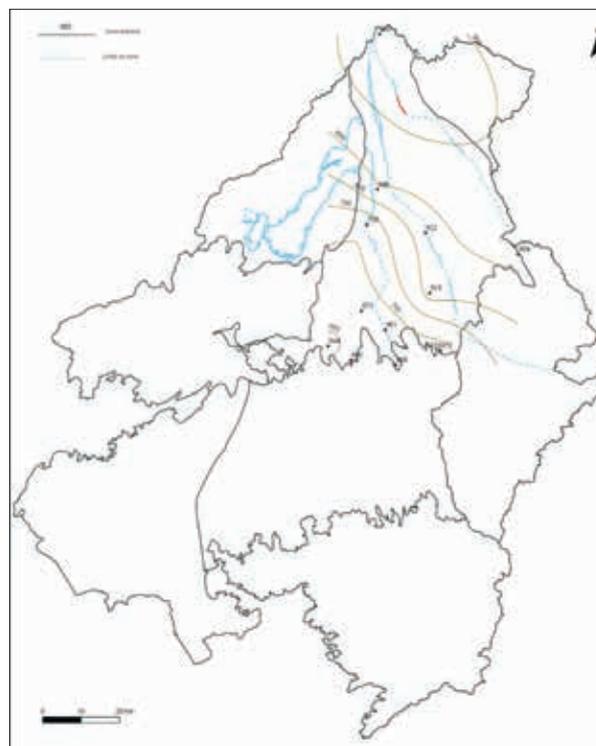


Figura 20. Piezometría de la Sierra de Altomira

No se ha podido disponer de un número suficiente de puntos, por lo que se han interpolado los datos para trazar las isopiezas, lo cual ha impedido la obtención de resultados concluyentes, si bien se observa una tendencia de flujo de dirección N-S, coincidente con la orientación de las principales discontinuidades que forman los límites.

CONSIDERACIONES FINALES

La metodología utilizada se ha basado en el establecimiento y definición de criterios geológicos e hidrogeológicos que permitan caracterizar y determinar posibles límites hidrogeológicos dentro de las distintas MASb.

Los criterios de cierre definidos según los factores geológicos observados son: 1. *fiabilidad de cierre muy alta*: diapiros salinos sin karstificación, fallas inversas y cabalgamientos en materiales impermeables; 2. *fiabilidad de cierre alta*: fallas normales en materiales impermeables; y 3. *fiabilidad de cierre media*: fallas inversas y cabalgamientos en materiales permeables; fallas normales en materiales permeables y discordancias erosivas.

Como apoyo a estos criterios geológicos se han tenido en cuenta una serie de criterios hidrogeológicos: 1. *fiabilidad de cierre muy alta*: transmisividad, piezometría, direcciones preferentes de flujo, zona aflorantes con barrera impermeable; 2. *fiabilidad de cierre alta*: zona aflorante de recarga con flujos opuestos, porosidad; y 3. *fiabilidad de cierre media*: confinamiento, presencia de manantiales y calidad química.

Como producto final, consecuencia de esta metodología, se elaboró un mapa con las distintas subzonas establecidas y sus límites, así como unas tablas con los criterios utilizados para la delimitación de cada subzona.

De las 8 masas de agua subterránea estudiadas, sólo se ha podido determinar una posible zonificación en tres de ellas, obteniéndose un total de 9 subzonas, con la siguiente distribución: en la MASb 040.001 Sierra de Altomira, se han establecido 4 subzonas; en la MASb 040.003 Lillo-Quintanar se proponen 3 subzonas y en la MASb 040.005 Rus-Valdelobos se han zonificado 2 subzonas. En la MASb 040.010 Campo de Montiel, algunos estudios indican un cierto aislamiento local, pero no se puede afirmar que constituyan zonas independientes de límites concretos.

En el resto de las masas de agua objeto de este estudio no se han encontrado evidencias de una posible zonificación efectiva.

Habría que añadir que la zonificación obtenida debería ser contrastada con estudios hidrogeológicos posteriores, con el fin de delimitar y justificar la desconexión hidráulica entre las subzonas propuestas.

Para un mejor conocimiento de la zonificación realizada y otras futuras se recomienda la realización de ensayos de bombeos a ambos lados de los límites de zona en las masas de agua 040.001 Sierra de Altomira y en la 040.005 Rus-Valdelobos, así como ampliar la red de medidas piezométricas, en el sistema acuífero de la Sierra de Altomira y Rus-Valdelobos, con el fin de poder realizar mapas piezométricos de mayor detalle.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IGME Memoria y Cartografía geológica 1:50.000 MAGNA de las hojas:

- 607 Tarancón 1975
- 608 Huete 1999
- 609 Villar de Olalla 1999
- 631 Ocaña 1975
- 632 Horcajo de Santiago 1976
- 633 Palomares del Campo 1999
- 634 San Lorenzo de la Parrilla 1999
- 659 Lillo 1979
- 660 Corral de Almaguer, en edición
- 661 Villarejo de Fuentes 1999
- 662 Valverde del Júcar 1999
- 687 Villacañas en edición
- 688 Quintanar de la Orden, en edición
- 689 Belmonte 1999
- 690 Sta. María del Campo Rus 1976
- 712 Madrideojos, en edición
- 713 Alcázar San Juan, en edición
- 714 Campo de Criptana, en edición
- 715 El Provencio, en edición
- 716 San Clemente 1998
- 738 Villarta de San Juan 1988
- 740 Villarrobledo 1977
- 741 Minaya 1978
- 759 Piedrabuena 1989
- 760 Daimiel 1988
- 761 Llanos 1976
- 763 Sotuelamos 1975
- 764 Munera 1988

785 Almagro 1988
 786 Manzanares 1988
 788 El Bonillo 1976
 789 Lezuza 1975
 814 Villanueva de la Fuente 1977
 815 Robledo 1979

IGME. Plan GEODE de geología continua.

IGME Base de Datos Aguas XXI

Muñoz Martín, A (1997) Evolución geodinámica del borde oriental de la Cuenca del Tajo desde el Oligoceno hasta la actualidad". Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (1998) Evaluación de recursos de la Unidad Hidrogeológica 04.02. Lillo-Quintanar.

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (2001). Mejora del conocimiento hidrogeológico de la cuenca alta hasta las U.U.H.H. 04.02 y 04.04.

Martínez Cortina, L (2001) Estimación de la recarga en grandes cuencas sedimentarias mediante modelos numéricos de flujo subterráneo. Aplicación a la Cuenca Alta del Guadiana. Tesis doctoral. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (2003) Mejora del conocimiento cuantitativo de los recursos hídricos de la cabecera del río Guadiana

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (2004) Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca Alta del Guadiana.

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (2004) Estudio de evaluación de recursos en la U.H. 04.03. Consuegra-Villacañas.

Montero, E. Rincón, P. J. (2004). Condicionantes geológicos estructurales de la unidad hidrogeológica del Campo de Montiel.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009) Mejora del conocimiento hidrológico e hidrogeológico del Alto Guadiana.

IGME-DGA (2009) Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Actividad 2: del Acuerdo para la Encomienda de Gestión por el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General del Agua) al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO Y ANÁLISIS DEL EFECTO DEL PERIODO
HÚMEDO 2009-2010 EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADIANA

Miguel Mejias Moreno



En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Estudio hidrometeorológico y análisis del efecto del período húmedo 2009-2010 en los acuíferos de la Cuenca Alta del río Guadiana*, llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: : equipo Instituto Geológico y Minero de España

Miguel Mejías Moreno
Luis Martínez Cortina
María Elena Galindo Rodríguez

Colaboración:

Empresa IDRENA para realización de trabajos auxiliares

ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO Y ANÁLISIS DEL EFECTO DEL PERIODO HÚMEDO 2009-2010 EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADIANA

INTRODUCCIÓN

El estudio recoge un análisis preliminar del efecto que ha tenido el periodo húmedo acaecido en la primera mitad del año hidrológico 2009/10, en los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana. Partiendo de los datos de los que se ha podido disponer a corto plazo (pluviometría, temperatura y niveles piezométricos) se ha elaborado en primer lugar un estudio hidrometeorológico, con el objetivo de obtener las isoyetas y la lluvia útil por masas de agua subterránea (MASb) para cada tipo de año climatológico. Posteriormente se ha realizado un cálculo estimativo de la infiltración para algunas MASb y un análisis zonal de la evolución piezométrica.

Se pretende que este análisis sienta las bases de un estudio futuro más amplio y con mayor proyección temporal, en el que se estudie con detalle las peculiaridades de la recarga en las masas de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana en secuencias húmedas, en la situación actual de régimen alterado. En el estudio hidrometeorológico se han incluido todas las MASb que componen el Subsistema Alto Guadiana, así como la MASb 040.008 Bullaque.

METODOLOGÍA

Estudio hidrometeorológico. Datos de partida

Los datos de partida corresponden a 88 estaciones meteorológicas pertenecientes a la zona mencionada, situadas en las provincias de Albacete, Ciudad Real, Cuenca y Toledo. Dichas estaciones se reparten entre las masas de agua subterránea, figura 1. Corresponden a dos variables: precipitación y temperatura, y provienen de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La primera variable contiene a su vez dos series: una de carácter mensual para el periodo 1960-2010, que incluye a las 88 estaciones, y otra de carácter diario en el periodo comprendido entre noviembre de 2009 y abril de 2010 que contiene datos de 10 estaciones. Las medidas de temperatura poseen carácter mensual y comprenden el periodo 1960-2010.

Una parte importante de las series, tanto de precipitación como de temperatura, están incompletas. El completado de datos se ha llevado a cabo mediante correlación lineal. Los datos diarios de precipitación corresponden

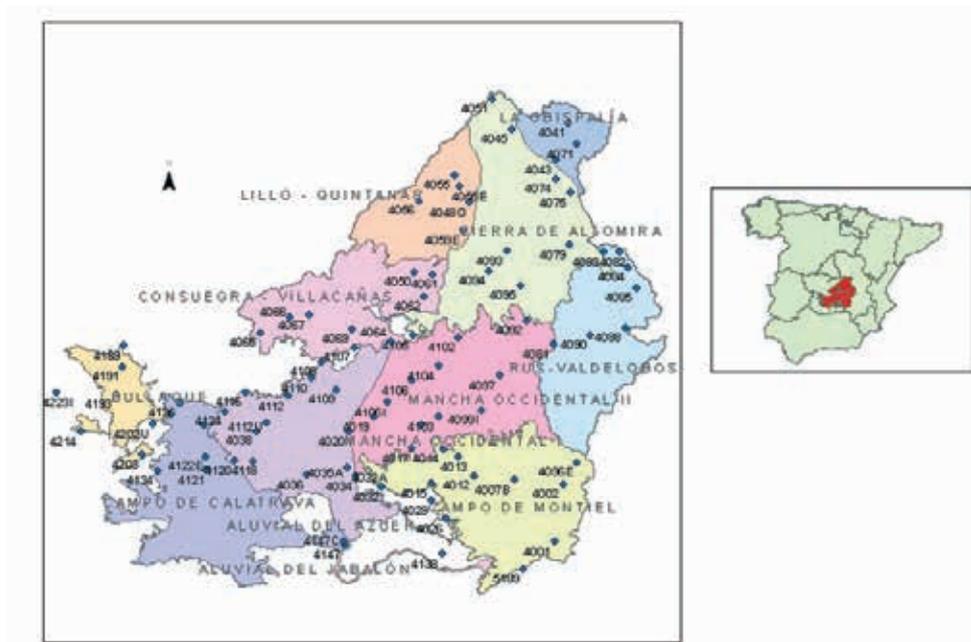


Figura 1. Estaciones termopluviométricas y masas de agua subterránea

a las siguientes estaciones: Arenales de San Gregorio, Argamasilla de Alba (Pachecas), Argamasilla de Alba, Carrizosa, Las Tablas de Daimiel, Ossa de Montiel 2, San Clemente, Socuellamos (Las Rejas), Tomelloso y Villarta de San Juan. Abarcan el período comprendido entre noviembre de 2009 y abril de 2010, con el objeto de recoger las intensas precipitaciones que tuvieron lugar en la primera mitad del año hidrológico 2009/2010, si bien en algunas de ellas no estaban todavía disponibles los datos completos del periodo mencionado, como se muestra en la tabla 1.

ESTACIÓN	INICIO	FIN
OSSA DE MONTIEL 2	01/11/2009	31/03/2010
ARGAMASILLA DE ALBA	01/11/2009	31/03/2010
ARGAMASILLA ALBA (PACHECAS)	01/11/2009	30/04/2010
SOCUELLAMOS (LAS REJAS)	01/11/2009	28/02/2010
TOMELLOSO	01/11/2009	31/03/2010
LAS TABLAS DE DAIMIEL	01/11/2009	31/03/2010
CARRIZOSA	01/11/2009	01/05/2010
SAN CLEMENTE	01/11/2009	01/05/2010
ARENALES DE SAN GREGORIO	01/11/2009	01/05/2010
VILLARTA DE SAN JUAN	01/11/2009	01/05/2010

Tabla 1. Datos diarios de precipitación

Tratamiento de los datos

Precipitación

Con el objetivo de completar las series mensuales se ha realizado un estudio de las correlaciones entre los datos de cada estación. A partir de la cercanía geográfica y teniendo en cuenta la topografía, se ha comprobado cuál

es la estación completa, o más completa, que mejor se correlaciona con cada estación incompleta, elaborando para cada punto una serie de gráficos como el que se muestra en la figura 2. Así, los coeficientes de correlación hallados permiten ir rellenando los huecos de cada serie incompleta, a partir de los datos de la serie completa que mejor se correlaciona con ella.

Una vez rellenados los meses sin datos, se procedió a elaborar los mapas de isoyetas de la zona de estudio para año climatológicamente: seco, medio y húmedo. La herramienta utilizada fue el programa ArcGIS. Para realizar las interpolaciones se utilizó el método Spline 3, incorporado en el propio ArcGIS, consistente en calcular, para cada grupo de cuatro datos, el polinomio de grado 3 de menor curvatura que pasa por los datos conocidos, y utilizar la ecuación que describe dicho polinomio para obtener la precipitación en todos los puntos intermedios. El criterio para distinguir los tipos climatológicos de cada año es el utilizado habitualmente y reflejado en la tabla 2.

PRECIPITACIÓN ANUAL, p	TIPO DE AÑO
$p < 0,85 \times \lambda$	Seco
$0,85 \times \lambda < p < 1,15 \times \lambda$	Medio
$1,15 \times \lambda < p$	Húmedo

Tabla 2. Criterio para distinguir años seco, medio y húmedo. El símbolo λ denota el promedio de toda la serie

Además, la precipitación mensual ha sido recopilada por años hidrológicos en tablas como la tabla 3, que han generado gráficas como la que se muestra en la figura 3.

Respecto a los datos diarios de precipitación se han elaborado gráficas como la de la figura 4, con el objeto de

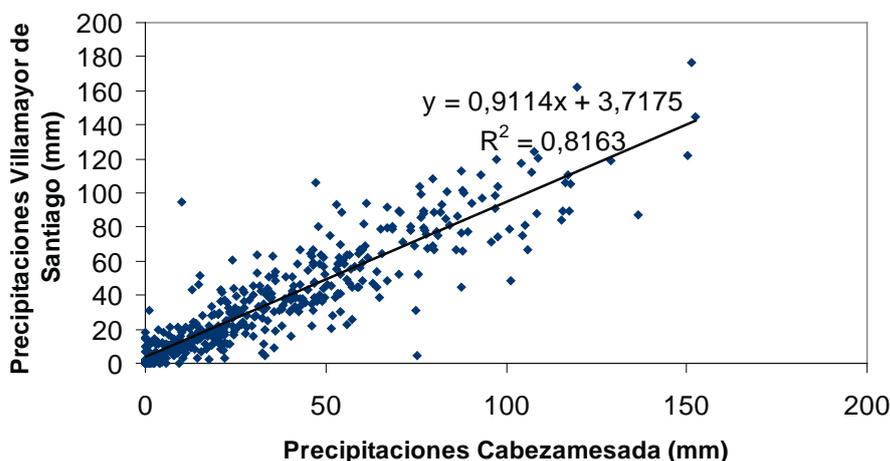


Figura 2. Ejemplo de correlación entre datos de precipitaciones: estaciones de Villamayor de Santiago (4059E) y Cabezamesada (4056)

ESTACIÓN MEMBRILLA			
AÑO HIDROLÓGICO	PRECIPITACIÓN (mm)	DESVIACIÓN	AÑO TIPO
1960-1961	469,9	43,7	HÚMEDO
1961-1962	618,8	270,8	HÚMEDO
1962-1963	542,3	421,5	HÚMEDO
1963-1964	493,8	523,7	HÚMEDO
1964-1965	382,6	514,7	MEDIO
1965-1966	597,5	720,5	HÚMEDO
1966-1967	279,5	608,4	SECO
1967-1968	372,9	589,7	MEDIO
1968-1969	527,3	725,4	HÚMEDO
1969-1970	340,4	674,1	MEDIO
1970-1971	427,2	709,7	MEDIO
1971-1972	343,7	661,8	MEDIO
1972-1973	289,0	559,2	SECO
1973-1974	517,6	685,1	HÚMEDO
1974-1975	346,1	639,6	MEDIO
1975-1976	371,0	619,0	MEDIO
1976-1977	394,1	621,5	MEDIO
1977-1978	488,8	718,7	HÚMEDO
1978-1979	520,6	847,6	HÚMEDO
1979-1980	323,6	779,6	SECO
1980-1981	320,6	708,6	SECO
1981-1982	359,6	676,6	MEDIO
1982-1983	327,4	612,3	SECO
1983-1984	325,3	546,0	SECO
1984-1985	311,6	466,0	SECO
1985-1986	422,8	497,2	MEDIO
1986-1987	358,3	463,8	MEDIO
1987-1988	411,0	483,2	MEDIO
1988-1989	407,0	498,6	MEDIO
1989-1990	358,5	465,5	MEDIO
1990-1991	235,9	309,7	SECO
1991-1992	399,8	317,9	MEDIO
1992-1993	298,4	224,7	SECO
1993-1994	192,8	25,9	SECO
1994-1995	202,9	-162,8	SECO
1995-1996	533,8	-20,7	HÚMEDO
1996-1997	456,6	44,3	HÚMEDO
1997-1998	489,5	142,2	HÚMEDO
1998-1999	191,5	-57,9	SECO
1999-2000	375,8	-73,8	MEDIO
2000-2001	350,4	-115,0	MEDIO
2001-2002	398,1	-108,5	MEDIO
2002-2003	339,0	-161,1	MEDIO
2003-2004	495,1	-57,7	HÚMEDO
2004-2005	246,8	-202,5	SECO
2005-2006	372,5	-221,6	MEDIO
2006-2007	469,0	-144,2	HÚMEDO
2007-2008	394,8	-141,1	MEDIO
2008-2009	369,9	-162,8	MEDIO
Promedio	391,6		

Tabla 3. Precipitación, desviación acumulada y año tipo para cada año hidrológico de la serie y media de precipitación de la serie para la estación de Membrilla (4034)

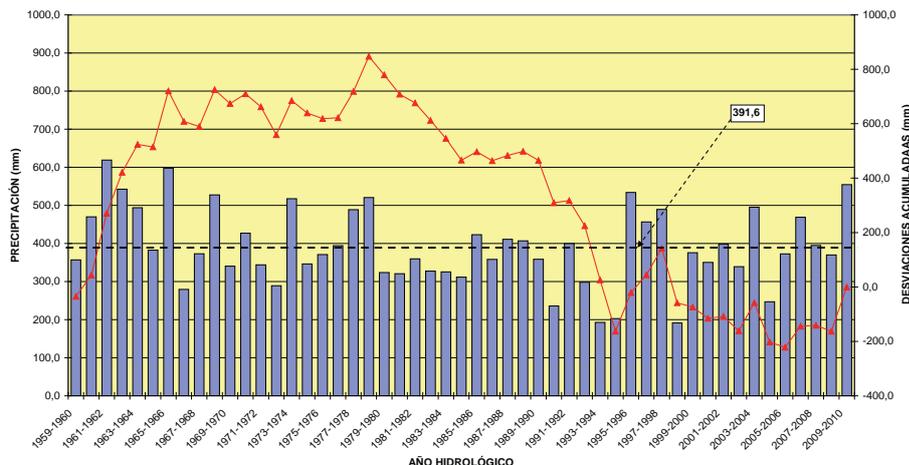


Figura 3. Gráfica resumen de años hidrológicos en la estación de Membrilla (4034)

superponer la evolución piezométrica diaria a los valores de precipitación diaria de la estación pluviométrica más próxima al piezómetro.

Temperatura

El completado de los datos de temperatura se ha llevado a cabo de forma similar al de los datos de precipitación mensual, generando y comparando correlaciones como la que aparece en la figura 5. La comparación entre la figura 2 y la figura 5 pone de manifiesto la diferencia entre las correlaciones de datos de precipitaciones y de temperatura. En los primeros, el coeficiente de correlación (r) suele alcanzar valores entre 0,85 y 0,94, disminuyendo en alguna ocasión hasta 0,7; mientras que en los datos de temperatura nunca resulta menor de 0,98. El completado de esta variable, lógicamente, se ha llevado a cabo para las estaciones termopluviométricas, aquellas de la tabla 2 que presentan un porcentaje elevado de datos de temperatura.

Cálculo de la lluvia útil

Con los datos de precipitación y temperatura completados se ha calculado la precipitación por MASb para cada año tipo y la lluvia útil, primer objetivo de este trabajo. En primer lugar se ha calculado la evapotranspiración potencial (ETP), mediante el método de Thornthwaite, a partir de la cual se derivan los valores de evapotranspiración real (ETR) y lluvia útil en cada estación y para cada año hidrológico. Un ejemplo de este cálculo se muestra en la tabla 4. La capacidad de campo utilizada ha sido de 75 mm, valor obtenido a partir de las referencias bibliográficas consultadas.

Estimación de la infiltración por MASb

Datos de partida

Los datos de partida abarcan el período 1960-2010, tienen carácter diario y corresponden a 14 estaciones

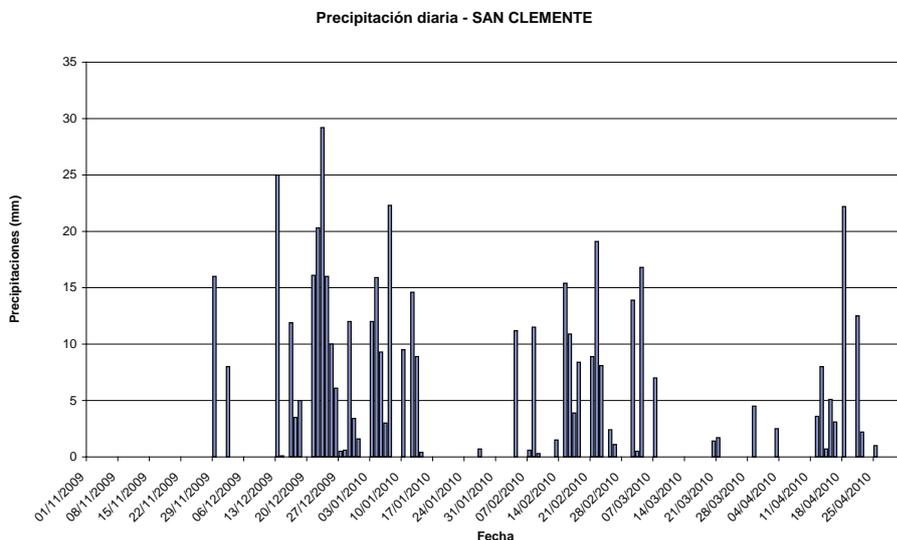
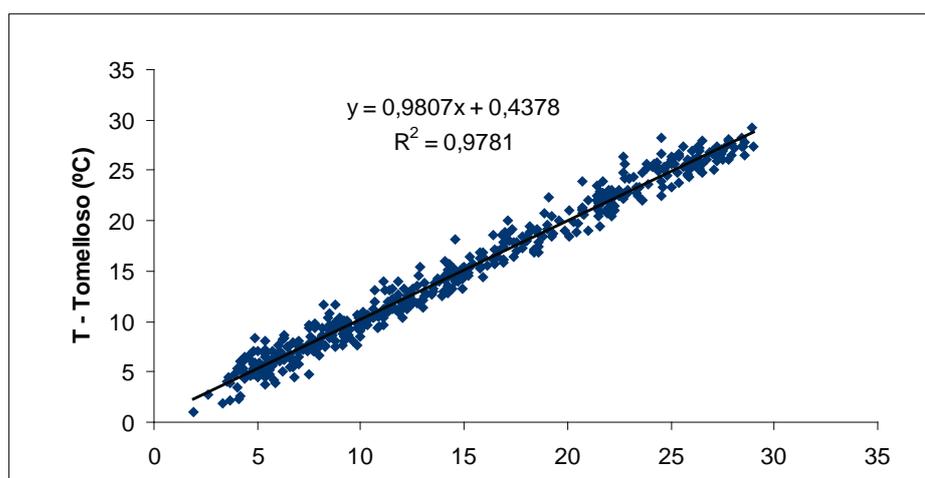


Figura 4.- Datos diarios de precipitación en la estación de San Clemente (4090)

Figura 5. Ejemplo de correlación entre datos de temperatura: Tomelloso (4103) y Argamasilla de Alba (4013)



meteorológicas pertenecientes a la cuenca alta del Guadiana y encuadradas dentro de las distintas masas de agua subterránea como se indica en la tabla 5.

Los datos de precipitación proporcionados por AEMET resultaron bastante completos. Sin embargo, los de temperatura presentaban bastantes lagunas, por lo que se optó

por unir todas las series incompletas para poder obtener una sola serie completa. Esta decisión se apoya en las excelentes correlaciones entre series de temperatura, casi todas con $R^2 \approx 1$, halladas en los datos y utilizadas en el apartado anterior. Por tanto, se ha utilizado la misma temperatura para todas las estaciones, de modo que la evapotranspiración potencial (ETP) es idéntica en todas ellas.

Año	Mes	T (°C)	ETP (mm)	P (mm)	P-ETP (mm)	H (mm)	Δ	ETR (mm)	Ll. út. (mm)
1960	10	10,3	34,7	100,1	65,4	65,4	65,4	34,7	0,0
1960	11	8,1	21,2	22,4	1,2	66,7	1,2	21,2	0,0
1960	12	2,3	3,7	41,3	37,6	75,0	8,3	3,7	29,3
1961	1	2,6	4,5	20,6	16,1	75,0	0,0	4,5	16,1
1961	2	6,2	14,6	0	-14,6	60,4	-14,6	14,6	0,0
1961	3	9,9	35,2	22,7	-12,5	47,9	-12,5	35,2	0,0
1961	4	13,7	59,4	32	-27,4	20,4	-27,4	59,4	0,0
1961	5	17,8	96,2	25,8	-70,4	0,0	-20,4	46,2	0,0
1961	6	20,4	117,1	1,4	-115,7	0,0	0,0	1,4	0,0
1961	7	23,9	148,1	22,5	-125,6	0,0	0,0	22,5	0,0
1961	9	22,3	110,2	22,9	-87,3	0,0	0,0	22,9	0,0

Tabla 4. Ejemplo de cálculo de ETR y lluvia útil: estación de Alameda de Cervera (4106) año hidrológico 1960-1961. ETP: evapotranspiración potencial; P: precipitación; H: humedad en el suelo; Δ : incremento; ETR: evapotranspiración real; Ll.út.: lluvia útil

NOMBRE ESTACIÓN	CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE MASA	CÓDIGO MASA
RUIDERA	4012	CAMPO DE MONTIEL	040.010
PANTANO DE PEÑARROYA	4014	CAMPO DE MONTIEL	040.010
NAHARROS	4041	LA OBISPALÍA	040.002
PUEBLA DE ALMORADIEL	4050	CONSUEGRA - VILLACAÑAS	040.004
CABEZAMESADA	4056	LILLO - QUINTANAR	040.003
VILLAFRANCA DE LOS CABALLEROS	4069	CONSUEGRA - VILLACAÑAS	040.004
VILLARES DEL SAZ	4075	SIERRA DE ALTOMIRA	040.001
VILLALGORDO DEL MARQUESADO	4079	SIERRA DE ALTOMIRA	040.001
SAN CLEMENTE	4090	RUS-VALDELOBOS	040.005
SOCUELLAMOS	4097	MANCHA OCCIDENTAL II	040.006
ALAMEDA DE CERVERA	4106	MANCHA OCCIDENTAL II	040.006
VILLARTA DE SAN JUAN	4109	MANCHA OCCIDENTAL I	040.007
CARRION DE CALATRAVA	4120	MANCHA OCCIDENTAL I	040.007
ALCOLEA DE CALATRAVA	4134	CAMPO DE CALATRAVA	040.009

Tabla 5. Estaciones meteorológicas estudiadas y masas de agua a que pertenecen

Cálculo de la infiltración

Para el estimar el valor de la infiltración en las masas de agua consideradas se ha aplicado una variante del método de Thornthwaite a las series termopluviométricas disponibles, mediante el programa THORDOS, que permite calcular los valores diarios de evaporación y lluvia útil, y la descomposición de ésta entre infiltración y escorrentía. Los principios en que se basa son los siguientes:

- Se calculan los valores diarios de la evaporación potencial, de forma similar a como se suelen determinar los valores mensuales de la misma, en las aplicaciones tradicionales del método de Thornthwaite.
- Se realizan balances diarios en los que se hacen intervenir las siguientes magnitudes: reserva almacenada en el suelo al final del día anterior, precipitación registrada en el día y evapotranspiración potencial diaria.
- Además de los correspondientes registros diarios de precipitación y temperatura media, los datos que se deben suministrar al programa son:
 - Índices F de iluminación mensual, expresados en unidades de 12 horas, dependientes de la latitud de la zona.
 - Valores supuestos para RMIN y RMAX, fijados en función de la naturaleza litológica del terreno y del grado de desarrollo del suelo vegetal. Valor estimado para la reserva inicial (RINI) del suelo fijado, teniendo en cuenta la pluviosidad de los días inmediatamente anteriores al de comienzo del periodo de cálculo. Para un periodo de cálculo suficientemente largo se toma 0 como valor inicial.

Respecto a la división de la lluvia útil entre escorrentía e infiltración, se han utilizado los parámetros α que se muestran en la tabla 6, que producen la relación entre lluvia útil e infiltración. Estos valores se han obtenido de forma experimental y se han aplicado con resultados satisfactorios en diferentes entornos hidrogeológicos.

Por último, para los parámetros de reserva útil máxima y mínima, RMAX y RMIN, se han utilizado los valores 110 y 90 mm respectivamente, que representan promedios bastante aproximados a la realidad según estudios elaborados anteriormente.

El cálculo de la fracción de superficie sensible a infiltración de cada masa de agua subterránea se ha realizado tomando la siguiente referencia: *Protección y mejora*

de la calidad de las aguas subterráneas en las unidades hidrogeológicas de la Cuenca Alta del Guadiana. Confederación Hidrográfica del Guadiana, EPTISA, INIMA. 2003.

LU (mm)	α	INF (mm)
5	0,85	4,25
15	0,71	10,65
25	0,623	15,575
35	0,56	19,6
45	0,508	22,86
55	0,465	25,575
65	0,426	27,69
75	0,394	29,55
85	0,363	30,855
95	0,336	31,92

Tabla 6.- Parámetros α para el cálculo de la infiltración

En este trabajo se sintetiza la información cartográfica de la cuenca alta del Guadiana, a escala 1:50.000, relativa a geología e hidrogeología, lo que ha permitido ir calculando la extensión de las superficies permeables. Así, se han obtenido los factores que se muestran en la tabla 7. Se ha considerado que los materiales clasificados como de permeabilidad media son permeables a efectos del cálculo.

Código	Nombre	Factor
040.001	Altomira	0,58
040.002	Obispalía	0,28
040.003	Lillo-Quintanar	0,62
040.004	Consuegra-Villacañas	0,53
040.005	Rus-Valdelobos	0,79
040.006	Mancha Occidental II	0,75
040.007	Mancha Occidental I	0,77
040.009	Calatrava	0,64
040.010	Montiel	0,76

Tabla 7.- Factores de permeabilidad

Análisis zonal de la evolución piezométrica

Como se ha mencionado en la introducción, durante el año hidrológico 2009/2010, se ha producido un episodio de precipitaciones notablemente superiores a los valores medios, hasta el momento de elaborar este in-

forme, durante los 6 primeros meses del año hidrológico (de octubre 2009 a marzo de 2010). La precipitación media en este periodo supera en la mayoría de las estaciones analizadas los 400 mm, con valores superiores a 500 mm en muchos casos. Es decir, durante la primera mitad del año hidrológico 2009/10 ya se ha producido una precipitación equivalente e incluso superior al valor medio anual de la serie histórica. Esta lluvia ha tenido lugar con especial intensidad en los meses de diciembre de 2009 y enero y febrero de 2010.

La distribución e intensidad de las precipitaciones en este corto periodo de tiempo da lugar a una situación climatológica que se produce con poca frecuencia y que, desde luego, influye de manera muy específica en la recarga de los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana.

Así, entre marzo de 2009 y marzo de 2010 (periodos de aguas altas) se ha producido una recuperación media en las MASb centrales de la CAG de casi 4 m. Si se compara el periodo marzo de 2009 a junio de 2010, la recuperación piezométrica media para las mismas MASb supone casi 6 m. Y si se comparan los dos últimos periodos de aguas bajas, 2009-2010, el incremento medio de nivel es de 10,34 m.

Con el objetivo de analizar con cierto detalle cómo se produce esta recarga, se ha realizado un análisis comparativo de la evolución piezométrica diaria en 10 piezómetros situados en las MASb: Mancha Occidental I, dos piezómetros (193020048 y 193040040); Mancha Occidental II, cinco puntos (213010123, 213010122, 222950028, 222880012 y 212880017); Rus-Valdelo-

bos, 1 punto (232870015) y Sierra de Altomira, 2 puntos (222830001 y 222830032), con la precipitación diaria en 1, 2 o 3 estaciones pluviométricas, según los casos, más próximas al punto de control en cuestión.

RESULTADOS OBTENIDOS

Resultados del estudio hidrometeorológico

Los mapas de isoyetas y lluvia útil, para años climatológicamente seco, medio y húmedo, se muestran en las figuras 6 a 11. La tabla 8 resume la información de dichos mapas, conteniendo, para cada MASb, los valores de precipitación y lluvia útil para cada tipo de año. Esta tabla se ha confeccionado multiplicando el resultado de la herramienta Zonal Statistics de ArcGIS por el área de píxel de la capa raster generada por la interpolación Spline.

La tabla 9 recoge los valores medios de precipitación anual en mm por MASb en función de la clasificación en año tipo climatológico.

Resultados de la estimación de la infiltración

La aplicación de la metodología descrita ha proporcionado para cada estación los valores de infiltración que se muestran en la tabla 10. Esta infiltración, una vez multiplicada por la superficie total y por el factor de superficie permeable hallado según la referencia mencionada, produce una recarga total para cada masa de agua, tabla 11.

Código	MASb	AÑO SECO		AÑO MEDIO		AÑO HÚMEDO	
		Precipitación (hm ³)	Lluvia útil (hm ³)	Precipitación (hm ³)	Lluvia útil (hm ³)	Precipitación (hm ³)	Lluvia útil (hm ³)
040.001	Sierra de Altomira	702,9	64,8	1068,8	230,1	1469,2	475,5
040.002	La Obispalía	169,9	28,7	272,1	86,6	377,2	173,3
040.003	Lillo - Quintanar	238,0	25,1	446,7	87,3	609,6	188,9
040.004	Consuegra - Villacañas	394,1	23,7	569,9	81,4	795,5	208,2
040.005	Rus - Valdelobos	526,7	45,9	739,9	181,3	986,6	319,7
040.006	Mancha Occidental II	651,5	28,7	939,5	158,1	1282,0	397,2
040.007	Mancha Occidental I	512,6	22,1	793,7	132,2	1102,0	369,9
040.008	Bullaque	180,2	19,9	283,2	74,9	406,5	184,3
040.009	Campo de Calatrava	575,3	42,4	840,5	171,7	1181,4	460,8
040.010	Campo de Montiel	681,1	62,2	1015,3	226,7	1363,1	507,6
040.011	Aluvial del Jabalón	13,3	1,2	20,1	4,5	26,4	9,3
040.012	Aluvial del Azuer	2,9	0,2	4,7	0,9	6,2	2,2

Tabla 8. Datos de precipitación y lluvia útil, en hm³, por masas de agua subterránea

Código	MASb	Superficie (km ²)	P año seco (mm)	P año medio (mm)	P año húmedo (mm)
040.001	Sierra de Altomira	2567,1	274	416	572
040.002	La Obispalía	497,4	341	547	758
040.003	Lillo - Quintanar	1.109,4	215	403	550
040.004	Consuegra - Villacañas	1.570,1	251	363	507
040.005	Rus - Valdelobos	1.565,7	336	473	630
040.006	Mancha Occidental II	2.393,5	272	393	536
040.007	Mancha Occidental I	2.004,0	256	396	550
040.008	Bullaque	565,1	319	501	719
040.009	Campo de Calatrava	1.961,7	293	428	602
040.010	Campo de Montiel	2.179,6	312	466	625
040.011	Aluvial del Jabalón	45,6	291	440	578
040.012	Aluvial del Azuer	10,6	278	444	586

Tabla 9. Datos de precipitación media, en mm, por masas de agua subterránea y año tipo

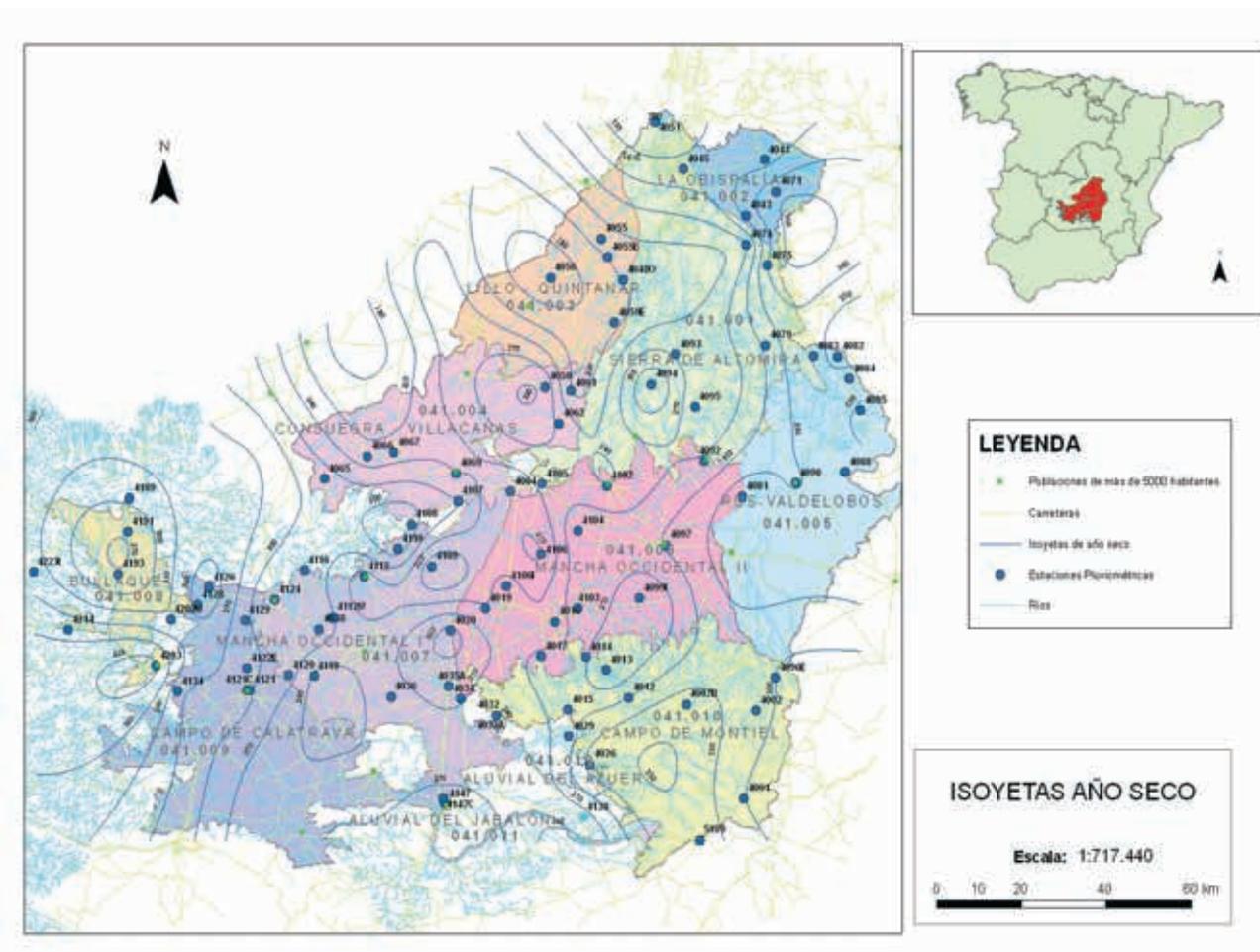


Figura 6. Isoyetas para año seco

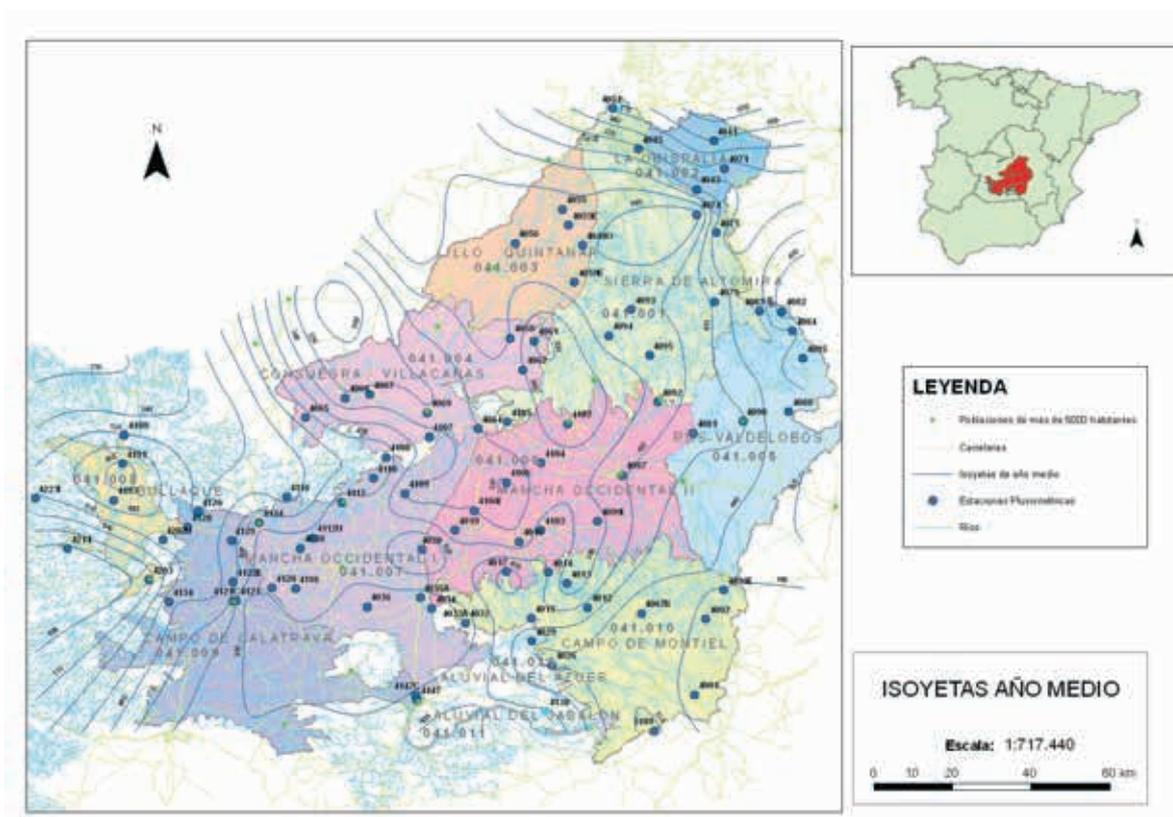


Figura 7. Isoyetas para año medio

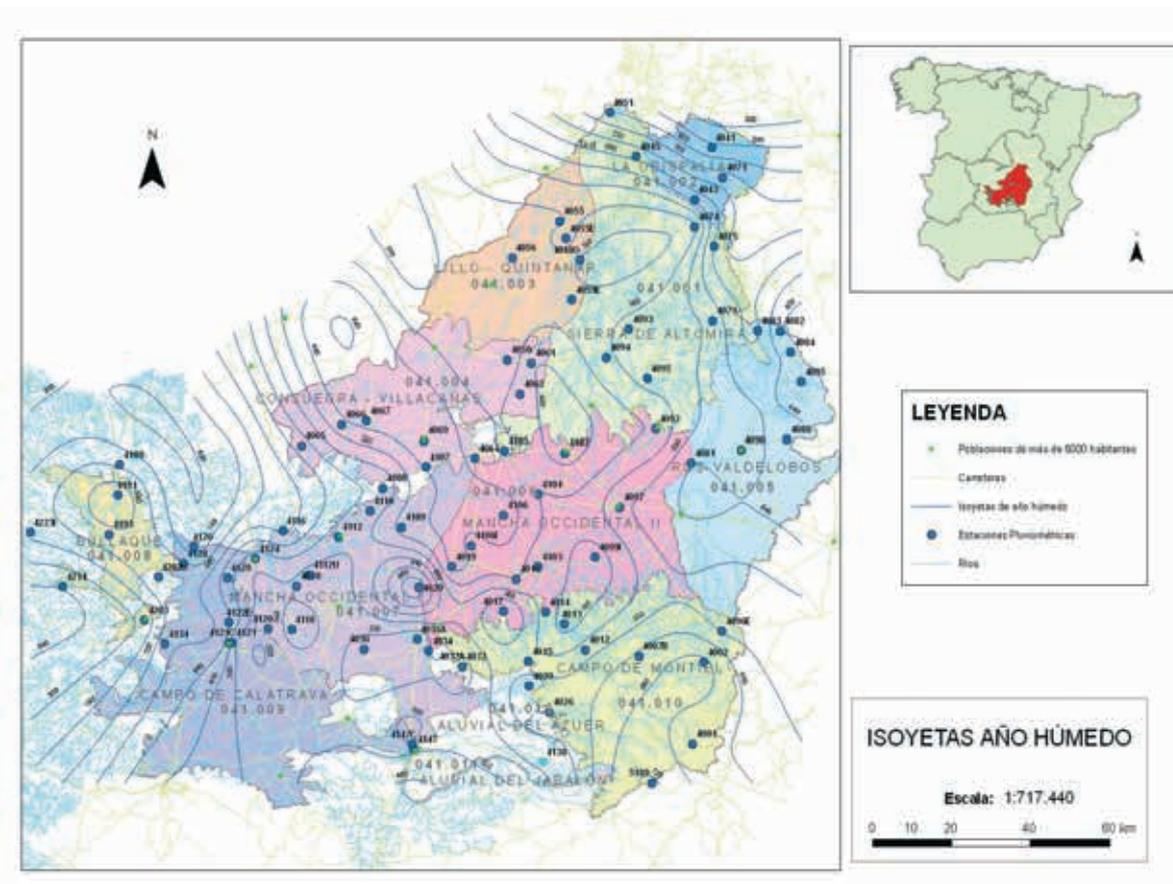


Figura 8. Isoyetas para año húmedo

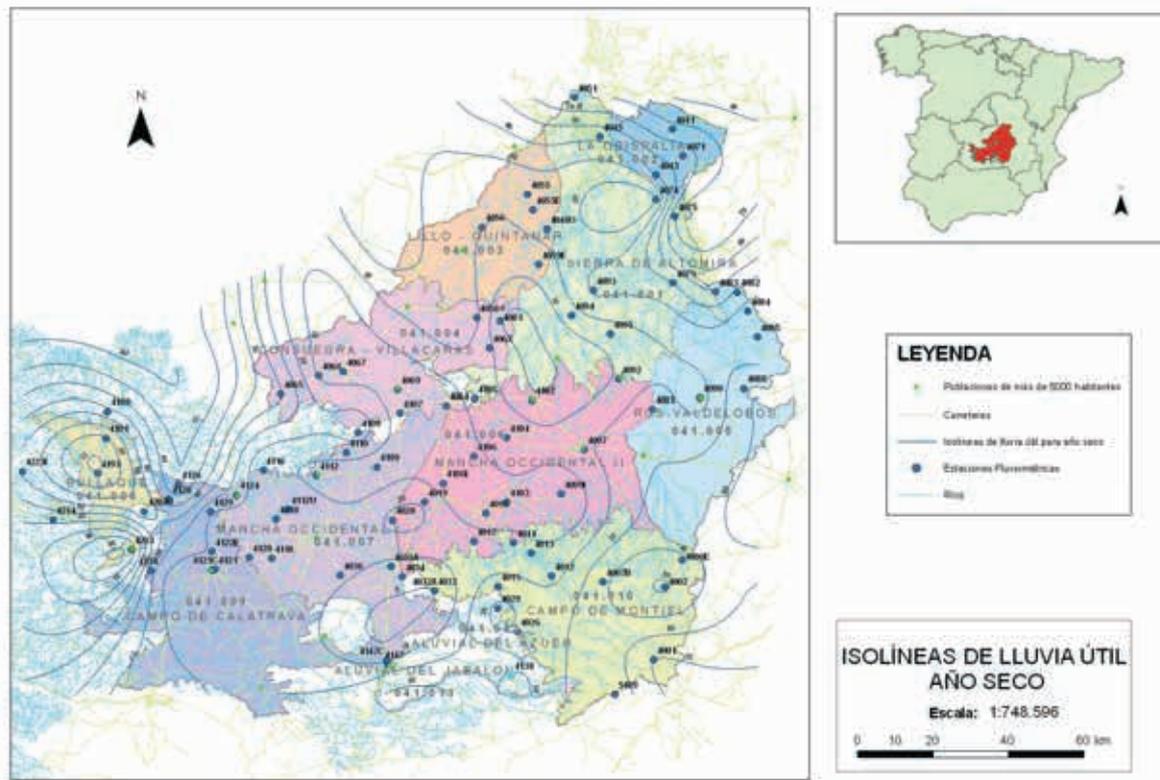


Figura 9.- Isohietas de lluvia útil para año seco

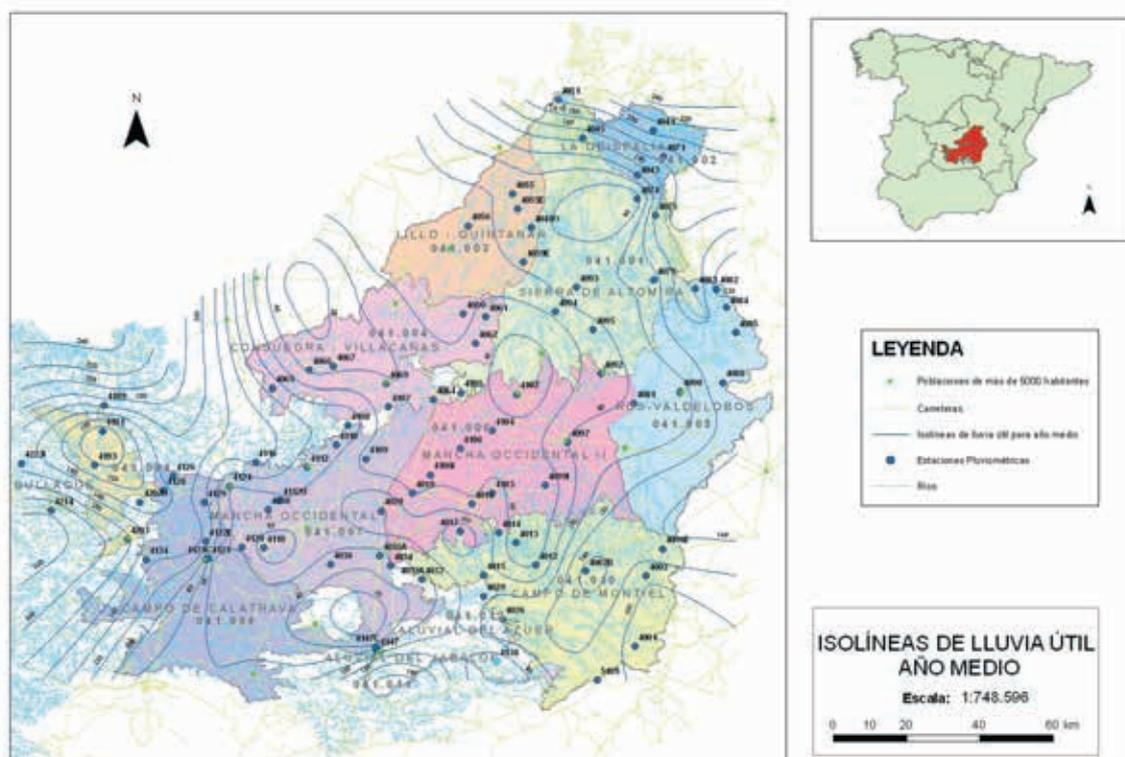


Figura 10.- Isohietas de lluvia útil para año medio

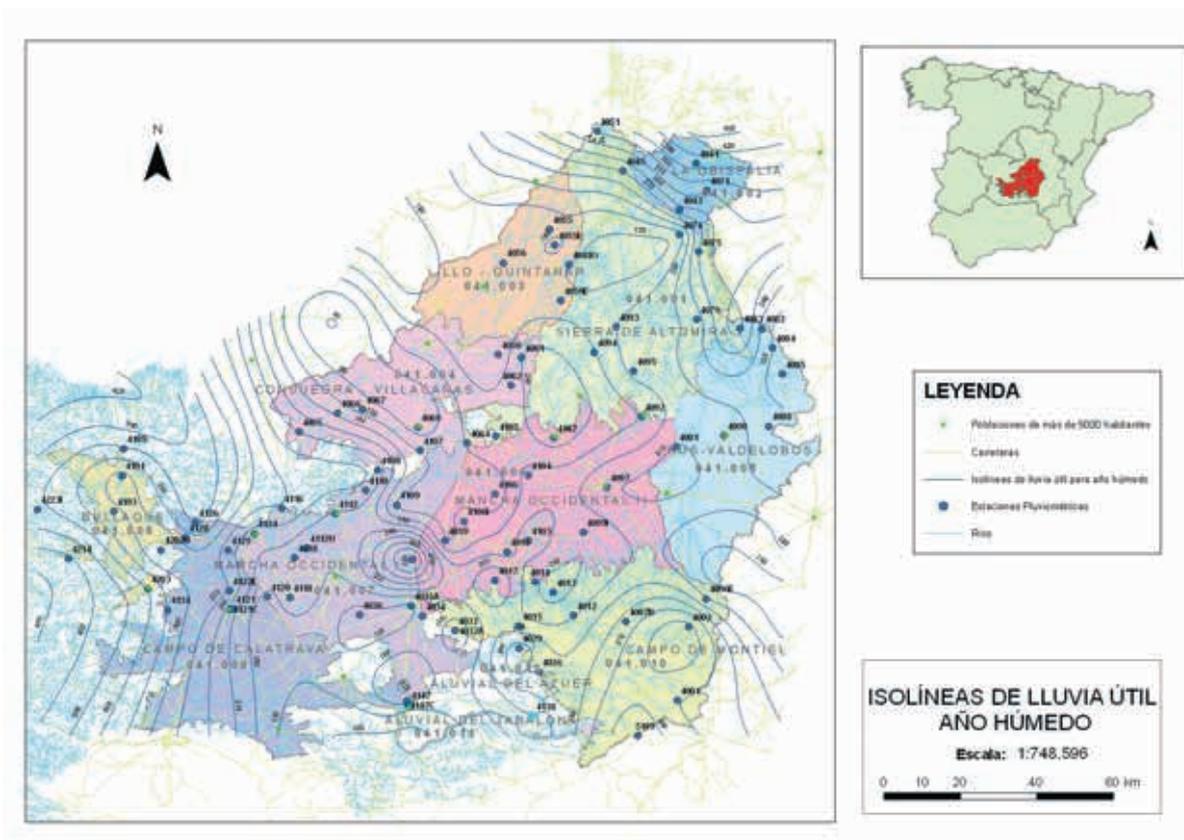


Figura 11.- Isolíneas de lluvia útil para año húmedo

Nombre	Código	P(mm)	T(°C)	ETP(mm)	ETR(mm)	LU(mm)	INF(mm)	ESC(mm)
Villares del Saz	4075	519,9	14,25	802,36	370,25	149,58	122,99	26,59
Villalgordo del Marquesado	4079	467,9	14,25	802,36	331,58	136,28	106,89	29,39
Naharros	4041	634,5	14,25	802,36	390,09	244,43	195,05	49,38
Cabezamesada	4056	422,2	14,25	802,36	333,64	88,51	75,28	13,23
Puebla de Almoradiel	4050	412,7	14,25	802,36	330,54	82,14	69,56	12,58
Villafranca de los Caballeros	4069	344	14,25	802,36	306,44	37,52	31,45	6,07
San Clemente	4090	455,3	14,25	802,36	350,39	104,76	87,81	16,95
Socuéllamos	4097	437,7	14,25	802,36	340,9	96,81	80,89	15,92
Alameda de Cervera	4106	346,4	14,25	802,36	297,28	49,12	42,41	6,71
Villarta de San Juan	4109	394,1	14,25	802,36	313,79	80,35	69,81	10,54
Carrión de Calatrava	4120	409,9	14,25	802,36	315,95	93,77	78	15,77
Alcolea de Calatrava	4134	493,1	14,25	802,36	324,8	168,26	134,62	33,64
Ruidera	4012	441,2	14,25	802,36	340,86	100,39	84,86	15,53
Pantano de Peñarroya	4014	428,1	14,25	802,36	342,87	85,23	72,67	12,57

Tabla 10. Resultados del cálculo de infiltración anual por estaciones pluviométricas. P: precipitación; T: temperatura; ETP: evapotranspiración potencial; ETR: evapotranspiración real; LU: lluvia útil; INF: infiltración; ESC: escorrentía

Código	Nombre	Infiltración (hm³/año)
040.001	Sierra de Altomira	143,7
040.002	La Obispalía	27,5
040.003	Lillo-Quintanar	49,3
040.004	Consuegra-Villacañas	35,4
040.005	Rus-Valdelobos	110,0
040.006	Mancha Occidental II	110,5
040.007	Mancha Occidental I	117,4
040.010	Campo de Montiel	133,0

Tabla 11. Resultado del cálculo de recarga por masas de agua

Resultados del análisis zonal de la evolución piezométrica

La tabla 12 resume los piezómetros y las estaciones pluviométricas utilizadas para su comparación, con la precipitación diaria en el período comprendido entre el 1 de noviembre de 2009 y finales de febrero, marzo o abril de 2010, en función de los datos diarios de precipitación disponibles.

ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA	PIEZÓMETRO	MASb
Argamasilla de Alba	213010123	MOII
	213010122	MOII
Argamasilla Alba (Pachecas)	213010123	
	213010122	
Socuéllamos (Las Rejas)	222950028	MOII
Tomelloso	213010123	
	213010122	
	222950028	
Las Tablas de Daimiel	193020048	MOI
	193040040	MOI
San Clemente	232870015	RV
	222880012	MOII
	222830001	SA
	222830032	SA
Arenales de San Gregorio	212880017	MOII
Villarta de San Juan	193040040	

Tabla 12. Piezómetros y estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis diario de la evolución piezométrica

En las figuras 12 a 27 se puede observar el mencionado análisis comparativo. Así, del punto 213010123, situado en el sector sudoccidental de la MASb Mancha Occidental II, se compara su evolución piezométrica

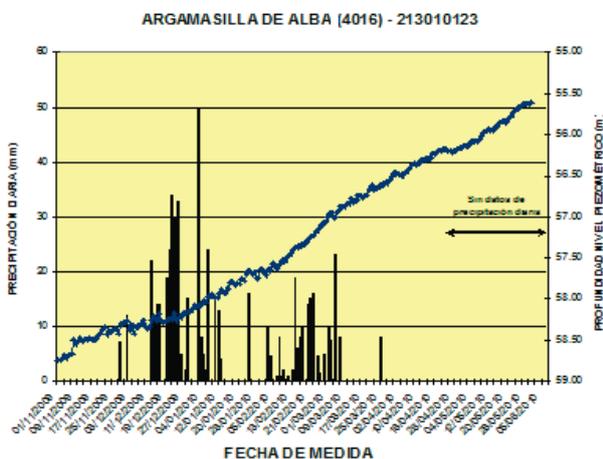


Figura 12. Evolución piezométrica diaria del punto 213010123

diaria con la precipitación diaria registrada en las estaciones meteorológicas: 4016 Argamasilla de Alba, 4017 Argamasilla de Alba Pachecas y 4103 Tomelloso. El piezómetro controla el acuífero inferior cretácico-jurásico. Entre el 29 de noviembre y el 2 de diciembre de 2009 se inician las fuertes precipitaciones, con valores superiores a 10 mm/día. Las precipitaciones más importantes se producen entre el 23 de diciembre de 2009 y el 3 de enero de 2010. A primeros de noviembre de 2009 el nivel piezométrico se encontraba a una profundidad de 58,74 m y se inicia una recta de recuperación que no presenta picos marcados de ascenso en los días más lluviosos, sino una tendencia continuada. A finales de mayo de 2010 el nivel se encontraba a 55,61 m, es decir una recuperación de 3,13 m, figuras 12, 13 y 14.

El punto 213010122 se sitúa muy próximo al anterior, pero controla el acuífero superior de edad neógeno. Su evolución se compara con la precipitación diaria en las mismas estaciones que el punto anterior. Evidentemente, con los mismos valores de precipitación la tendencia de evolución es muy similar en ambos. El nivel se encontraba a una profundidad de 60,80 m a primeros de noviembre, e inicia una recta de recuperación hasta alcanzar una subida de 3,35 m, también del mismo orden que el 213010123, figuras 15, 16 y 17.

El piezómetro 222950028 se sitúa en la zona centro meridional de la misma MASb. Controla el acuífero inferior, de edad jurásico. Se analiza su evolución con respecto a las estaciones: 4019I Socuéllamos Las Rejas y 4103 Tomelloso. En estas estaciones las precipitaciones superiores a 10 mm/día se inician entre el 30 de noviembre y el 2 de diciembre de 2009, con un máximo superior a 30 mm el 23 de diciembre de 2009.

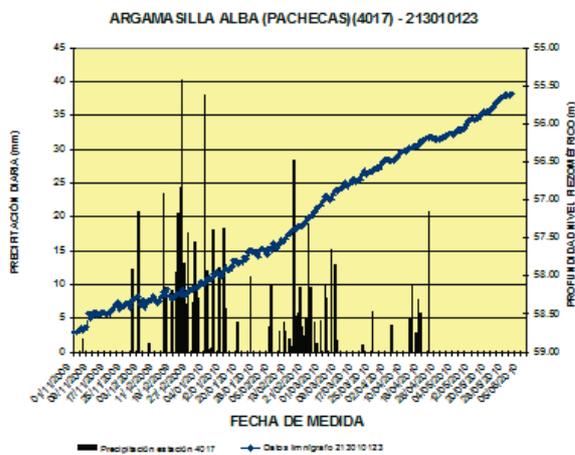


Figura 13. Evolución piezométrica diaria del punto 213010123

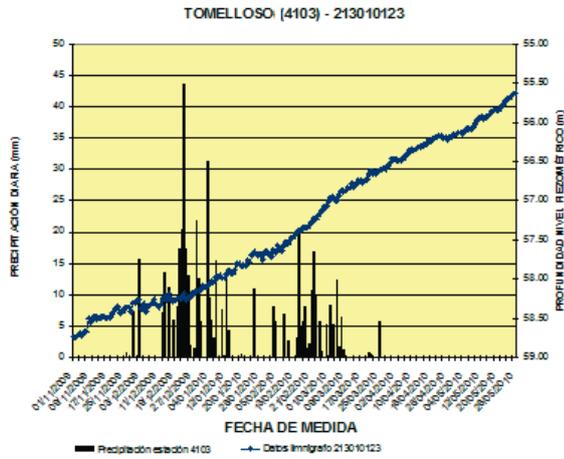


Figura 14. Evolución piezométrica diaria del punto 213010123

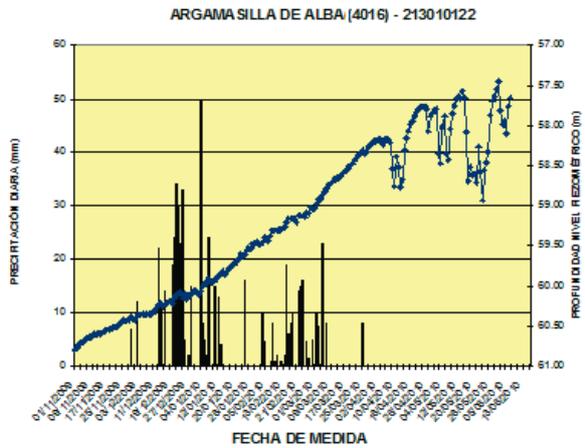


Figura 15. Evolución piezométrica diaria del punto 213010122

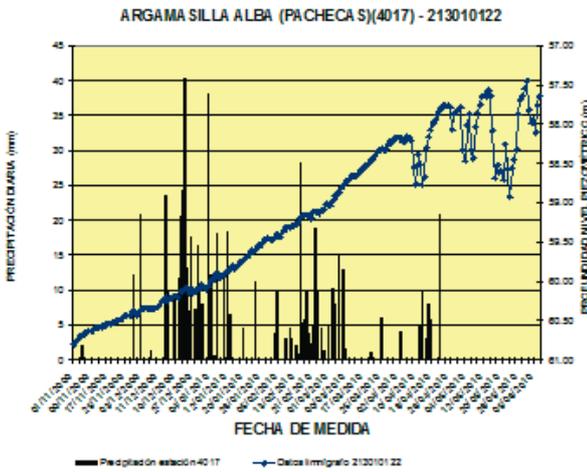


Figura 16. Evolución piezométrica diaria del punto 213010122

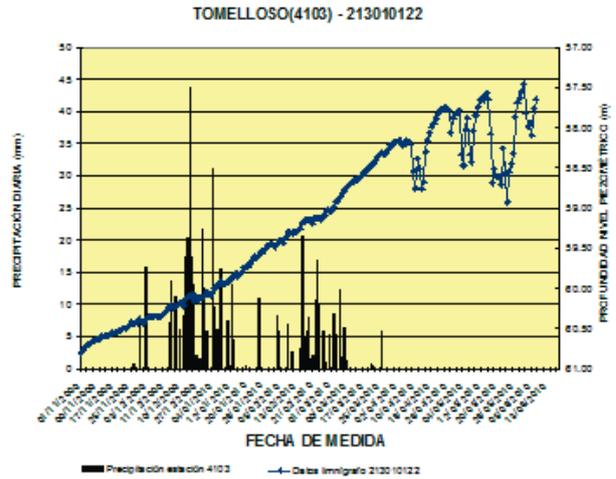


Figura 17. Evolución piezométrica diaria del punto 213010122

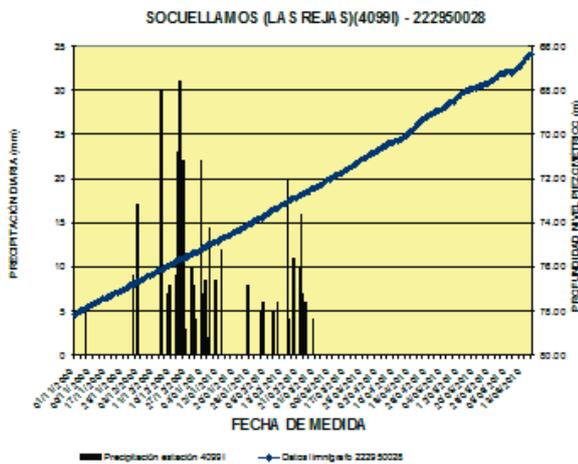


Figura 18. Evolución piezométrica diaria del punto 222950028

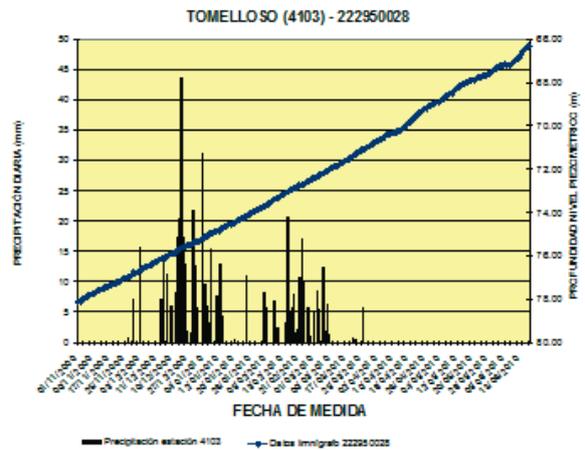


Figura 19. Evolución piezométrica diaria del punto 222950028

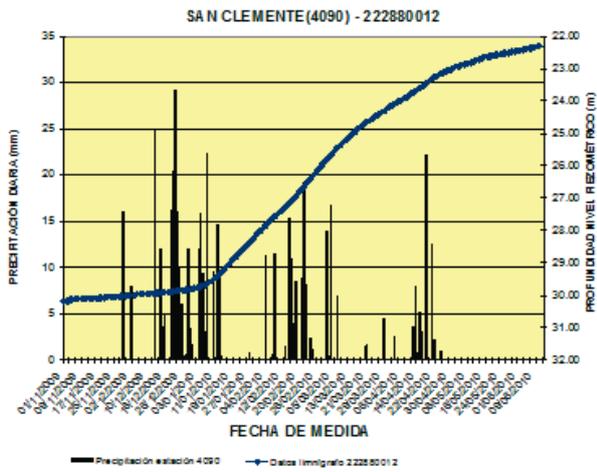


Figura 20. Evolución piezométrica diaria del punto 222880012

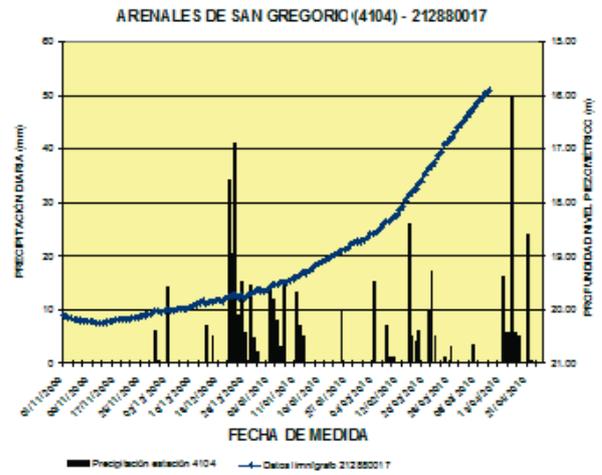


Figura 21. Evolución piezométrica diaria del punto 212880017

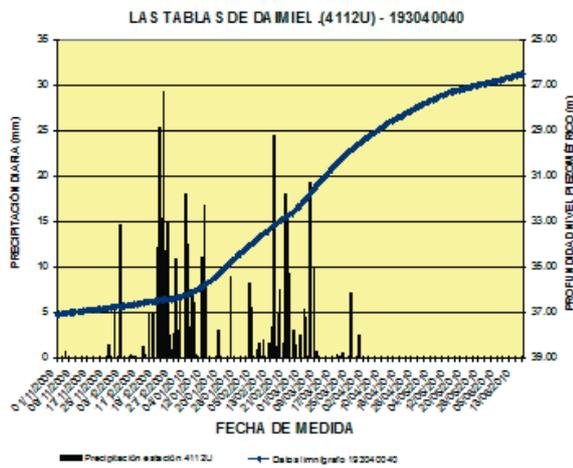


Figura 22. Evolución piezométrica diaria del punto 193020048

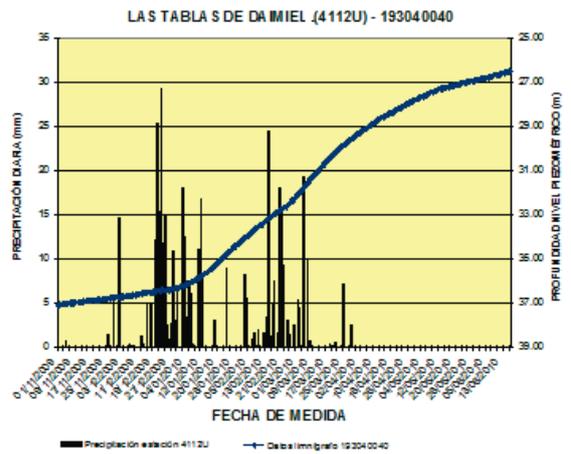


Figura 23. Evolución piezométrica diaria del punto 193040040

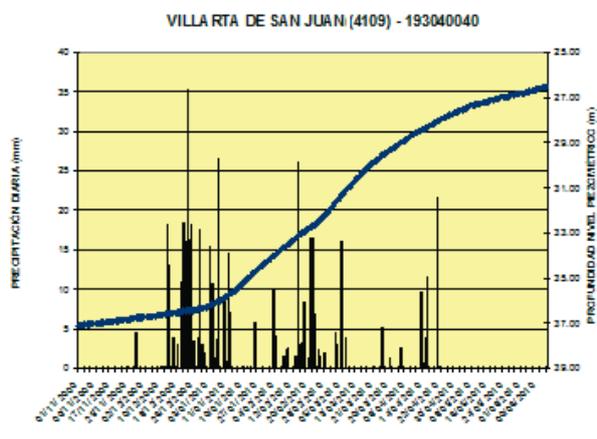


Figura 24. Evolución piezométrica diaria del punto 193040040

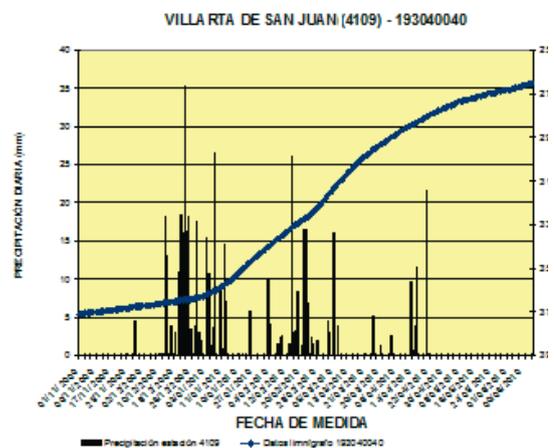


Figura 25. Evolución piezométrica diaria del punto 232870015

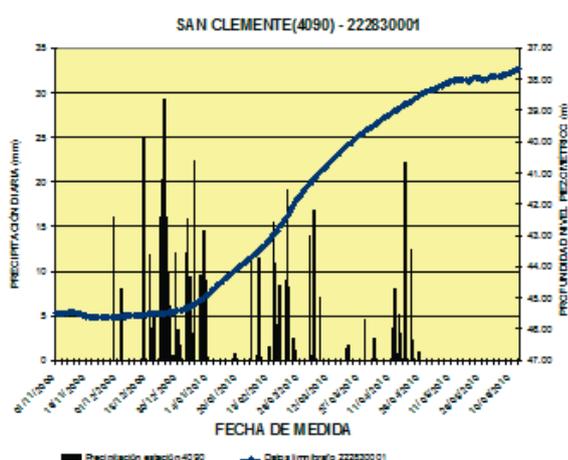


Figura 26. Evolución piezométrica diaria del punto 222830001

La recuperación viene representada por una recta continua ascendente, el nivel pasa de una profundidad de 78,15 m, antes de iniciarse las precipitaciones, a 66,34 m el 17 de junio de 2010; es decir, un ascenso de 11,81 m, figuras 18 y 19.

El punto 222880012 se sitúa en la zona nororiental de la MASb Mancha Occidental II, muy cerca del límite con la MASb Rus-Valdelobos. Controla el acuífero inferior, en este caso incluye niveles de edad cretácico y jurásico. La evolución se analiza con respecto a la estación meteorológica 4090 San Clemente. Las precipitaciones importantes se inician también el 29 de noviembre de 2009 con un máximo también el 23 de diciembre de 2009. La profundidad del nivel piezométrico se sitúa antes del inicio de las lluvias a 30,19 m. La recuperación tiene una ligera tendencia ascendente hasta principios de enero de 2010 (Martínez-Concha et al., 2011). Al finalizar el periodo de precipitaciones más intensas, del 23 de diciembre de 2009 al 12 de enero de 2010, la recta de recuperación sufre un brusco cambio de pendiente, para posteriormente ir suavizándose una vez finalizadas las lluvias intensas. La recuperación durante el periodo analizado es de 7,78 m, figura 20.

El último punto analizado en la MASb Mancha Occidental II es el 212880017, se sitúa en la zona central, tercio superior de dicha masa. No se dispone de datos precisos en relación con el nivel acuífero controlado, el sondeo atraviesa ambos acuíferos y, probablemente, se encuentre ranurado en ambos. La evolución se analiza con respecto a la estación 4104 Arenales de San Gregorio. El primer valor de precipitación superior a 10 mm/día se produce el 2 de diciembre de 2009 y los máximos entre el 21 y el 23 de diciembre. La recuperación viene repre-

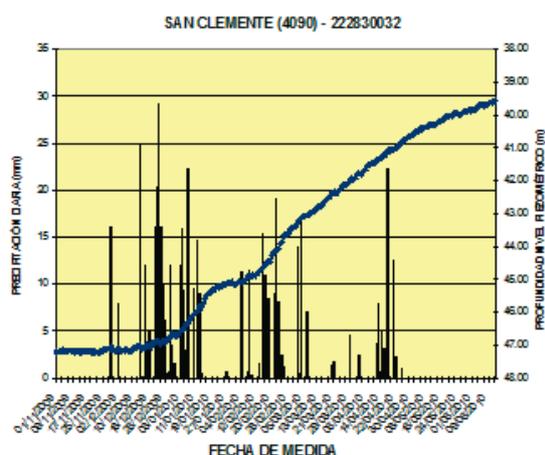


Figura 27. Evolución piezométrica diaria del punto 222830032

sentada por una curva ligeramente cóncava, iniciándose el ascenso más pronunciado a principios de febrero de 2010. El nivel se situaba a 20,27 m de profundidad el 12 de noviembre y a 15,86 m el 14 de marzo de 2010, es decir una recuperación de 4,41 m, figura 21.

En la MASb Mancha Occidental I se ha analizado la evolución de dos puntos de control. El piezómetro 193020048 se sitúa en el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, muy próximo a la superficie encharcada. Controla el acuífero carbonatado neógeno. Su evolución se analiza con respecto a la estación 4112U Las Tablas de Daimiel. Los valores altos de precipitación se inician el 2 de diciembre de 2009, los máximos del 21 al 23 de diciembre y durante la segunda quincena de febrero de 2010. El ascenso de nivel se inicia pocos días después de las máximas precipitaciones y se produce de manera muy rápida. Se pasa de una profundidad de nivel de 8,17 m el 1 de noviembre de 2009 a 1,14 m a primeros de marzo de 2010. En esta fecha el nivel alcanza su posición más alta, determinada por la lámina de agua superficial impuesta por Las Tablas, manteniéndose desde entonces en ese valor, figura 22.

El punto 193040040, situado en la misma MASb, muy próximo a los Ojos del Guadiana, se compara con los valores de precipitación diaria de las estaciones: 4112U Las Tablas de Daimiel y 4109 Villarta de San Juan. Controla también el acuífero carbonatado neógeno. Los valores altos de lluvia se producen en la primera estación a partir del 2 de diciembre y en la segunda a partir del 13 de diciembre de 2009. La curva de recuperación tiene una pendiente más pronunciada a partir del 11 de enero de 2010, transcurrido un mes desde el inicio de las precipitaciones importantes, hasta finales de marzo de 2010 en que se atenúa y se inicia un ascenso de nivel más

lento. El nivel pasa de una profundidad de 37,12 m el 1 de noviembre de 2009 a 26,54 m de profundidad a mediados de junio de 2010, es decir una recuperación de 10,58 m, figuras 23 y 24.

En la MASb Rus-Valdelobos sólo se cuenta con un piezómetro con datos diarios, el 232870015. Se sitúa en la franja central de la masa, próximo a su límite oriental con la cuenca del río Júcar. Su nivel corresponde al acuífero inferior, en su tramo del Lías (Jurásico Inferior). Se compara con los datos de precipitación de la estación 4090 San Clemente. Las precipitaciones importantes se inician el 29 de noviembre de 2009, con un máximo el 23 de diciembre de 2009, y continúa con precipitaciones notables hasta primeros de enero de 2010. Posteriormente, se producen unos días de escasas o nulas lluvias y otro grupo de fuertes precipitaciones desde primeros de febrero a primeros de marzo de 2010. A continuación, hay otro periodo de escasas lluvias hasta el 12 de abril, y vuelve a llover con cierta intensidad hasta el 21 de abril de 2010. La evolución piezométrica diaria refleja estos tres periodos de mayor precipitación y sus lapsos intermedios de escasa lluvia. La curva de ascenso tiene un aspecto sinusoidal con mayores ascensos en la parte final de los periodos de lluvia intensa. El nivel se situaba el 1 de noviembre de 2009 a 133,97 m de profundidad y asciende hasta 131,26 el 8 de mayo de 2010, tras finalizar el último periodo de precipitaciones importantes. A partir de esa fecha continúa un ascenso muy moderado, figura 25.

Por último, en la MASb Sierra de Altomira se analiza la evolución de los puntos de control 222830001 y 222830032 en relación con la estación 4090 San Clemente. Ambos puntos están muy próximos uno de otro y se sitúan en el límite sureste de la MASb, junto a la divisoria con la MASb Mancha Occidental II. Controlan el acuífero mesozoico. El primer tramo ascendente se inicia al finalizar el primer periodo de lluvias intensas, del 29 de noviembre de 2009 al 13 de enero de 2010. A partir de los primeros días de enero de 2010 se inicia un rápido ascenso de nivel que continúa hasta los datos tomados en junio de 2010. En el caso del punto 222830001 la profundidad del nivel correspondiente al 15 de noviembre de 2009 era de 45,57 m y el 12 de junio de 2010 se situaba a 37,70 m, siendo el ascenso total de 7,87 m. El punto 222830032 tenía para las mismas fechas la profundidad de 47,17 m y 39,59 m respectivamente, un ascenso por tanto de 7,58 m. En ambos puntos el ascenso parece continuar después de la última fecha mencionada, figuras 26 y 27.

CONSIDERACIONES FINALES

1.- A partir de los datos de precipitación y temperatura de 88 estaciones meteorológicas, distribuidas en las MASb que componen el subsistema Alto Guadiana, e incluyendo además la MASb 040-008 Bullaque, se ha realizado el completado de las mencionadas variables mediante correlación lineal.

Con estos datos se ha calculado la lluvia útil y la precipitación media por año tipo climatológico: seco, medio o húmedo para cada MASb de las incluidas en el estudio. Con los valores obtenidos se han dibujado los mapas de isoyetas y lluvia útil para cada año tipo.

Existen importantes diferencias en la precipitación media por MASb para cada tipo de año. Entre año tipo seco y húmedo, la diferencia de precipitación media viene a ser aproximadamente un factor de 2, y entre año medio y húmedo el factor es para todas las MASb entre 1,3 y 1,4.

Las MASb donde se producen más precipitación, para cualquier tipo de año, son por este orden: La Obispalía, Bullaque y Rus-Valdelobos; las que menos: Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Consuegra-Villacañas. El recorrido, o diferencia de precipitación en mm, entre la MASb con mayor precipitación y la de menor precipitación es, respectivamente, para año seco, medio y húmedo: 126 mm, 184 mm y 231 mm.

2.- A partir de los datos diarios de precipitación de las estaciones que se han considerado más representativas de cada MASb, en función de su porcentaje de datos y su situación, se ha calculado la infiltración procedente del agua de lluvia para cada MASb aplicando el programa THORDOS, que permite calcular los valores diarios de evaporación y lluvia útil, y la descomposición de ésta entre infiltración y escorrentía superficial.

Los valores medios de infiltración obtenidos, en $\text{hm}^3/\text{año}$, para cada MASb se han comparado con los valores obtenidos en otros estudios desarrollados por el IGME y la CHG, y en especial con el informe IGME, 2010.

Según este análisis comparativo los valores de infiltración obtenidos para las MASb: La Obispalía ($27,5 \text{ hm}^3/\text{año}$), Consuegra-Villacañas ($35,4 \text{ hm}^3/\text{año}$), Mancha Occidental II ($110,5 \text{ hm}^3/\text{año}$) y Campo de Montiel ($133 \text{ hm}^3/\text{año}$) son coherentes con los estimados en otros estudios y se ajustan bien a su balance hídrico. En el caso de las MASb: Sierra de Altomira ($143,7 \text{ hm}^3/\text{año}$),

Lillo-Quintanar (49,3 hm³/año) y Mancha Occidental I (117,4 hm³/año) presentan estimaciones elevadas en relación con otros estudios y más difíciles de ajustar en el balance. Por último, el valor de infiltración obtenido en la MASb Rus-Valdelobos (110 hm³/año) resulta mucho más alto de lo calculado hasta ahora, y no parece coherente con el balance hídrico de dicha masa.

Estas imprecisiones referidas en algunas masas pueden tener su explicación en los valores asignados a algunos de los parámetros necesarios para el cálculo establecido en el programa y que, por las limitaciones de tiempo, se han fijado de forma general a todas las masas. Quizás también alguna incertidumbre pueda provenir del cálculo de la superficie permeable para cada MASb, pese a haberse realizado con información a escala 1:50.000.

Los resultados de infiltración, obtenidos mediante la aplicación de este método, para cada MASb y para año climatológicamente de tipo medio resultan coherentes con otros valores estimados por el IGME en los casos de las MASb: La Obispalía, Consuegra-Villacañas, Mancha Occidental II y Campo de Montiel; resultan algo más elevados en los casos de las MASb: Sierra de Altomira, Lillo-Quintanar y Mancha Occidental I y no resulta coherente con estimaciones anteriores, triplicando prácticamente la infiltración calculada por otros métodos, el valor obtenido en el caso de la MASb Rus-Valdelobos.

Estas variaciones pueden tener su explicación en el cálculo de los parámetros R_{max} y R_{min} , que se han tomado como 110 y 90 mm. Estos parámetros dependen de las características de cada tipo de suelo, y se necesitaría un estudio pormenorizado para determinarlos con precisión, ajustar mejor los parámetros y particularizarlos para el tipo de suelo en cada estación y MASb.

3.- Por último, se ha llevado a cabo un estudio comparativo de la evolución piezométrica, en aquellos puntos que disponen de registro continuo de nivel, con la precipitación diaria de la estación o estaciones meteorológicas más próximas. Este análisis se ha realizado para puntos de control situados en las MASb: Mancha Occidental I, Mancha Occidental II, Rus-Valdelobos y Sierra de Altomira.

La comparación se ha hecho en el intervalo temporal correspondiente a los 6 primeros meses del año hidrológico 2009/10, de octubre 2009 a marzo 2010, sin poder extenderla a un lapso temporal mayor debido a la fecha de finalización del presente informe.

En términos generales, se puede concluir que los puntos de control piezométrico situados en la MASb Mancha Occidental II inician su recuperación coincidiendo con los valores altos de precipitación diaria, dibujando un hidrograma ascendente, que se mantiene hasta los últimos datos de nivel registrados en junio de 2010. El punto situado en la zona nororiental, 222880012, en las proximidades de las MASb Rus-Valdelobos y Sierra de Altomira, experimenta una recuperación más lenta al principio del periodo de lluvias intensas que se va posteriormente incrementando.

Se dispone de escasos datos y un lapso de tiempo muy corto para extraer conclusiones definitivas, pero parece existir una clara influencia en la mitad sur de la MASb Mancha Occidental II de la recarga procedente de la MASb situada al sur, Campo de Montiel, que favorece una recuperación más rápida que la que se produce en la mitad norte.

En la MASb Mancha Occidental I, el punto situado en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, 193020048, muy próximo al límite de la superficie encharcada, experimenta una recuperación muy rápida y coincidente con las precipitaciones y la evolución de la lámina de agua superficial, hasta adquirir un nivel determinado por ésta.

El punto situado en las proximidades de los Ojos del Guadiana, 193040040, inicia su recuperación algunos días después del inicio del periodo de lluvias intensas y al finalizar éste el ascenso se va moderando, aunque continúa la tendencia ascendente con posterioridad al periodo de precipitaciones importantes.

En la MASb Rus-Valdelobos se analiza la evolución de un punto situado en las proximidades del límite con la cuenca del Júcar. Su evolución refleja los periodos de lluvia intensa y los lapsos con menor o nula precipitación, respondiendo con relativa rapidez a estas variaciones.

Por último, con respecto a la MASb de Sierra de Altomira, los puntos de control estudiados se sitúan muy próximos al límite norte de la MASb Mancha Occidental II y, por tanto, claramente influenciados por la situación hidrogeológica de ésta. Su hidrograma tiene un cierto aspecto sinusoidal y tiende a disminuir su recuperación una vez finalizado el periodo de lluvias. Podría inducirse que la recarga que se produce desde el Norte hacia la MASb Mancha Occidental II resulta de mucha menor entidad que la que recibe desde el Sur, como se ha comentado anteriormente.

Este análisis resulta muy preliminar y, por la experiencia obtenida durante la evolución de anteriores periodos húmedos cortos, resulta necesario continuar el registro de datos y seguimiento de la evolución con posterioridad a la finalización del periodo húmedo, encuadrándolo en un espacio temporal más largo en el que se pueda analizar la influencia de la inercia hídrica de las diferentes MASb y los factores relacionados con la transferencia lateral entre las mismas.

No obstante, los datos obtenidos, la comparación con escenarios anteriores y el conocimiento hidrogeológico de la CAG permiten concluir que, en climas semiáridos, como el existente en la zona, la recarga se produce principalmente durante los cortos y esporádicos periodos húmedos, dando lugar entre éstos a una tendencia al descenso de los niveles que vuelven a recuperar, relativamente en función de las extracciones, en el siguiente periodo de precipitaciones intensas. Este proceso se ha

podido constatar en los periodos húmedos 1995/98, 2003/04 (en menor medida) y en el actual, 2009/10, aunque en el momento de elaborar este informe todavía no puede darse por finalizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- IGME, (2010). Estimación de los recursos disponibles para cada MASb de la cuenca alta del Guadiana, basada en el análisis de los informes y referencias bibliográficas precedentes y en los datos de infraestructura hidrogeológica y conocimiento experto del IGME.
- Martínez-Cortina, L.; Mejías, M.; Díaz-Muñoz, J. A.; Morales, R. y Ruiz-Hernández, J. M. (2011). "Cuantificación de recursos hídricos subterráneos en la cuenca alta del Guadiana. Consideraciones respecto a las definiciones de recursos renovables y disponibles". *Boletín Geológico y Minero*, 122 (1):17-36

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN FUTURA DEL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LA
CUENCA ALTA DEL GUADIANA A PARTIR DE DIFERENTES ESCENARIOS
METEOROLÓGICOS Y DE EXPLOTACIÓN

Luis Martínez Cortina



En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Estudio de la evolución futura del sistema hidrológico de la Cuenca Alta del Guadiana a partir de diferentes escenarios meteorológicos y de explotación*, llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

Luis Martínez Cortina
Miguel Mejías Moreno
María Elena Galindo Rodríguez

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN FUTURA DEL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA A PARTIR DE DIFERENTES ESCENARIOS METEOROLÓGICOS Y DE EXPLOTACIÓN

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del presente trabajo es analizar la posible evolución futura del sistema hidrológico de la cuenca alta del Guadiana (en adelante CAG) (Figura 1), y en concreto la viabilidad de la recuperación hidrológica y medioambiental de sus masas de agua y ecosistemas acuáticos asociados.

El trabajo prestará una especial atención a la posibilidad de cumplimiento de los plazos establecidos por la legislación (Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, DMA) para la recuperación de las masas de agua y ecosistemas, y por tanto tendrá como principales horizontes temporales los años 2015, 2021 y 2027. Sin embargo, no se centrará exclusivamente en ese cumplimiento, sino que analizará también las posibilidades y condicionantes existentes en cuanto a la recuperación y mantenimiento del sistema a largo plazo. En este sentido, se hará también una estimación, muy preliminar dado el estado del conocimiento existente al respecto, sobre la posible

repercusión hidrológica y medioambiental que el efecto del cambio climático podría tener a largo plazo.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

En trabajos elaborados con anterioridad por el IGME, se describían algunos aspectos generales relativos a la CAG, como su marco geográfico y administrativo, climatología, rasgos más característicos de su funcionamiento hidrológico y evolución en el tiempo, balances hídricos, etc IGME (2010). No se va aquí a insistir en dichas descripciones generales, salvo en algún tema concreto especialmente relevante a efectos del presente trabajo.

Un estudio sobre la previsible evolución futura de un sistema hidrológico ante determinados escenarios y actuaciones que se planteen, requiere, como punto de partida, un conocimiento adecuado del funcionamiento y comportamiento de dicho sistema, tanto a nivel conceptual como cuantitativo.



Figura 1. Mapa de la cuenca alta del río Guadiana, con la división en unidades hidrogeológicas y masas de agua subterránea.

Los acuíferos centrales de la CAG, de naturaleza detrítica y carbonatada, y que ocupan básicamente toda la Llanura Manchega, reúnen las características necesarias para llevar a cabo este análisis de evolución futura, tanto por sus características específicas como por el conocimiento que de los mismos se tiene. Estas características hacen que su respuesta a las acciones externas, tanto antrópicas (extracciones de agua subterránea principalmente), como no antrópicas (secuencias meteorológicas), sean relativamente moderadas desde el punto de vista de su influencia en los niveles piezométricos, al contrario de lo que sucede, por ejemplo, en el acuífero contiguo del Campo de Montiel, de marcado carácter kárstico. Esto ha permitido que esa zona, clave por otra parte en el comportamiento del conjunto de la CAG, haya sido modelada en diversas ocasiones con resultados muy aceptables en cuanto a su calibración, lo que ha supuesto una mejora en el conocimiento del sistema, tanto desde un punto de vista cualitativo, como especialmente cuantitativo. Estos valores históricos calibrados resultan esenciales para el planteamiento del presente trabajo, que pretende simular el comportamiento de futuro del sistema sin necesidad de desarrollar un nuevo modelo, y con una metodología empírica más fácilmente utilizable y revisable.

El análisis de la evolución futura del sistema hidrológico se ha hecho principalmente planteando diversos escenarios futuros en cuanto a las características climatológicas y a la extracción de aguas subterráneas de los acuíferos. Para la simulación de los diversos escenarios considerados se han utilizado modelos empíricos elaborados a partir de los datos, resultados y análisis procedentes de modelos numéricos desarrollados anteriormente (Martínez y Cortina 2001), y con los que se trata de simplificar los procesos físicos simulados. En concreto, a partir de los escenarios que se planteen definidos por precipitaciones y extracciones anuales, se calculará la correspondiente evolución de niveles piezométricos en un punto de referencia, que a su vez servirá de indicador de la situación hidrológica general del sistema.

Para la elaboración de los modelos empíricos que se van a utilizar, se ha evaluado el comportamiento de cada término del balance hídrico de forma cualitativa y cuantitativa, siempre en función de la situación en que se encuentre en cada momento el sistema hidrológico.

Términos del balance hídrico

De una forma muy resumida, puede comentarse lo siguiente respecto a cada una de las componentes del balance hídrico:

- *Recarga directa de la lluvia*. Es función de la precipitación y puede considerarse independiente de la situación en la que se encuentra el sistema. Por tanto, su valor medio a largo plazo se supone constante, excepto por la posible incidencia del cambio climático. El grueso de las simulaciones y análisis de escenarios se ha hecho sin la consideración del efecto del cambio climático, y para valorar la posible repercusión de dicho efecto se ha hecho una simulación en los escenarios denominados *de equilibrio*.
- *Recarga indirecta procedente de los ríos*. Este término del balance depende de la situación en la que se encuentra el sistema. Mientras está en una situación próxima al régimen natural, en la que existe conexión entre las corrientes superficiales y los acuíferos, y se mantienen las zonas de descarga *naturales*, los volúmenes infiltrados al acuífero oscilan moderadamente con respecto a unos valores medios. A medida que se produce la desconexión entre corrientes superficiales y acuíferos, y que el sistema puede considerarse en situación alterada, los valores totales de la recarga indirecta procedente de los ríos son más extremos (hay más zonas de recarga, pero un menor caudal circulante), especialmente en lo que se refiere a los valores altos.
- *Evapotranspiración*. La evapotranspiración producida desde el propio acuífero es uno de los elementos del balance hídrico que se ve más afectado por la alteración respecto a las condiciones naturales del sistema. La pérdida de numerosas zonas de descarga y de zonas húmedas dependientes de la aportación subterránea ha producido una reducción muy notable de la evapotranspiración.
Es un factor esencial en el análisis del comportamiento actual de los acuíferos y de su posible recuperación. Es importante tener presente que en los escenarios de futuro a analizar en los que se produzcan recuperaciones importantes del sistema, el valor de la evapotranspiración se irá incrementando a medida que se produzca dicha recuperación.
- *Drenaje a los ríos*. Este término se ve también profundamente afectado por las alteraciones respecto a una situación cercana al régimen natural.

Las pequeñas oscilaciones del nivel piezométrico en un acuífero que alimenta a la red de aguas superficiales suponen variaciones del caudal drenado. Incluso en régimen natural, los moderados descensos de los niveles piezométricos en periodos secos, producen una disminución significativa de los caudales de descarga.

En un régimen profundamente alterado, como en el ca-

so de la CAG, el volumen drenado a los ríos disminuye en mucha mayor medida. No se trata de moderados descensos piezométricos que reducen los caudales de descarga, sino de cambios absolutos de comportamiento en la relación acuífero-río, con desaparición de numerosas zonas de descarga.

— *Transferencias laterales entre acuíferos.* Estos términos del balance quedan anulados entre sí cuando se considera el conjunto cerrado de toda la CAG en lo que respecta a su divisoria hidrogeológica. Si se consideran aisladamente las distintas masas de agua subterránea hay que considerar las transferencias laterales que se producen entre ellas.

Estas transferencias también han experimentado ligeras modificaciones dependiendo de la situación del sistema, aunque esta variación es poco relevante en comparación con algunos de los términos anteriores. La transferencia subterránea más importante se produce de la masa de agua subterránea del Campo de Montiel a las centrales del sistema (Rus-Valdelobos, y especialmente Mancha Occidental II). Esta transferencia se ha incrementado como consecuencia de los importantes descensos piezométricos registrados en la Llanura Manchega, que han provocado un aumento del gradiente hidráulico.

— *Bombeos.* Son, evidentemente, un término fundamental en el balance hídrico de la CAG. Constituyen la principal acción antrópica que ha dado lugar a la profunda modificación del régimen natural del sistema. Asimismo, junto a la pluviometría, es el otro factor del que se van a plantear distintas hipótesis sobre su comportamiento futuro (en cuanto a los volúmenes extraídos), para analizar la viabilidad de la recuperación hídrica y medioambiental del sistema.

Si en términos científico-técnicos la cuantificación de algunos de los términos del balance hídrico es realmente compleja (por ejemplo: la recarga, la evapotranspiración o el drenaje de los acuíferos), cabría esperar que el volumen de agua subterránea bombeada de los acuíferos fuera un dato con el que se cuenta. Sin embargo, el grado de incertidumbre existente con respecto a dichos volúmenes es mucho mayor que el que parece esperable y recomendable. Esto dificulta de forma importante el proceso de calibración de los modelos desarrollados y utilizados, y en consecuencia también las previsiones que se hagan.

De ahí que una de las recomendaciones más necesarias que habría que hacer es la de poner los medios y meca-

nismos necesarios que permitan tener un control cuantitativo de las extracciones, espacial y temporalmente. En una cuenca con las características y connotaciones de la CAG, un conocimiento suficientemente aproximado de las extracciones reales debería marcarse como un objetivo inmediato, similar al conocimiento de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas, el de los niveles piezométricos en los puntos de la red de control, o el de los caudales de los ríos en las estaciones de aforos.

Análisis de evolución futura de la cuenca alta del Guadiana. Hipótesis y simplificaciones

El objetivo final es estimar de forma sencilla la evolución de los niveles piezométricos de la zona central de la CAG. De esta evolución dependerá la posible recuperación del sistema hidrológico en cuanto a las conexiones acuíferos-corrientes superficiales, con la consiguiente repercusión medioambiental.

Las simulaciones se realizarán en función simplemente de dos términos de los que se impondrán sus valores anuales a lo largo de toda la serie a simular: la precipitación, y el volumen de agua subterránea extraída en el conjunto de las tres masas centrales de la cuenca alta: Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos. En las series simuladas será necesario aportar estos dos valores para cada año. Cualquiera de ellos puede ser constante a lo largo de toda la serie simulada o variar anualmente.

La estimación así realizada asume una serie de hipótesis, y también de limitaciones, que permiten simplificar lo que en realidad es un proceso mucho más complejo. Sin embargo, las características de los acuíferos de la zona central, y el adecuado conocimiento de su modelo de funcionamiento hidrogeológico, permiten afirmar que los resultados obtenidos están dentro de unos márgenes de incertidumbre que pueden considerarse tolerables con el nivel de conocimiento existente, con la propia incertidumbre inherente a todo proceso hidrológico, y dentro del contexto de los objetivos perseguidos.

Así, cabe decir en primer lugar que la representación de la evolución de niveles piezométricos en la zona central de la cuenca se va a hacer en un punto en concreto. Este punto representativo seleccionado se sitúa en el término municipal de Manzanares, unos 20 km al sudeste de las Tablas de Daimiel, en la masa de agua subterránea de Mancha Occidental II, cerca de su límite con Mancha Occidental I. En ese lugar está ubicado el punto de control histórico de la Base de Datos Aguas

del IGME con número de inventario 203030001, y actual punto de la Red Oficial de Control de Aguas Subterráneas de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana, con código 04.04.272 (ver su situación geográfica en la Figura 1), del que se dispone de la serie histórica de evolución piezométrica. Corresponde a la zona donde mayores descensos históricos se han registrado, lo que favorece el proceso previo de calibración. Además, existe una correlación clara con las variaciones de los niveles piezométricos en las restantes zonas del acuífero, como por ejemplo la cercana de los Ojos del Guadiana (con descensos y ascensos ligeramente inferiores), lo que permite deducir a partir de este punto la situación en dicha zona, que a su vez constituye un indicador ideal de la posible recuperación hídrica de todo el sistema.

Otras simplificaciones importantes se producen con las extracciones de agua subterránea. La extracción que se utilizará como dato de entrada corresponde a la efectuada conjuntamente en las tres masas centrales de la cuenca: Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos. Aun con las importantes limitaciones e incertidumbre existentes en los datos históricos referentes a extracciones, hay que tener en cuenta que la evolución que se ha producido hasta la situación actual (y por tanto la analizada, cuantificada y calibrada) es producto de una determinada distribución de las extracciones, en cuanto a su situación geográfica y también al nivel acuífero de procedencia. Las estimaciones de futuro serán más válidas en la medida que dicha distribución no varíe mucho. En todo caso, también a este respecto la incertidumbre existente en cuanto al volumen de extracciones reales tiene mayor importancia que la incidencia que puedan tener cambios moderados en la distribución del total de las extracciones.

Puede estimarse en unos 350 Mm³/año el volumen de extracciones efectuado en el conjunto de las tres masas consideradas en los últimos años (en años de pluviometría media). Esta es la cifra que puede considerarse que a largo plazo mantendría los niveles piezométricos en la situación actual. De esa cifra, aproximadamente 145 Mm³/año se atribuyen a la masa de Mancha Occidental I, 170 Mm³/año a Mancha Occidental II, y 35 Mm³/año corresponderían a Rus-Valdelobos. De acuerdo con la hipótesis mencionada de mantenimiento de las distribuciones, cuando se haga referencia en este trabajo a los volúmenes de extracción, la distribución entre las masas debería ser proporcional a la referida, es decir, 41,4% correspondería a Mancha Occidental I, 48,6% a Mancha Occidental II, y 10% a Rus-Valdelobos.

Las restantes masas de agua subterránea de la CAG desempeñan un papel secundario a efectos del presente trabajo. La estimación de extracciones en el conjunto de todas ellas es de unos 50 Mm³/año. Se asume la hipótesis de que en las restantes masas se mantienen estos volúmenes. El aumento de las extracciones de forma importante podría condicionar aún más la recuperación medioambiental de la zona central de la CAG, que recibe, ya sea por escorrentía superficial o subterránea, las aportaciones de las masas laterales. Ese aumento haría que las aportaciones disminuyeran en mayor o menor medida. No obstante, la incidencia en cada caso debe ser objeto de un estudio particular.

En lo que respecta al valor introducido de precipitación anual, supone evidentemente una simplificación, tanto en cuanto a la distribución geográfica como especialmente a la temporal. En concreto, la forma en la que se produce la precipitación (en cuanto a la época del año, intensidad, duración, concentración geográfica y temporal, estado del suelo, etc.) tiene una incidencia directa en el comportamiento piezométrico, especialmente a nivel local. A este respecto hay que tener en cuenta que la evolución piezométrica histórica analizada y calibrada responde a todo este conjunto de episodios de precipitación de muy diferente tipo que se han producido históricamente. El análisis de los escenarios futuros será por tanto más fiable cuanto mayor sea su horizonte temporal, y por tanto más tiendan a compensarse unos tipos de episodios de lluvias con otros. Si se consideran aisladamente los valores de un solo año pueden producirse desviaciones importantes de lo simulado con respecto a la respuesta real.

Escenarios considerados

Se definen a continuación los criterios y escenarios elegidos para ser simulados y analizados posteriormente. Se ha pretendido que el conjunto de escenarios simulados permita tener una idea clara de la posible evolución futura del sistema hidrológico de la CAG en función de la explotación de agua subterránea que se realice, y en concreto de las posibilidades existentes en cuanto a su recuperación hidrológica y medioambiental.

Horizontes temporales analizados

Como se comentó anteriormente, el presente trabajo pretende dar respuesta a las posibilidades reales de cumplir las exigencias establecidas a partir de la entrada en vigor de la DMA, en cuanto a la recuperación medioambiental de las masas de agua y de los ecosiste-

mas acuáticos asociados. En consecuencia, los horizontes temporales que van a definirse para su análisis se corresponden con hitos establecidos en el propio proceso de planificación (años 2015, 2021 y 2027).

La fecha tomada como inicio de las simulaciones de escenarios fue la del 1 de octubre de 2010 (inicio del año hidrológico 2010/11). Por tanto, y a efectos de trabajar con años hidrológicos, se consideró el 2010/11 como primer año de la simulación, y se establecerán horizontes temporales hasta los años 2014/15 (5 años), 2020/21 (11 años), y 2026/27 (17 años) (tabla 1).

Periodo considerado	Duración del periodo
Octubre 2010-Septiembre 2015	5 años
Octubre 2010-Septiembre 2021	11 años
Octubre 2010-Septiembre 2027	17 años

Tabla 1. Horizontes temporales considerados para la simulación de escenarios.

Escenarios meteorológicos

En general, la simulación en el tiempo de procesos de flujo subterráneo utilizando un valor constante medio de la recarga puede conducir a una distorsión importante de los resultados finales. En climas como el de la CAG esto se hace más evidente, puesto que las puntas importantes de recarga se producen sólo en años de pluviometría muy alta, mientras que en años secos los valores de la recarga se reducen a valores mínimos. Este hecho se ha puesto de manifiesto en modelos numéricos previos desarrollados sobre el conjunto de acuíferos de la CAG.

Por ello se optó por simular los escenarios futuros utilizando series reales de precipitación. Así, y teniendo en cuenta los horizontes temporales a analizar (los 5, 11 y

17 años correspondientes hasta 2015, 2021 y 2027) (tabla 1), se seleccionaron en cada caso las series temporales históricas de dicha duración más húmeda, más seca, y dos de valores medios (con menor y mayor desviación típica). Como valores de la serie histórica de precipitación se consideraron los medios anuales calculados para toda la superficie de la CAG.

De esta forma se obtuvieron los escenarios meteorológicos a utilizar en las simulaciones correspondientes a los tres horizontes temporales considerados. La tabla 2 resume dichos escenarios, mostrando en cada caso la serie histórica que se considera representativa, con el valor medio de la precipitación en esa serie y la desviación respecto al valor medio de 419 mm/año. Para la elección de secuencias históricas medias, se ha impuesto como condición que el valor medio de precipitación de la serie esté como máximo un 2% por encima o por debajo del valor medio de 419 mm/año. Esto determina un rango comprendido entre 410 y 428 mm/año.

Escenarios de explotación

Se han elegido una serie de escenarios de explotación que están referidos a las extracciones de agua subterránea (para todos los usos) en el conjunto de las tres masas de agua subterránea de la zona central de la CAG (Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdeobos). Evidentemente se podrían haber simulado otros, pero se ha considerado que los seleccionados cumplen globalmente el objetivo requerido. Por otra parte hay escenarios extremos que no han sido simulados, pero que conducirían a resultados fácilmente deducibles a la vista de las consideraciones del presente estudio o de los resultados obtenidos en él.

Así, cualquier escenario de futuro en el que las extracciones de agua subterránea en el conjunto de las tres masas centrales de la cuenca alta no se sitúen por debajo de los 350 Mm³/año, no producen a medio o largo plazo

Tabla 2. Series representativas utilizadas en la simulación para cada uno de los horizontes temporales considerados, y en cada escenario meteorológico planteado.

Horizonte temporal	2010/11-2014/15 (5 años)	2010/11-2020/21 (11 años)	2010/11-2026/27 (17 años)
Serie húmeda	1958/59-1962/63 526 mm/año (+26%)	1958/59-1968/69 480 mm/año (+15%)	1955/56-1971/72 459 mm/año (+10%)
Serie seca	1990/91-1994/95 330 mm/año (-21%)	1943/44-1953/54 375 mm/año (-11%)	1941/42-1957/58 376 mm/año (-10%)
Serie media (con menor desviación típica)	1932/33-1936/37 418 mm/año	1969/70-1979/80 427 mm/año	1973/74-1989/90 414 mm/año
Serie media (con ma- yor desviación típica)	1994/95-1998/99 425 mm/año	1994/95-2004/05 421 mm/año	1936/37-1952/53 410 mm/año

recuperaciones del nivel piezométrico de los acuíferos. Lógicamente, cuanto mayor sea el volumen extraído por encima de esa cifra, mayores serán los descensos adicionales a los ya existentes, pero en cualquier caso, desde el punto de vista que aquí se pretende analizar de posibilidad de cumplimiento de la recuperación medioambiental en la línea de lo establecido por la DMA, esta no será posible en ningún caso por encima de esa cifra.

En el extremo contrario, y desde un punto de vista más teórico que realista, hay que señalar que un hipotético cese absoluto de las extracciones (para todos los usos) produciría a medio plazo una recuperación total de los niveles piezométricos en los acuíferos, y por tanto de sus descargas y de la superficie de zonas húmedas. Tanto los niveles de equilibrio alcanzados, como las descargas y la extensión de las zonas húmedas llegarían a ser incluso superiores a las *históricamente conocidas*, dado que puede estimarse en unos 50-60 Mm³/año el volumen de extracciones que ya existía a mediados del pasado siglo. Esa explotación se realizaba desde mucho tiempo antes mediante la utilización de norias.

En los escenarios de explotación planteados se ha partido, o bien del valor de 350 Mm³/año, o bien directamente desde valores más bajos (275 o 230 Mm³/año), que proporcionarían ya desde el principio una tendencia a la recuperación piezométrica.

A efectos de nomenclatura y resumen posterior se utilizarán como abreviaturas de los escenarios de extracciones las siguientes: CTE-X (extracción mantenida constante en una cifra de X Mm³/año), ESC-X/Y/Z (escalones de extracción de volúmenes X, Y, Z en cada uno de los periodos de 5 ó 6 años comprendidos hasta 2015, 2021 y 2027), GRA-X_Y/Z (extracción disminuyendo anualmente desde un volumen X, a razón de Y Mm³/año hasta alcanzar —si la duración del periodo considerado lo permite— un volumen Z, que luego permanece constante).

En concreto, los escenarios de extracción de aguas subterráneas que se han simulado y analizado, en combinación con los escenarios meteorológicos anteriormente descritos, y con los diferentes horizontes temporales planteados, son los siguientes:

- CTE-350: Extracción mantenida en el tiempo de 350 Mm³/año.
- CTE-275: Extracción mantenida en el tiempo de 275 Mm³/año.

- GRA-350_25/100: Extracción comenzando en 350 Mm³/año y descenso gradual de 25 Mm³/año hasta llegar a una extracción de 100 Mm³/año, que luego se mantiene constante.
- GRA-275_5: Extracción comenzando en 275 Mm³/año y descenso gradual muy moderado de 5 Mm³/año (se llega a una extracción de 195 Mm³/año al final de la simulación de 17 años).
- ESC-275/200/150: Escalones de extracción: 5 primeros años de 275 Mm³/año; los 6 siguientes con extracción de 200 Mm³/año; los 6 últimos con extracción de 150 Mm³/año.
- ESC-230/190/150: Escalones de extracción: 5 primeros años de 230 Mm³/año; los 6 siguientes con extracción de 190 Mm³/año; los 6 últimos con extracción de 150 Mm³/año.

Hay que tener en cuenta las diferencias existentes entre los escenarios según el horizonte temporal que se simule, puesto que a cada caso le corresponden series meteorológicas distintas. Por ejemplo, los escenarios CTE-275 con horizonte 2015, y CTE-275 con horizonte 2027 no son coincidentes en el periodo común hasta 2015, al simular series de precipitación diferentes.

Escenarios de cambio climático

Tanto desde un punto de vista científico como de gestión de los recursos, la posible incidencia del cambio climático ha de ser considerada en cualquier análisis que hoy día se efectúe relacionado con el comportamiento futuro de un sistema hidrológico. Si bien las bases científicas de la evidencia de un cambio climático parecen cada día más claras, existen grandes incertidumbres en los modelos actuales sobre las repercusiones futuras de dicho cambio climático a escala regional.

Por otra parte hay que considerar las características particulares que confluyen en las aguas subterráneas y en la CAG. Estas características hacen que desde un punto de vista hidrogeológico las recargas importantes se produzcan de manera esencial sólo en años notablemente húmedos. Así, una previsible distribución más extrema de la pluviometría, como apuntan la mayor parte de modelos climáticos, puede beneficiar dichas puntas de recarga, compensando en cierta medida la posible disminución de las precipitaciones.

La Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) establece que para incorporar el efecto del cambio climático en la Demarcación del Guadiana, debe considerarse una disminución con respecto a la aportación natural de re-

ferencia del 11%. No existe ninguna otra consideración o recomendación específicamente relacionada con el recurso subterráneo.

En principio, en las simulaciones que alcanzan como horizonte temporal el año 2027, que tratan de reproducir la posible recuperación de los niveles piezométricos, no parece necesario tener en cuenta una reducción de las aportaciones, que por otra parte están estimadas con los datos obtenidos durante las últimas décadas. Además, su aplicación no sería clara de repercutir cuando estamos simulando básicamente el funcionamiento hidrogeológico.

Sin embargo, con vista a un análisis de la situación del sistema hidrológico a largo plazo, y especialmente para conocer la incidencia del cambio climático en una situación más o menos *recuperada* del sistema, va a ser necesario en el futuro analizar todos los datos y la evolución que al respecto se vaya produciendo, lo que contribuirá a su vez a mejorar la fiabilidad de los modelos regionales de cambio climático.

Debido a esta posible importancia de los efectos del cambio climático a largo plazo, se va a considerar en el presente trabajo una simulación con el horizonte temporal de 2027, en la que ya desde el principio se tenga en cuenta la repercusión del cambio climático, asignando el 11% que señala la IPH a una reducción en dicho porcentaje de la recarga media anual. Estas simulaciones se van a realizar con valores medios anuales de la precipitación (y por tanto de la recarga), y para distintos valores de la extracción anual mantenida constante en el tiempo, lo que permitirá analizar la repercusión que el cambio climático va a tener para cada escenario de explotación, con esta hipótesis, en los niveles piezométricos de equilibrio (los que se alcanzarían a largo plazo en una situación estabilizada del balance, sin considerar la variabilidad meteorológica).

RESULTADOS OBTENIDOS. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Escenarios meteorológicos y de explotación para cada horizonte temporal

Se analizaron los resultados obtenidos al simular diferentes combinaciones entre los escenarios descritos anteriormente y referidos a meteorología (pluviometría) y explotación de los acuíferos (extracción de aguas subterráneas), para cada escenario temporal considerado

(2015, 2021 y 2027), y teniendo siempre presentes las hipótesis y limitaciones que anteriormente fueron descritas.

En las gráficas de evolución piezométrica de los escenarios simulados (Figuras 2 a 4) se han representado puntualmente valores piezométricos históricos anuales correspondientes al punto de control considerado (puntos verdes) para poder apreciar las desviaciones producidas con respecto a la simulación efectuada en el periodo histórico. Se han representado también en la gráfica los valores correspondientes a otros dos puntos: 212910019 del IGME (04.04.019 de la Red Oficial) (puntos rojos), situado en el término municipal de Alcázar de San Juan, más hacia el nordeste de la Llanura Manchega; y 193040040 del IGME (04.04.031 de la Red Oficial) (puntos azules), situado en Villarrubia de los Ojos, en la zona donde se localizaban los Ojos del Guadiana. Aun con las diferencias existentes puede apreciarse como el comportamiento en estos puntos es bastante similar.

En dichas gráficas de los escenarios analizados se han trazado asimismo dos líneas horizontales de trazo discontinuo ligeramente por encima de las cotas de 620 y 630 m s.n.m. La línea superior (en color verde) indicaría, de forma aproximada, el nivel de referencia que correspondería en ese punto a una situación teórica media en la que no se extrajera agua del acuífero (para ningún uso). Por su parte, la línea naranja pretende representar una cota por debajo de la cual los acuíferos quedan descolgados totalmente de las corrientes superficiales (en un significado extrapolado de forma aproximada para las zonas de descarga). Aproximadamente por encima de esa cota podría empezar a hablarse de recuperaciones desde el punto de vista de la conexión del acuífero con ríos y zonas húmedas. Son simplemente líneas aproximadas de referencia que deben interpretarse de forma meramente orientativa.

La línea vertical de trazos situada en 2009/10 separa en cada gráfica la zona correspondiente a la simulación histórica de la simulación de futuro. En cada gráfica se representan las simulaciones de futuro para cada uno de los tres escenarios meteorológicos: húmedo, medio o seco (en colores azul, marrón y rojo respectivamente), correspondientes al horizonte temporal analizado. Esto nos permitirá tener una idea de la evolución previsible de los niveles acotándola entre dos situaciones extremas, correspondientes al óptimo y pésimo histórico registrado durante un periodo de tiempo equivalente al analizado, desde el punto de vista de las aportaciones

procedentes de la lluvia. Para analizar las expectativas de lo que se puede esperar del sistema en cuanto a su posible recuperación conviene fijarse más en el escenario meteorológico medio. Hay que tener en cuenta que los otros dos responden a los comportamientos extremos que ha tenido la precipitación en toda la serie histórica en periodos de 5, 11 o 17 años. A largo plazo, los valores van lógicamente acercándose más a la media. En todos los casos se ha dibujado sólo la evolución en uno de los dos escenarios meteorológicos medios (el de menor desviación típica), al comprobarse que aunque la evolución difiera con respecto al otro escenario (el de desviación típica máxima), los resultados obtenidos al final de cada periodo simulado son prácticamente coincidentes.

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran, a modo de ejemplo entre las numerosas realizadas, tres simulaciones correspondientes respectivamente a cada uno de los horizontes temporales considerados (2015, 2021 y 2027), y con

unos determinados escenarios de explotación en cada caso, indicados en los pies de las figuras.

En la figura 2 se representa la simulación correspondiente a unas extracciones constantes de 275 Mm³ para el horizonte temporal 2015. Como ejemplo para el horizonte temporal 2021 se representa un escenario con dos escalones de extracciones: 275 Mm³/año hasta el 2015 (como en el caso anterior) y 200 Mm³/año en los seis años siguientes hasta el 2021. Por último, se muestra para el caso del horizonte temporal 2027 un escenario muy ambicioso desde el punto de vista de la reducción de las extracciones, que parte de una extracción de 350 Mm³/año en 2010/11 y va disminuyendo gradualmente a razón de 25 Mm³/año, hasta los 100 Mm³/año, que se alcanzarían en 2020/21, manteniéndose constante posteriormente.

Al final de este apartado de resultados se incluye un subapartado con una tabla-resumen de todos los esce-

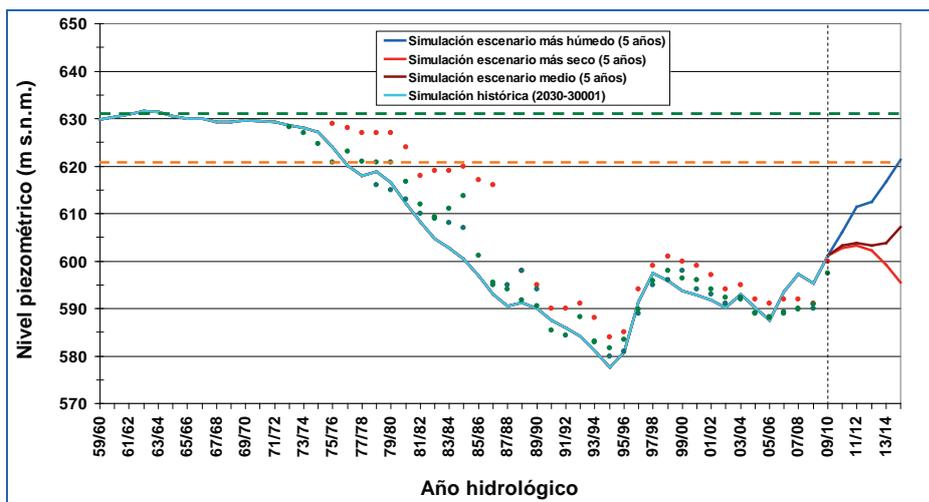


Figura 2. Simulación periodo 2010/11-2014/15. Escenario de explotación: extracción constante de 275 Mm³/año (CTE-275).

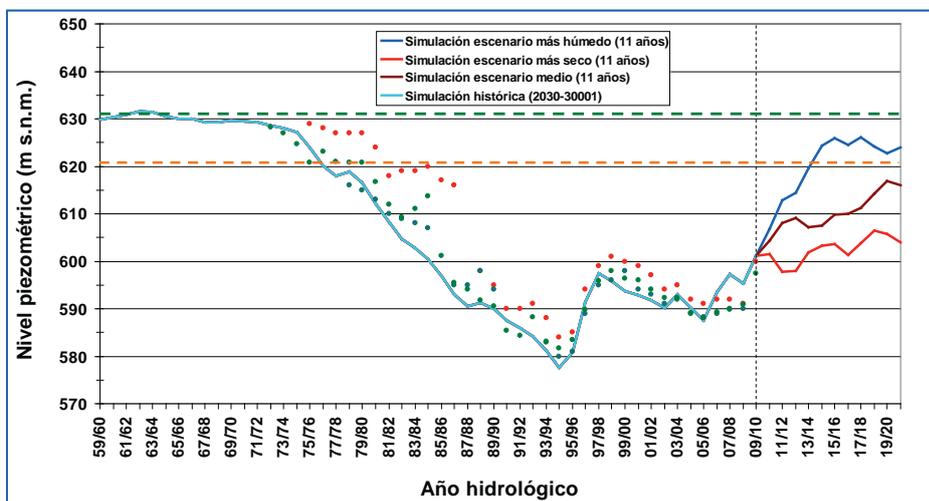


Figura 3. Simulación periodo 2010/11-2020/21. Escenario de explotación: volúmenes de extracción en dos escalones: 5 años de 275 Mm³/año (2010/11-2014/15), y 6 años de 200 Mm³/año (2015/16-2020/21) (ESC-275/200).

Figura 4. Simulación periodo 2010/11-2026/27. Escenario de explotación: extracción disminuyendo a razón de 25 Mm³ cada año, desde 350 Mm³/año hasta 100 Mm³/año (GRA-350_25/100).

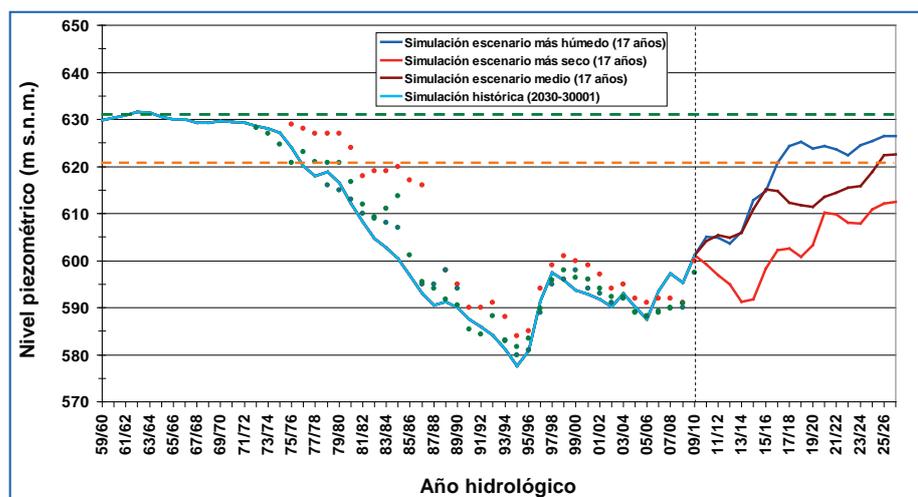
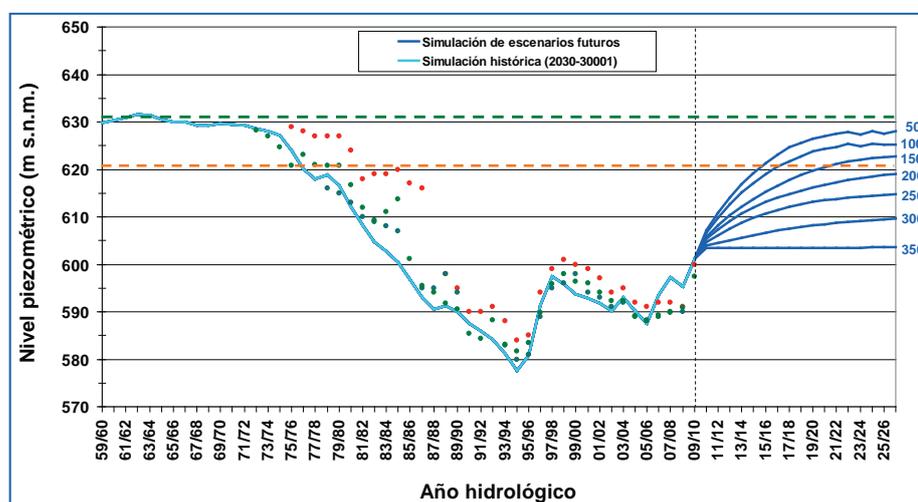


Figura 5. Simulación periodo 2010/11-2026/27. Escenarios de equilibrio a largo plazo: pluviometría anual constante de 419 mm; diferentes valores de extracción mantenida en el tiempo (350, 300, 250, 200, 150, 100 y 50 Mm³/año) (CTE-350, CTE-300, CTE-250, CTE-200, CTE-150, CTE-100 y CTE-50).



narios simulados. Por otra parte en las consideraciones finales se valorarán las perspectivas de recuperación existentes para cada horizonte temporal considerado y para el largo plazo, a partir de un análisis de todos los escenarios simulados. Para este análisis será muy útil la consideración de los escenarios de equilibrio, cuyos resultados se exponen a continuación.

Escenarios de equilibrio

Los escenarios de equilibrio definirán de forma aproximada la situación piezométrica a largo plazo para cada nivel de explotación, suponiendo que este se mantiene constante en el tiempo.

La evolución del nivel piezométrico se ha simulado en los casos anteriores a partir de series reales de precipitación, tal y como se justificó anteriormente. En este apartado se va a realizar un ejercicio más teórico que real, que pretende servir de complemento a los análisis

anteriores, con el objetivo de acotar más las previsiones futuras de evolución del sistema en función de la explotación que se haga de las aguas subterráneas.

El análisis está basado en el hecho de que si mantenemos constante en el tiempo un determinado volumen de agua subterránea extraída, el sistema llegará a alcanzar una situación de equilibrio (por así decirlo, una nueva situación estacionaria con un bombeo constante), caracterizada por un cierto balance hídrico (que tendrá incorporado dicho bombeo constante) y unos determinados niveles piezométricos, que podremos considerar de referencia para cada volumen de extracción.

En la figura 5 se han incluido las simulaciones considerando la pluviometría media anual constante (419 mm/año), y en cada caso un valor constante mantenido en el tiempo de la extracción de aguas subterráneas en las tres masas centrales de la CAG. El valor asintótico al que tiende cada una de las simulaciones nos da una idea de

la situación de equilibrio a la que tiende el nivel piezométrico para cada régimen de extracciones mantenido a largo plazo que consideremos.

Evidentemente, al igual que sucede en una situación teórica de régimen estacionario, la situación de equilibrio no es estricta, y se ve alterada por la propia variabilidad meteorológica. Esta variabilidad hará que los niveles piezométricos oscilen alrededor de los niveles considerados de referencia. Cuando los niveles de referencia son cercanos a la situación límite de recuperación de la conexión entre acuíferos y corrientes superficiales, la meteorología resulta decisiva en el comportamiento del sistema y en el grado de recuperación medioambiental que puede apreciarse en un momento dado y en una zona determinada.

En cualquier caso y a la vista de la figura 5, puede estimarse que a largo plazo es necesario reducir las extracciones por debajo de los 150 Mm³/año para conseguir recuperaciones con cierto grado importante de permanencia en el espacio y en el tiempo, en la línea de los objetivos de la DMA. Puede estimarse que manteniendo el volumen de extracción por debajo de los 200 Mm³/año se producirán episodios más o menos cercanos al funcionamiento hídrico natural asociados a secuencias húmedas.

Por debajo de los 150 Mm³ de extracción anual mantenida en el tiempo, la recuperación ya es muy importante. A medida que dicha cifra se redujera más, aumentarían gradualmente las descargas naturales de los acuíferos y la extensión de las zonas húmedas, y el sistema sería menos sensible a la estacionalidad de dichas descargas. Pueden estimarse como referencias las cifras de 100 Mm³/año en el conjunto de las tres masas consideradas para una recuperación hídrica y medioambiental muy

notable, y 50 Mm³/año para alcanzar la situación poco influenciada existente a mediados del siglo xx.

Escenarios de cambio climático

En la metodología se establecían las bases e hipótesis en las que va a ser planteado el análisis de la posible influencia del cambio climático. Se trata de simular los escenarios de equilibrio analizados en el apartado anterior, pero considerando una reducción anual del 11% en el valor de la recarga procedente de la lluvia. Los resultados obtenidos pueden verse en la figura 6.

Como puede verse comparando las figuras 5 y 6, la consideración del cambio climático en la medida descrita puede tener una repercusión importante en el nivel piezométrico de equilibrio que se alcanzaría en cada escenario de explotación considerado. Esto conduciría a la necesidad de reducir aún más las extracciones a las que habría que llegar a largo plazo para conseguir el mismo grado de recuperación que existía sin la influencia del cambio climático.

Hay que tener en cuenta que el 11% de reducción de la recarga considerado en estas simulaciones supone un volumen muy cercano a los 50 Mm³/año (estos escenarios de equilibrio se simulan con el valor medio anual de precipitaciones constante, y por tanto también el de recarga procedente de la lluvia) en el conjunto de la CAG. Como se comentó anteriormente, las características particulares que confluyen en las aguas subterráneas y en la CAG parecen indicar que la hipótesis planteada en este escenario de cambio climático es excesivamente pesimista, pero resulta interesante su consideración, aunque sea como límite superior en cuanto a esta posible repercusión.

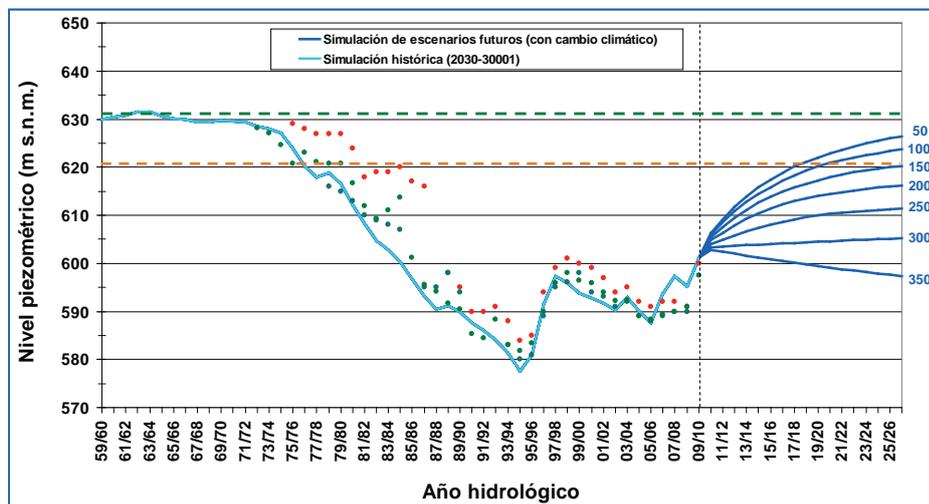


Figura 6. Simulación periodo 2010/11-2026/27. Escenarios de equilibrio a largo plazo: pluviometría anual constante de 419 mm; diferentes valores de extracción mantenida en el tiempo (350, 300, 250, 200, 150, 100 y 50 Mm³/año). Consideración de cambio climático: reducción anual del 11% en el valor de la recarga procedente de la lluvia (CTE-350, CTE-300, CTE-250, CTE-200, CTE-150, CTE-100 y CTE-50).

Como sucede en otros órdenes del conocimiento hidrogeológico en la CAG, la necesaria transición que en su caso ha de producirse hacia la recuperación hidrológica del sistema permitirá la obtención de datos, contraste de previsiones, y consiguiente mejora del conocimiento, que ayudarán a reducir las incertidumbres existentes y en el caso del cambio climático permitirán tener modelos más aproximados y adecuados a la escala regional, de cara a la mejor cuantificación de su repercusión futura.

Tabla-resumen de escenarios

Del conjunto de escenarios simulados se obtiene un panorama general de las posibilidades de recuperación ambiental de las masas de agua subterránea y ecosistemas acuáticos de la CAG, en función de las extracciones de agua subterránea realizadas, y tanto a corto-medio plazo (5, 11, 17 años) como a largo plazo.

La recuperación a corto plazo exige una reducción muy rápida y drástica de las extracciones, mientras que a largo plazo depende fundamentalmente de la cifra de extracciones a la que se llegue y que se mantenga más o menos constante en el tiempo.

Por otra parte en el corto plazo hay una gran influencia y una incertidumbre muy alta en cuanto a la secuencia

meteorológica que se produzca, mientras que a largo plazo la incertidumbre climatológica principal es la relacionada con el posible efecto del cambio climático.

Es difícil sintetizar los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores, tratando de relacionar directamente cada escenario de extracciones con un *veredicto* sobre si se produce o no la recuperación ambiental en un periodo de tiempo determinado. A las incertidumbres mencionadas se une el hecho de la gran sensibilidad que el sistema tiene a pequeñas variaciones piezométricas en situaciones que pueden considerarse de recuperación o muy cercanas. Las pequeñas oscilaciones de los niveles piezométricos producidas en esa situación hacen variar mucho los volúmenes de descarga de los acuíferos, o hacer que estas descargas cesen, lo que por ejemplo cambia totalmente el panorama si la recuperación se está relacionando principalmente con los caudales ambientales. En estas situaciones límite pueden producirse también diferencias importantes espacialmente, en cuanto a la existencia de estos caudales ambientales, entre unas zonas y otras.

Por tanto, la tabla-resumen adjunta (tabla 3) debe ser interpretada con suficiente cautela y sin olvidar las consideraciones anteriores. En dicha tabla se han intentado resumir los escenarios de explotación planteados, mostrando las previsiones de recuperación hidrológica

Tabla 3. Situación hidrológica alcanzada en los horizontes temporales considerados, para distintos escenarios de explotación. CTE: extracción constante; ESC: escalones de volumen de extracción; GRA: reducción gradual de las extracciones; Cifras de volúmenes de extracción en Mm³/año; (l.p.): la cuarta cifra corresponde a la extracción a largo plazo; (sin c.c.): sin considerar efectos de cambio climático; (con c.c.): considerando efectos del cambio climático; A, B, C, D, E, F, G y escala de colores: indicadores de la situación alcanzada por el sistema para cada escenario (explicación en Tabla 4); Letras separadas con barra (por ejemplo, D/E): situación alcanzada intermedia a las dos indicadas; Letra entre paréntesis: situación que podría alcanzarse si la secuencia correspondiente es extremadamente húmeda.

Escenarios de extracciones	Situación 2015	Situación 2021	Situación 2027	Largo plazo (sin c.c.)	Largo plazo (con c.c.)
CTE-350	G (F)	G (F)	G (F)	G	G
CTE-275	F (E)	F (E)	F	F	F
CTE-200	F (E)	F (D)	E (D)	E	E / F
CTE-150	F (E)	E (D)	D (C)	D	D / E
CTE-100	E (D)	D (C)	C (B)	C	C / D
CTE-50	D / E (C)	C	B	B	B / C
CTE-0	C (A)	B (A)	A	A	A / B
ESC-275/200/150	F (E)	F (E)	E (D)	D	D / E
ESC-230/190/150/100 (l.p.)	F (E)	F (D)	E (D)	D	D / E
ESC-275/175/100	F (E)	F (E)	D / E (C)	C	C / D
ESC-250/200/150/100 (l.p.)	F (E)	F (E)	E (D)	C	C / D
ESC-275/225/175/125 (l.p.)	F (E)	F (E)	E / F (D)	C / D	D
GRA-350_25/100	F (E)	F (E)	D / E (C)	C	C / D
GRA-350_25/50	F (E)	F (E)	D (C)	B	B / C
GRA-275_5/100	F (E)	F (E)	F (E)	C	C / D
GRA-250_25/100	F (E)	E (D)	D (C)	C	C / D
GRA-250_25/50	F (E)	D / E (C)	C (B)	B	B / C

y medioambiental en cada caso, y para cada uno de los horizontes temporales analizados, incluyendo la previsión a largo plazo.

En la tabla 3, la columna de “Escenarios de extracciones” utiliza la nomenclatura ya definida previamente, distinguiendo entre escenarios de extracciones constantes (CTE); escenarios con escalones de 5, 6 y 6 años de extracciones constantes (añadiendo en algunos casos un cuarto escalón que determina un valor de la extracción constante a largo plazo) (ESC); y escenarios con reducción gradual de las extracciones anuales (GRA).

Las columnas restantes muestran, para cada escenario de extracciones, la situación prevista en cada uno de los horizontes temporales considerados: 2015 (5 años), 2021 (11 años) y 2027 (17 años), así como la previsión de la situación alcanzada con ese escenario a largo plazo, sin considerar los posibles efectos del cambio climático (sin c.c.), o teniéndolos en cuenta (con c.c.).

Para definir la situación hidrológica-medioambiental a la que se llega en cada caso, se han diferenciado 7 categorías, indicadas con las letras A, B, C, D, E, F y G. Los significados aproximados de cada una se muestran en la tabla 4.

Hay que recordar que los valores de extracciones tomados como referencia corresponden al conjunto de

las tres masas de agua centrales de la CAG, con un reparto aproximado de 41 % para Mancha Occidental I, 49 % para Mancha Occidental II, y 10 % para Rus-Valdelobos.

Las letras indicadas entre paréntesis (Tabla 3) indican la situación que podría alcanzarse en ese escenario para el caso de que la secuencia meteorológica que se produjera hasta ese horizonte fuera extremadamente húmeda.

En algunas ocasiones se incluyen dos letras (por ejemplo, D / E), por ser especialmente difícil discernir entre las dos posibles situaciones alcanzadas. En esos casos, el color atribuido es el de la primera letra indicada.

Por otra parte, en el caso del largo plazo con consideración de cambio climático, se ha tenido en cuenta que la hipótesis utilizada es excesivamente pesimista, y en casi todos los casos se ha preferido asignar dos letras: la que existía sin la consideración del cambio climático, y la que resulta de la hipótesis realizada de reducir la recarga de la lluvia en el 11 %. A modo únicamente de convenio, se ha asignado el color de la hipótesis más favorable. Como se indicó anteriormente la incertidumbre de estos escenarios de cambio climático sólo puede irse reduciendo con los datos y análisis que se vayan realizando sobre la evolución del sistema, y con la mejora de los modelos de cambio climático a escala regional.

Situación	Color tabla	Valoración de la recuperación hidrológica	Extracción a largo plazo que representa (En Mm3/año)
A	Verde	Absoluta. Régimen natural. Niveles, descargas y zonas húmedas mayores que las conocidas en el siglo xx.	0
B	Amarillo	Prácticamente total. Recuperación al nivel de la situación existente a mediados del siglo xx.	50
C	Azul	Muy importante. Restablecimiento de la conexión de acuíferos con ríos y zonas húmedas, con una cierta vulnerabilidad, según las zonas, a las secuencias secas.	100
D	Rosa	Media. Comportamiento de la relación acuífero-río muy condicionado por la pluviometría y las zonas. Descargas en secuencias suficientemente húmedas.	150
E	Rojo	Ligera. Importante recuperación de niveles, pero en general las descargas sólo se producirían en secuencias muy húmedas.	200
F	Marrón	Mínima. Sólo recuperación de niveles, pero no lo suficiente para producirse descargas.	250-350
G	Gris	Nula. Mantenimiento de la situación actual.	350

Tabla 4. Valoración de la recuperación hidrológica del sistema para cada situación definida, y volumen de extracción de referencia correspondiente a cada situación.

En general, y con todos los matices que han sido expuestos, podría identificarse de alguna manera la recuperación ambiental de la CAG en los términos establecidos por la DMA, con los indicadores A, B y C (verde, azul y amarillo). El indicador D (rosa) quedaría bastante cercano, por lo que dependería de la secuencia climatológica, dada la importancia de la misma en periodos de tiempo tan reducidos como 5, 11 o incluso 17 años.

Una última consideración a realizar es que la recuperación hidrológica de la que aquí se habla está referida a la recuperación de los niveles piezométricos que vuelve a producir la conexión de los acuíferos con cauces superficiales y zonas húmedas, y por tanto las consiguientes descargas naturales de los acuíferos, y la evidente recuperación ambiental que ello supone. No es objeto del presente trabajo analizar las funciones ecológicas y medioambientales que puedan no ser recuperables a causa de otras acciones antrópicas o de fenómenos producidos como la combustión de las turbas.

CONSIDERACIONES FINALES

El presente trabajo ha tratado de analizar la posible evolución futura del sistema hidrológico de la CAG, y en concreto la viabilidad de su recuperación medioambiental, ligada a su vez a la recuperación de las descargas de los acuíferos y de la conexión de estos con las corrientes superficiales.

Para ello se han simulado una serie de escenarios futuros, determinados por la secuencia meteorológica que se produzca (en cuanto a pluviometría anual) y por la extracción anual de agua que se realice en las tres masas de agua subterránea centrales de la cuenca alta (Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos). Las secuencias meteorológicas, de diferentes características (húmedas, medias, secas), se han elegido a partir de las series históricas de precipitación media anual. Para las extracciones futuras se ha intentado simular diversas hipótesis que en conjunto permitieran tener una idea general de la evolución que puede esperarse del sistema.

Las simulaciones se han realizado mediante modelos empíricos elaborados a partir de los datos y resultados obtenidos en varios modelos numéricos de flujo subterráneo desarrollados en la CAG, y del conocimiento del funcionamiento del sistema en las diferentes situa-

ciones en las que éste puede encontrarse. Para ello se ha analizado y cuantificado el comportamiento de los diferentes términos del balance hídrico en dichas situaciones.

La recuperación de los niveles piezométricos que permitiría recobrar la conexión entre los acuíferos y las corrientes superficiales depende del volumen de extracción que a largo plazo se establezca de una forma más o menos constante. El sistema evolucionará en cada momento desde la situación que tenga a una nueva situación de equilibrio caracterizada por un nuevo balance hídrico, al que corresponderá una determinada distribución de los niveles piezométricos.

A partir de las simulaciones realizadas (especialmente de los denominados *escenarios de equilibrio*) puede resumirse la situación a la que llegaría el sistema en función de los volúmenes extraídos de agua subterránea en el conjunto de las masas de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, de la siguiente manera.

- Extracción mantenida de 50 Mm³/año. Recuperación prácticamente total. Las descargas de los acuíferos y superficies de zonas húmedas volverían a los niveles de mediados del siglo xx. Sus valores dependerían lógicamente de las secuencias climatológicas, que harían oscilar moderadamente los niveles piezométricos, recuperándose el funcionamiento autorregulador de los acuíferos de la cuenca alta.
- Extracción mantenida de 100 Mm³/año. Recuperación muy importante. A largo plazo volvería también en este caso a recuperarse la conexión de acuíferos y corrientes superficiales y las zonas de descarga volverían a funcionar como tales. Las descargas, y por tanto la componente subterránea de la escorrentía y las superficies de zonas húmedas serían menores que en el caso anterior. El sistema sería más vulnerable a las secuencias secas, produciéndose estacionalmente el cese estas descargas. Esta vulnerabilidad a periodos de escasas precipitaciones dependerá de la zona y de la intensidad del periodo seco.
- Extracción mantenida de 150 Mm³/año. Importante recuperación de los niveles piezométricos, pero comportamiento de la relación acuífero-río muy condicionado por la pluviometría. Los periodos de tiempo en los que existirán descargas del acuífero (por ejemplo en los Ojos del Guadiana), así como los volúmenes descargados y superficies de zonas húmedas serán bastante inferiores a los que his-

tóricamente se registraban hasta los años 70 del pasado siglo, con bastantes épocas en las que las descargas desaparecerán en muchas zonas.

- Extracción mantenida de 200 Mm³/año. Notable recuperación de los niveles piezométricos respecto a la situación actual, pero sin poder considerar recuperado el sistema desde un punto de vista hidrológico y medioambiental, puesto que el nivel piezométrico *de equilibrio* que se alcanzaría no llega a ser suficiente para garantizar la conexión acuífero-ríos durante periodos de tiempo importantes. En secuencias climatológicas suficientemente húmedas sí llegarían a producirse estas descargas en muchas zonas.
- Extracciones mantenidas superiores a 225 Mm³/año. Los niveles piezométricos estarían a largo plazo por encima de los actuales (si la cifra de extracciones se mantiene por debajo de 325-350 Mm³/año), pero el funcionamiento del sistema seguiría siendo básicamente el mismo que el actual, totalmente alterado respecto al régimen natural y sin producirse conexión del acuífero con las corrientes superficiales en toda la zona central de la CAG.

Evidentemente, los resultados anteriores tienen un margen de incertidumbre y las cifras deben ser consideradas como meramente orientativas. No obstante, proporcionan un panorama bastante claro y fiable sobre la situación a largo plazo que se puede esperar en función de las decisiones adoptadas con respecto a la utilización de las aguas subterráneas. Además, la posible recuperación de los acuíferos requiere de una etapa más o menos larga de transición, durante la cual el contraste y actualización de las hipótesis formuladas, y el adecuado seguimiento y análisis de la evolución del sistema permitirá reducir los márgenes de incertidumbre y adaptar los modelos y previsiones existentes. A su vez, esto permitirá tomar decisiones más ajustadas a la realidad en la fase final de recuperación de los acuíferos. En este sentido, en el trabajo se hace hincapié en la necesidad de tener un conocimiento suficientemente aproximado de las extracciones reales de agua subterránea, espacial y temporalmente.

Los resultados anteriores hacen referencia a la posible recuperación del sistema hidrológico a largo plazo. Uno de los aspectos analizados es la posibilidad de que esa recuperación se produzca dentro de los horizontes temporales establecidos por la legislación, en concreto por la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea. Así, han sido analizadas las posibilidades de recuperación en los años 2015, 2021 y 2027. Las incertidumbres en este caso son notablemente mayores, puesto

que los periodos de tiempo son suficientemente reducidos para estar muy condicionados por las secuencias climatológicas registradas. A este respecto, las secuencias simuladas reproducen secuencias históricas extremas (además de las medias) húmedas y secas. Por ello, los casos en que la recuperación sólo se produce en secuencias extremadamente húmedas, son excesivamente ficticios desde el punto de vista de considerar la recuperación hídrica y medioambiental del sistema. Parece más coherente vincular esta recuperación a secuencias medias en cuanto a precipitaciones. Como resumen de los escenarios analizados podría comentarse lo siguiente:

- Horizonte temporal 2015. En términos prácticos, y considerando el contexto actual, parece prácticamente imposible la recuperación en dicho plazo. Sólo un hipotético cese absoluto de las extracciones (incluidas las destinadas a abastecimiento) podría dar lugar a la recuperación del sistema. Un escenario climatológico que reprodujera los 5 años históricamente más húmedos, que además prolongaría el del año hidrológico 2009/10 que ha sido igualmente muy húmedo, podría conducir a ascensos espectaculares de los niveles piezométricos que quedarían muy cercanos a situaciones que podrían considerarse cercanas a la recuperación, pero en todo caso bastante ficticias. Desde el punto de vista de la posible recuperación en un plazo más largo, este periodo es importante de cara a reducir las extracciones hasta los valores más cercanos posibles a los que se estimen como objetivo final a mantener en el largo plazo, de acuerdo con los valores de referencia que se establecieron anteriormente.
- Horizonte temporal 2021. Con escenarios climatológicos medios la recuperación para ese año es difícil, a no ser que desde el principio se redujeran drásticamente las extracciones. Si desde el principio se consigue adoptar volúmenes de extracción como los indicados anteriormente en el análisis a largo plazo, los 11 años de este periodo, sin llegar a ser suficientes para alcanzar la denominada situación de equilibrio, sí que serían suficientes para conseguir un porcentaje muy alto del ascenso total esperable a largo plazo con esas extracciones. Por ejemplo, ante escenarios climatológicos medios, y con extracciones que desde el principio se acercaran a los 200 Mm³/año, y en la media del periodo estuvieran por debajo de esa cifra, se produciría una recuperación muy notable de los niveles piezométricos. No podría hablarse de recuperación en 2021 en los términos establecidos por la DMA, pero dejaría la

situación favorable para conseguirlo en el siguiente periodo de 6 años en el caso de que se consiguiera reducir a otro escalón inferior dicho nivel de extracciones. Para poder hablar de recuperación con una climatología media, sería necesario que en los 11 años que abarca este periodo las extracciones estuvieran claramente por debajo de los 100 Mm³/año. En todo caso, un periodo de 11 años sigue siendo muy sensible a la climatología, y así una secuencia extremadamente húmeda (al nivel del máximo histórico en 11 años consecutivos) produciría una recuperación de niveles hasta recobrar en muchas zonas los niveles de descarga de los acuíferos, con cifras de extracción de unos 200 Mm³/año.

- Horizonte temporal 2027. Aun con la necesidad de reducción de las extracciones a niveles muy bajos en comparación con los estimados en las últimas décadas, el año 2027 parece un horizonte más realista para contemplar una recuperación real de los niveles piezométricos que produzca la correspondiente recuperación medioambiental, al menos en lo que respecta a la conexión de acuíferos y corrientes superficiales. Si desde el principio se establece un volumen de extracciones mantenido en el tiempo, en los 17 años del periodo se alcanzaría prácticamente la situación de equilibrio mencionada en los casos anteriores, por lo que la situación obtenida en cada caso (con cada volumen de extracción mantenido constante) sería la que se describió anteriormente. No obstante, el resultado al final del periodo de 17 años está todavía bastante influenciado por la secuencia climatológica, de forma que un periodo demasiado seco haría que el objetivo no se cumpliera.

Si en lugar de considerar una extracción mantenida constante desde el principio se va reduciendo ésta gradualmente, podemos encontrar (siempre hablando de secuencias climatológicas medias) algún escenario en el que se consiga el objetivo de recuperación, pero pasaría porque hubiera una etapa final suficientemente larga (por ejemplo los últimos 12 años) en los que las extracciones no superen los 100 Mm³/año, dedicándose los 5 primeros años a alcanzar gradualmente dicho nivel de extracciones. En todo caso hay que recordar que en estos plazos no suficientemente largos, y siempre considerando estos volúmenes de extracción suficientemente reducidos, las características climatológicas del periodo tienen una importancia decisiva para conseguir el objetivo más o menos rápidamente.

La tabla-resumen incluida en el apartado anterior, y las

consideraciones allí realizadas, dan una idea más detallada de la posibilidad de recuperación del sistema ante los diferentes escenarios planteados.

La recuperación estricta del sistema lleva asociado el cumplimiento de indicadores bastante específicos, como son los de caudales ambientales mínimos en zonas como las Tablas de Daimiel. No hay que perder de vista que la gran sensibilidad del sistema (y en concreto de las descargas de los acuíferos) a pequeñas variaciones piezométricas en las situaciones en que el sistema puede considerarse en el límite de la recuperación, hacen que no tenga mucho sentido relacionar de forma más o menos precisa volúmenes de extracción y secuencias climatológicas futuras con aspectos de detalle cuantitativos relacionados con los volúmenes de descarga en puntos concretos, superficie de determinadas zonas húmedas, etc., que en todo caso habría que desarrollar de forma muy específica para dichas zonas y con una escala y nivel de detalle muy exigentes. No obstante, los escenarios analizados y las cifras aportadas sí suponen una referencia a seguir para conseguir llegar a dicha situación límite en cuanto a recuperación ambiental.

En lo contemplado hasta aquí en estas consideraciones finales no ha sido tenido en cuenta el posible efecto futuro del cambio climático. Su repercusión ha de ser considerada en los estudios que en adelante se realicen sobre la evolución futura del sistema hidrológico. Las incertidumbres sobre los modelos de cambio climático existentes, especialmente cuando descendemos a niveles regionales, son muy altas, y aun lo son más en cuanto a su afección en una cuenca con tanta importancia de la componente subterránea del recurso. En el presente trabajo se ha hecho una simulación considerando un escenario de cambio climático aparentemente muy desfavorable, que supone trasladar a la recarga de la lluvia el 11% de disminución sobre la aportación natural de referencia indicado por la Instrucción de Planificación Hidrológica. Esta hipótesis supone reducir en cerca de 50 Mm³ el valor medio anual de la recarga procedente de la lluvia en el conjunto de la cuenca alta del Guadiana (algo más de 30 Mm³/año en las tres masas centrales). No es una cifra despreciable, y supondría la necesidad de reducir aún más las extracciones para conseguir los mismos objetivos. En todo caso, la incertidumbre relativa al cambio climático requiere un adecuado seguimiento de la evolución del sistema en los próximos años y una mejora en los modelos existentes de cambio climático a escala regional.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- IGME (2010) *Estimación de los recursos disponibles para cada masa de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana, basada en el análisis de los informes y referencias bibliográficas precedentes y en los datos de infraestructura hidrogeológica y conocimiento experto del IGME*. Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Estudio complementario. Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua. 69 pp.
- Martínez Cortina, L. (2001). *Estimación de la recarga en grandes cuencas sedimentarias mediante modelos numéricos de flujo subterráneo. aplicación a la cuenca alta del Guadiana*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. 418 pp

PROPUESTA DE DECLARACIÓN DE SOBREEXPLOTACIÓN DE UN CONJUNTO
DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA
DEL GUADALQUIVIR

Juan Antonio López Geta



En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Informe sobre la propuesta de declaración de sobreexplotación de un conjunto de masas de agua subterránea situadas en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir*, llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Responsable:

Juan Antonio López Geta. Instituto Geológico y Minero de España

Realización: Instituto Geológico y Minero de España

Antonio González Ramón
Claus Kohfahl
Crisanto Martínez Montañés
Juan Carlos Rubio Campos
Sergio Martos Rosillo
Loreto Fernández Ruiz

PROPUESTA DE DECLARACIÓN DE SOBREEXPLOTACIÓN DE UN CONJUNTO DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR

INTRODUCCIÓN

El estudio que aquí se presenta, se formula para ofrecer apoyo técnico a la actualización de los planes hidrológicos de cuenca en materia de aguas subterráneas, y más concretamente como asesoramiento experto a la Oficina de Planificación de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, con el fin de evaluar el estado, en cuanto a su posible declaración de sobreexplotación o en riesgo de estarlo, de las masas de agua subterránea de:

- 05.04. Huéscar-Puebla de D. Fadrique
- 05.23. Úbeda
- 05.24. Bailen-Guarromán-Linares
- 05.25. Rumberal
- 05.38. El Pedroso-Arcas
- 05.41. Guadahortuna-Larva
- 05.43. Sierra y Mioceno de Estepa
- 05.49. Niebla-Posadas

El procedimiento para la declaración de acuíferos sobreexplotados está recogido en el artículo 56 y en el 87.2 del Texto Refundido de la Ley de Aguas y en el artículo 171.2 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico (RD 606/2003, de 23 de mayo), que establece: "A los efectos previstos en el apartado anterior, se considerará que los recursos subterráneos de una zona están sobreexplotados o en riesgo de estarlo cuando se dé algunas de las siguientes condiciones:

- Que se esté poniendo en peligro la subsistencia de los aprovechamientos de aguas subterráneas existentes o de los actuales ecosistemas directamente asociados a esta agua que hayan sido objeto de delimitación y posterior declaración conforme a la legislación ambiental, como consecuencia de que se vinieran realizando en los acuíferos de la zona, extracciones medias anuales superiores o muy próximas al volumen medio interanual de recarga.
- Que se vengán realizando extracciones que generen un deterioro significativo de la calidad del agua.

- Que el régimen y concentración de las extracciones sea tal que, aún no existiendo un balance global desequilibrado, se esté poniendo en peligro la sostenibilidad de los aprovechamientos a largo plazo.

METODOLOGÍA

Con el objetivo de prescribir el estado en que se encuentran las diferentes masas de aguas subterráneas (en adelante MASb) incluidas en este estudio, en los términos que señala en el artículo 56 y en el 87.2 del texto Refundido de la Ley de aguas y en el artículo 171 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico (RD 606/2003, de 23 de mayo de Aguas), se ha desarrollado una metodología basada en determinar el balance hídrico en cada masa de agua subterránea o sectores y/o estudiar la evolución de los niveles piezométricos a lo largo de los años en esas masas o sectores de éstas, lo que permitió conocer el grado de influencia de los aprovechamientos en la evolución de los niveles piezométricos en el acuífero. En el caso de cumplirse alguno de los supuestos recogidos en la legislación, la MASb o los acuíferos o sectores identificados en ella podrán ser propuestos para ser declarados sobreexplotados o en riesgo de estarlo.

Para ello, se han desarrollado las siguientes actividades:

- Recopilación de la información geológica e hidrogeológica existente en la zona donde se ubica la masa.
- Recopilación de los datos aportados por las redes piezométricas, ubicación, características hidrogeológicas de cada uno de esos puntos, series históricas de niveles de agua y temporalidad.
- Recopilación de los datos físico-químicos de las aguas subterráneas, red de control disponible y temporalidad de las series históricas de datos.
- Recopilación de las entradas de agua a cada un de las MASb, procedentes de la infiltración del agua de lluvia, de los retornos de riego o de entradas laterales procedentes de otras MASb.

- Recopilación de las extracciones mediante bombeos, salidas por manantiales, a ríos, por evapotranspiración o laterales a otros acuíferos.
- Recopilación del balance hídrico y grado de contaminación de las aguas subterráneas.

Se ha realizado un diagnóstico de la situación de cada MASb, en cuanto su grado de conocimiento, especialmente en lo que se refiere a las características de la geometría de la masa o de los acuíferos identificados en cada una de ellas, parámetros hidráulicos, funcionamiento hidrodinámico, elementos del balance hídrico, e información piezométrica físico-química de sus aguas.

DECLARACIÓN DE SOBREEXPLOTACIÓN

Con la información disponible se ha tratado de responder a los diferentes supuestos contemplados en la normativa vigente, para definir que una masa de agua subterránea está sobreexplotada o en riesgo de estarlo.

En general, el conocimiento hidrogeológico existente de cada una de las MASb contempladas en este estudio, es muy diferente para cada una de ellas. Resaltan el gran desconocimiento de aspectos tan importantes e imprescindibles como la escasez de información actualizada sobre la infiltración del agua de lluvia o de los retornos de riego, no disponiéndose de series pluviométricas de años representativos, ni la valoraciones de esa infiltración para periodos de lluvia secos o húmedos, ni el grado de aprovechamiento de los recursos hídricos y su distribución espacial o la inexistencia en la gran mayoría de las MASb de redes de control piezométrico o de composición de las aguas, con registros históricos muy limitados, o en el caso de disponerse de estos datos, ponen en evidencia la caótica distribución de los puntos de control dejando grandes zonas sin ningún punto de control.

Estas carencias de información condicionan establecer con suficiente fiabilidad la situación actual de cada una de estas MASb, lo que dificulta la toma de decisión en cuanto a su declaración como sobreexplotada en su totalidad, aumentando esta dificultad aún más, la posible diferenciación de acuíferos o sectores independientes en esas masas de aguas subterráneas. Aunque con esa debilidades se ha considerado como más adecuado declarar como sobreexplotado todo el territorio abarcado por la MASb estudiada, con la convicción de que esta medida ayudará a una mejor gestión de ésta y a su recuperación, dejando pendiente su sectorización a la

elaboración del Plan de Ordenación de las Extracciones, estableciendo en cada uno de los sectores identificados, unas condiciones específicas de aprovechamiento o en su caso la aplicación de la Norma de explotación o de aprovechamiento, en el caso de existir o elaborarla si no se dispone de ella.

En los puntos siguientes se incluye la propuesta de declaración para cada una de las MASb, y los fundamentos técnicos en los que se basa y que corresponden a las principales consideraciones hidrogeológicas de la MASb.

PROPUESTAS

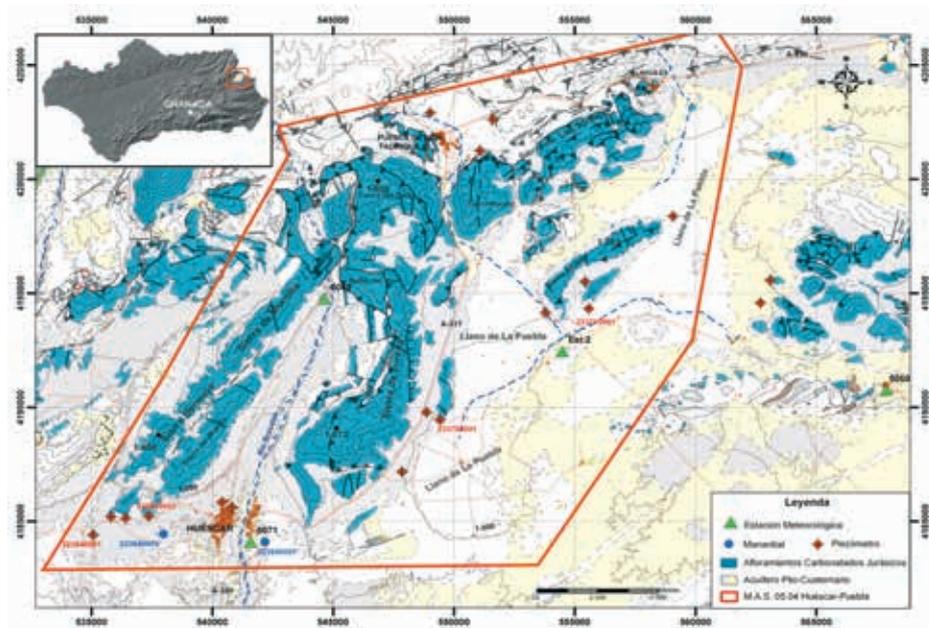
MASb 05.04. Huéscar-Puebla de Don Fadrique

La evolución piezométrica, e hidrométrica de los manantiales en la MASb de Huéscar-Puebla en los últimos años, así como el balance hídrico, particularmente en los periodos de sequía, ponen de manifiesto problemas en el drenaje natural de los manantiales mas destacados, el de Fuencaliente, con reducciones muy importantes en el caudal disponible para satisfacer las demandas y los ecosistemas asociados al drenaje del manantial y el de Parpacén con problemas puntuales. Esta situación conlleva a tomar como medida para corregir esta situación indeseable y garantizar los aprovechamientos existentes de aguas subterráneas, la posible *declaración de sobreexplotación* de la MASb y la elaboración del Plan de Ordenación de las Extracciones, que tenga en cuenta la singularidad de cada uno de los acuíferos o sectores definidos en ésta, especialmente en lo referente al grado de explotación.

Fundamentos

Para valorar la situación de la MASb se han aplicado los criterios seleccionados, de análisis de la evolución piezométrica e hidrométrica y su comparación en los sectores diferenciados con el balance hídrico y con los datos disponibles sobre bombeos en diferentes periodos (a destacar el período entre 1994/95 y 2002/03, en el que las explotaciones alcanzaron máximos de 8,67 hm³/año). Estos sectores están constituidos por los dos tipos de acuíferos, a priori, en conexión hidráulica, el primero de ellos constituido por los materiales carbonáticos jurásicos subbéticos, permeables por fisuración-karstificación y el segundo por los materiales detríticos plio-cuaternarios que se encuentran rodeando a los anteriores y en principio en conexión hidráulica

Figura 1. Contexto hidrogeológico de la MASb 05.04 Huéscar-Puebla y ubicación de los puntos de medida piezométricos y de hidrometría y estaciones meteorológicas.



(figura 1). En estos materiales se han identifican tres sectores sin conexión hidráulica, denominados como: Sector de Huéscar (manantial de Parpacén); el Sector del Llano de la Puebla (manantial de Fuencaliente) y el Sector Norte detrítico.

Para analizar la piezometría e hidrometría, se partió de los datos correspondientes al periodo 1969-2009; si bien este periodo de registro presenta medidas no continuas en el tiempo, ni disponibles por igual en el espacio temporal analizado, para todos los piezómetros y manantiales (tablas 1,2 y3). Esta información pone de manifiesto un comportamiento distinto en

las evoluciones de los piezómetros ubicados en el Llano de la Puebla y los situados en las proximidades del pueblo de Huéscar. En el Llano de la Puebla, los piezómetros revelan un periodo de ascenso en el nivel desde 1969-1974, causado por la sucesión de precipitaciones netamente superiores a la media. A partir de 1974 hasta 2009 se observa una tendencia descendente, con ciclos de ligero ascenso motivados por las importantes lluvias de 1989 y 1996 (figura 2). El descenso total resulta del orden de 25 m, con un ritmo incrementado en los últimos años de la serie, principalmente por las extracciones de regadío en el Llano de la Puebla.

Nº	Código del punto	Denominación	X UTM (Huso 30)	Y UTM (Huso 30)	Cota (m s.n.m.)	Prof (m)	Periodo de medida
1	05.04.001	233710008	548954	4202694	1165	80	Dic 80- 2009
2	05.04.002		550237	4197289	1066	153	Dic 07-2009
3	05.04.003	233760001	554756	4194232	995	120	Oct 69-2009
4	05.04.004	Cortijo Don Andrés	550619	4189470	997	150	Ene 07-2009
5	05.04.007	223840003	536510	4185160	945	144	Ene 69-2009
6	05.04.009	223840001	535091	4184411	955	301	Oct 69-2009
7	05.04.010	223840005	536469	4185139	945	152	May 69-2009
8	05.04.012	2338/1/0005	547946	4187164	995		Mar 02-2009
9	05.04.013	2337/5/0013	548838	4189851	1010		Ene 02-2009

Tabla 1. Red Piezométrica de la MASb 05.04.Huéscar-Puebla de D. Fadrique

Nº	Código IGME	Denominación	X UTM (Huso 30)	Y UTM (Huso 30)	Cota (m s.n.m.)	Periodo de medida
1	05.04.01H	Fuencaliente (2238.4.0007)	542190	4181490	918	Sept 66-Sept 08
2	05.04.02H	Parpacén (2238.4.0009)	537875	4184450	931	Sept 66-Sept 01

Tabla 2. Red Hidrométrica de la MASb 05.04.Huéscar-Puebla de D. Fadrique

.Nº	Código punto	Denominación	X UTM	Y UTM	Tipo de punto	Tipo de Red
1	5.04.01	Fuencaliente de Huéscar	542194	4184143	Manantial	General
2	5.04.11	Sondeo San Gregorio	550870	4202210	Sondeo	Prepotables
3	5.04.21	Finca La Parra	549143	4188891	Sondeo	Nitratos

Tabla 3. Red de Calidad de la MASb 05.04.Huéscar-Puebla de D. Fadrique

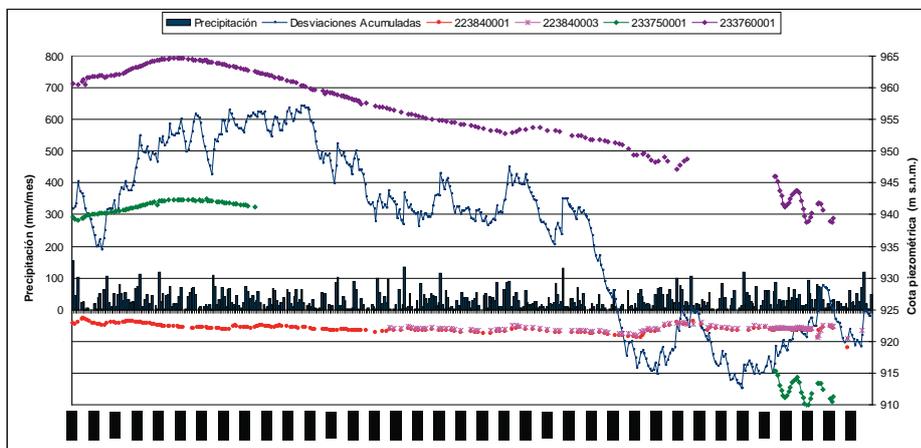


Figura 2. Evoluciones de los piezómetros más representativos y relación con las precipitaciones y sus desviaciones acumuladas respecto de la media (datos mensuales).

Respecto a la evolución hidrométrica, el régimen de descarga de los dos manantiales es también muy diferente. Así, el manantial de Parpacén tiene una evolución similar a los piezómetros del Sector de Huéscar, mientras el manantial de Fuencaliente es afín a los piezómetros ubicados en el Sector del Llano de la Puebla. De la evolución de las desviaciones acumuladas respecto a la media de la precipitación mensual (figura 3) desde el año 1982/83 y la evolución de niveles y de la evolución del manantial de Fuencaliente hasta 1992/93, se observa una alternancia de 4 años entre ciclos secos y húmedos. A partir de 1992/93, la alternancia de períodos secos y húmedos aumenta de amplitud entre 7 y 8 años. En esta etapa destacar el período entre 2000/01 y 2003/04 que aun siendo húmedo, los niveles y el caudal de Fuencaliente tienden al descenso. En los últimos cinco años la tendencia disminuye desde el 2003-2004, casi se llega a estabilización, a pesar del período seco 2003/2004 y 2007/2008.

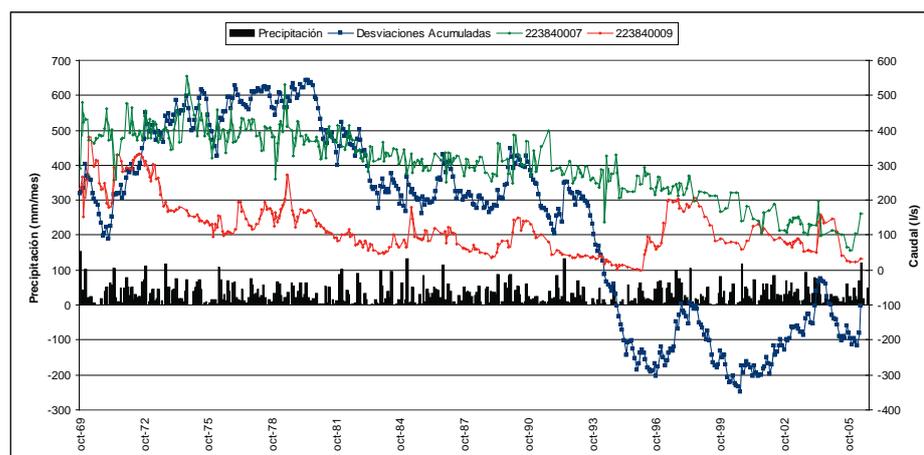
Toda la MASb de Huéscar-Puebla, se ha visto sometida a una fuerte explotación en los últimos años, principal-

mente la zona del Llano de la Puebla (acuífero principal), provocando descensos importantes tanto en el nivel piezométrico como en el caudal del principal manantial: Fuencaliente. La evolución de este manantial es claramente descendente desde 1974 como se ha indicado anteriormente, teniendo una evidente relación con dicho comportamiento, el incremento en la explotación que se venía produciendo en este sector para regadío, a partir de los años 1982/83.

La evolución de la explotación ha sido muy evidente, en 1970 no existía y se ceñía exclusivamente a la utilización del agua de los principales manantiales, los cuales arrojaban un volumen de 18 hm³/año.

El último balance hídrico realizado en la MASb fue en el 2001. Las entradas fueron estimadas en 30 hm³/año, mientras que las salidas se producían a través de manantiales y sondeos surgentes (16 hm³/año), por bombes (7,2 hm³/año) y a través de descargas ocultas (6,8 hm³/año).

Figura 3. Evoluciones hidro-métricas y su relación con las precipitaciones y sus desviaciones acumuladas respecto de la media (datos mensuales).



En resumen el sector de los Llanos de la Puebla en relación con el manantial de Fuencaliente, es el que presenta, con claridad, riesgo de sobreexplotación.

En relación con el sector relacionado con el manantial de Parpacén (englobaría la margen derecha del río de Huéscar, Sierra del Muerto, Sierra Bermeja y Sierra de Montilla), se señala una correspondencia entre el caudal del manantial y las desviaciones acumuladas de la precipitación, señalando que las tendencias al descenso y ascenso de caudales coinciden en el tiempo con los periodos secos y húmedos, así como que la influencia de las explotaciones por bombeo debe ser pequeña. Se señala un balance en el periodo 1970-71 a 2006-07 (37 años) para el sector situado al oeste del río Bravatas en relación con Parpacén, de 3,44 hm³/año y unas aportaciones estimadas por infiltración para el conjunto de 3,78 hm³/año. Para el periodo 1951/52 a 2006/2007 (56 años), las aportaciones por lluvia al acuífero se estiman en 4 hm³/año. Se considera que como cifra prudente para conservar el manantial no superar para el sector el 10 % del volumen correspondiente al caudal medio real histórico del manantial de Parpacén (108,5 L/s). Además se debe seguir la recomendación incluida en la norma de explotación de la CHG-IGME (2001) de no realizar ninguna captación dentro de un radio circular al manantial de 2000 metros.

Sobre el acuífero del sector detrítico y afloramientos asociados donde se encuentra el núcleo urbano de Puebla de Don Fadrique es preciso diferenciar el sector detrítico donde se encuentra el núcleo urbano de la Puebla de D. Fadrique y formaciones geológicas interrelacionadas, independizado del sector principal del Llano de La Puebla por el cabalgamiento del Subbético sobre el Prebético. Éste presentaría unos recursos renovables muy reducidos (pendiente de evaluar, pero posi-

blemente en torno a 1 hm³/año), si bien la explotación es muy incipiente.

Recomendaciones

Sería de interés un seguimiento de la evolución de niveles, al menos en 8 puntos estratégicos a seleccionar y de todas las explotaciones concedidas mediante la instalación de contadores, así como el control del drenaje de los manantiales de Parpacén y Fuencaliente. La frecuencia de medidas deberá ser al menos con carácter mensual salvo los manantiales de Parpacén y Fuencaliente, cuyo control se propone en continuo mediante la instalación de data logger.

Para el acuífero detrítico y los afloramientos asociados donde se encuentra el núcleo urbano de Puebla de Don Fadrique, se recomienda una actualización del inventario de puntos de agua y de las explotaciones que debe ser exhaustiva, así como la realización de un balance de entradas al sector, lo que permitirá evaluar la presión a la que está sometido este sector en la actualidad.

Para el acuífero principal o de Los Llanos se propone la comparación de la evolución de niveles, explotación y del drenaje de Fuencaliente, con los resultados previstos en el modelo matemático temporalmente.

Para el acuífero situado al oeste del río Bravatas, en relación con el manantial de Parpacén, se propone también la comparación de resultados entre drenaje de este manantial y bombeos en el sector, cada dos años.

MASb 05.23. Úbeda

Teniendo en cuenta la evolución piezométrica en el conjunto de acuíferos de la Loma de Úbeda y el gra-

do actual de explotación, que podría superar los 40 hm³ anuales, se observa un déficit anual explotación vs. recarga del orden de unos 14 hm³ anuales. Esto conlleva, como medida para reducir ese exceso de explotación en un volumen similar que permita alcanzar un equilibrio en el balance, la posible *declaración de sobreexplotación* de la MASb y la elaboración del Plan de Ordenación de las Extracciones, que tenga en cuenta la singularidad de cada uno de los acuíferos definidos en ésta, especialmente en lo referente al grado de explotación y la composición de sus aguas. Una alternativa a la declaración de sobreexplotación podría ser la aplicación de la norma de explotación de esta masa de agua subterránea.

Fundamentos

La valoración de los criterios utilizados para determinar el estado de la MASb, evolución piezométrica y balance hídrico, descensos de niveles de agua en los acuíferos en la Loma de Úbeda, indica diferencias, entre las formaciones de areniscas y conglomerados triásicos (Buntsandstein), y las constituidas por carbonatos jurásicos y areniscas y calcarenitas del Mioceno (figura 4).

El síntoma más significativo del elevado grado de explotación existente, es el descenso continuado de niveles piezométricos que se ha venido registrando en el acuífero jurásico desde que, en 1996, se obtuvieron los primeros datos. Del acuífero triásico se desconocen en detalle las características litológicas y geométricas bajo los carbonatos jurásicos, si bien, se sabe que es captado por diversos sondeos situados en la margen izquierda del río Guadalimar, y por la mayoría de los sondeos situados en su margen derecha bajo los carbonatos jurásicos, donde es el principal acuífero explotado.

La información más antigua sobre la morfología de la superficie piezométrica del acuífero jurásico (fisurado y kárstico) corresponde a un periodo situado entre marzo y junio de 1996. Con estos datos se pudo trazar, por primera vez, un mapa de isopiezas (figura 5) que muestra la situación en los inicios del proceso de explotación intensiva de recursos que el acuífero sufrió en los años posteriores. No se dispone de ninguna información sobre la piezometría del acuífero en condiciones no influenciadas por los bombeos. Las isopiezas muestran la existencia de un conoide de bombeo al sur del acuífero en la zona confinada, al este de Torreperogil. En esta zona, se construyeron algunos de los primeros sondeos de gran profundidad, capaces de apor-

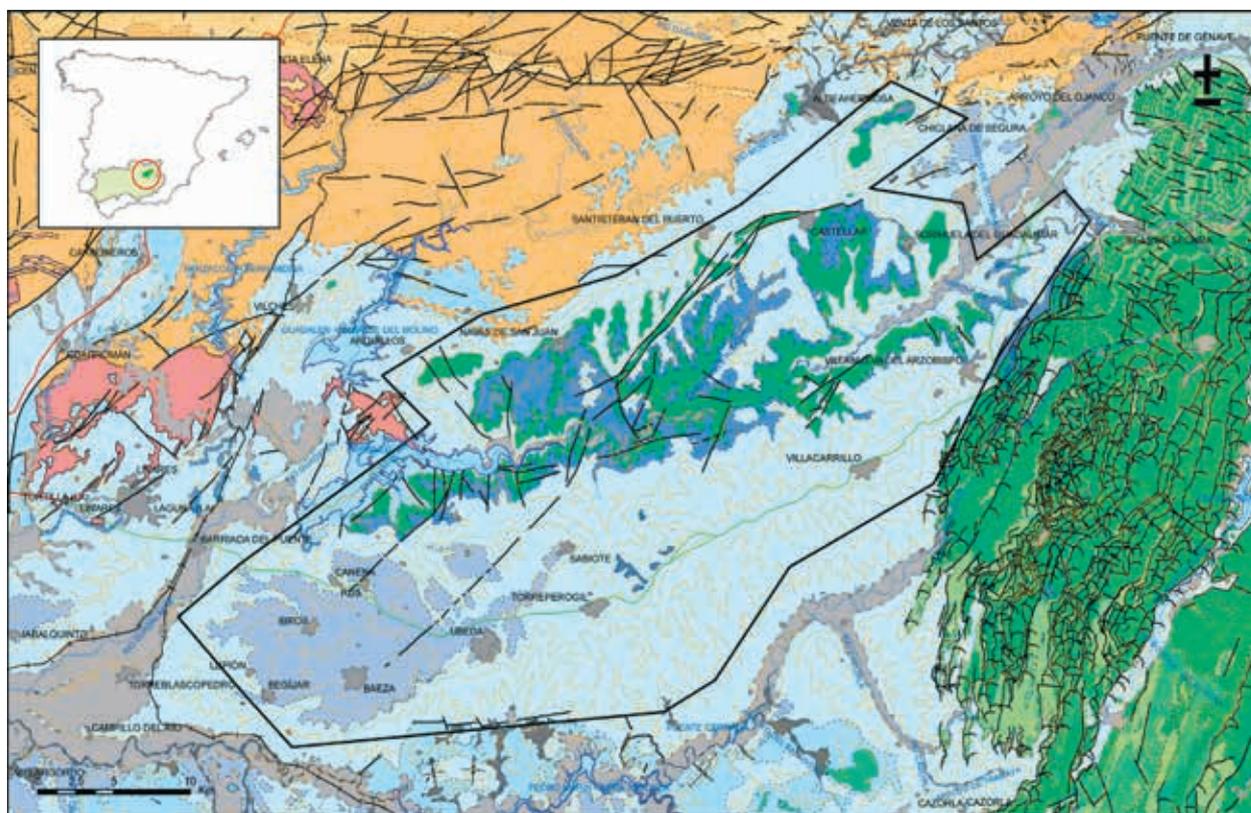


Figura 4. Mapa de formaciones permeables de la MASb 05.23 Úbeda

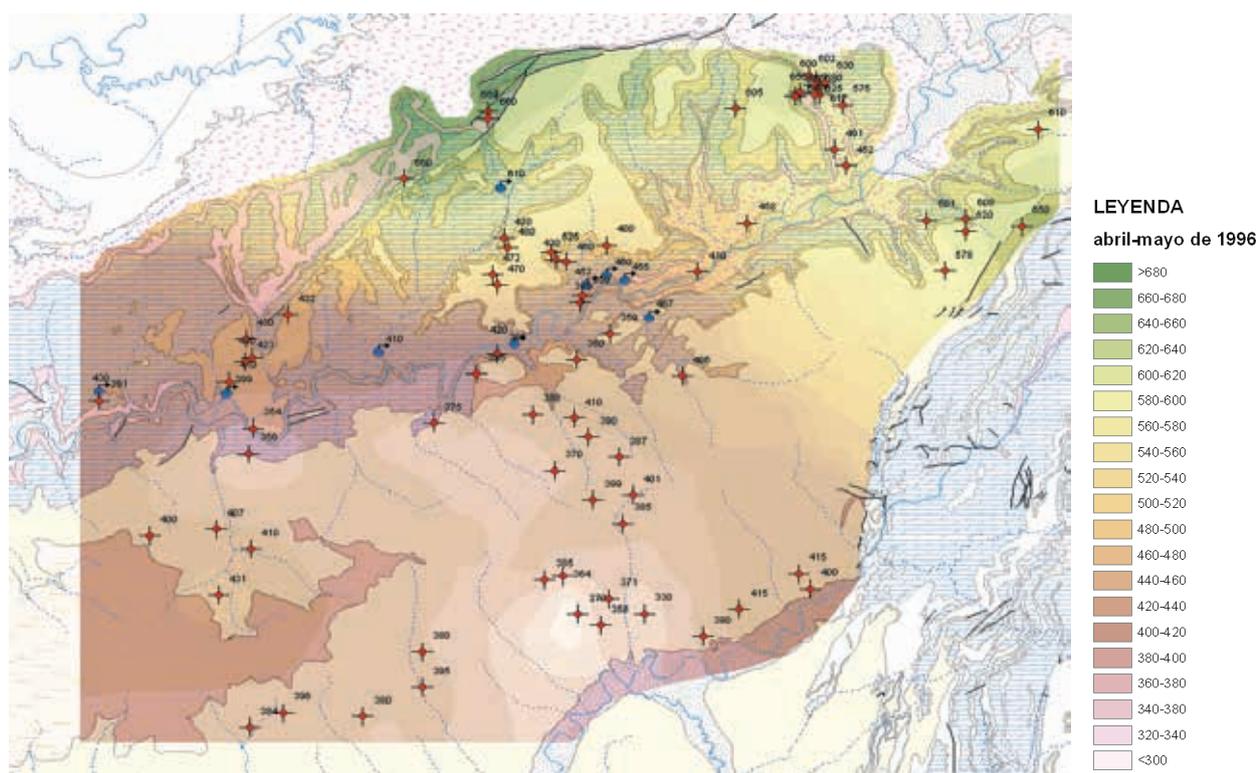


Figura 5. Plano de isopiezas del acuífero jurásico y triásico de la Loma de Úbeda. Periodo abril-mayo de 1996

tar elevados caudales. En la margen izquierda del río Guadalimar, cerca de su cauce, se observan dos zonas deprimidas en las que el nivel se sitúa a menos de 370 m s.n.m. Se trata de los únicos sectores donde el nivel piezométrico está bajo el cauce del río Guadalimar y podría indicar vías de alimentación preferente hacia el acuífero confinado jurásico. La ausencia de datos en un amplio sector al sur de estas zonas impide precisar mejor esta cuestión. Finalmente, se intuye la presencia de un domo piezométrico bajo el acuífero mioceno, que parece indicar la presencia de recarga diferida proveniente de este acuífero.

En marzo de 2004, a partir de los datos disponibles, se observa un descenso generalizado de niveles en todo el acuífero jurásico con respecto a los datos de 1996. Con reservas, este descenso puede cifrarse en cerca de 20 m en la zona central del acuífero jurásico libre, aunque afecta al acuífero triásico, en unos 15 m junto al río Guadalimar en su margen izquierda, y en más de 50 m al sur de Torreperogil y en el entorno de Villacarrillo y Villanueva del Arzobispo.

En cuanto al segundo de los criterios utilizados, las extracciones en el *acuífero jurásico*, fueron estimadas por primera vez en el año 1998-99, alcanzando una cifra de 18,2 hm³. En una nueva estimación realizada en el año

2001 la extracción global por bombeo superó los 28 hm³/año, que incluye extracciones realizadas en los tres acuíferos. En 2003 se realizó una nueva estimación de 35,5 hm³/año para el acuífero jurásico. Finalmente, en 2006 se calculó que el volumen posible de extracciones para el conjunto de acuíferos de la MASb podría situarse en torno a 60 hm³/año.

En 2007 se realizó un modelo matemático del que, como conclusión más relevante, se deduce la existencia de un déficit en el acuífero jurásico cercano a 14 hm³/año.

Para el *acuífero mioceno*, el resultado es unas entradas por infiltración de agua de lluvia de 6,7 hm³/año y unas salidas por manantiales de 1,0 hm³/año y por bombeos entre 2,1-4,4 hm³/año, lo que supone un total de entre 3,1-5,4 hm³/año. Esta diferencia entre entradas y salidas (1,3 a 3,6 hm³/año) podría corresponder a drenajes o zonas de rezume dispersas no conocidas y a infiltración sobre niveles acuíferos más profundos (en parte a través de los sondeos que los comunican, como ya se ha comprobado en algunos casos), aunque tampoco se puede descartar que la infiltración por lluvia esté algo sobrevalorada, siendo difícil más precisión con los datos disponibles para este tipo de materiales.

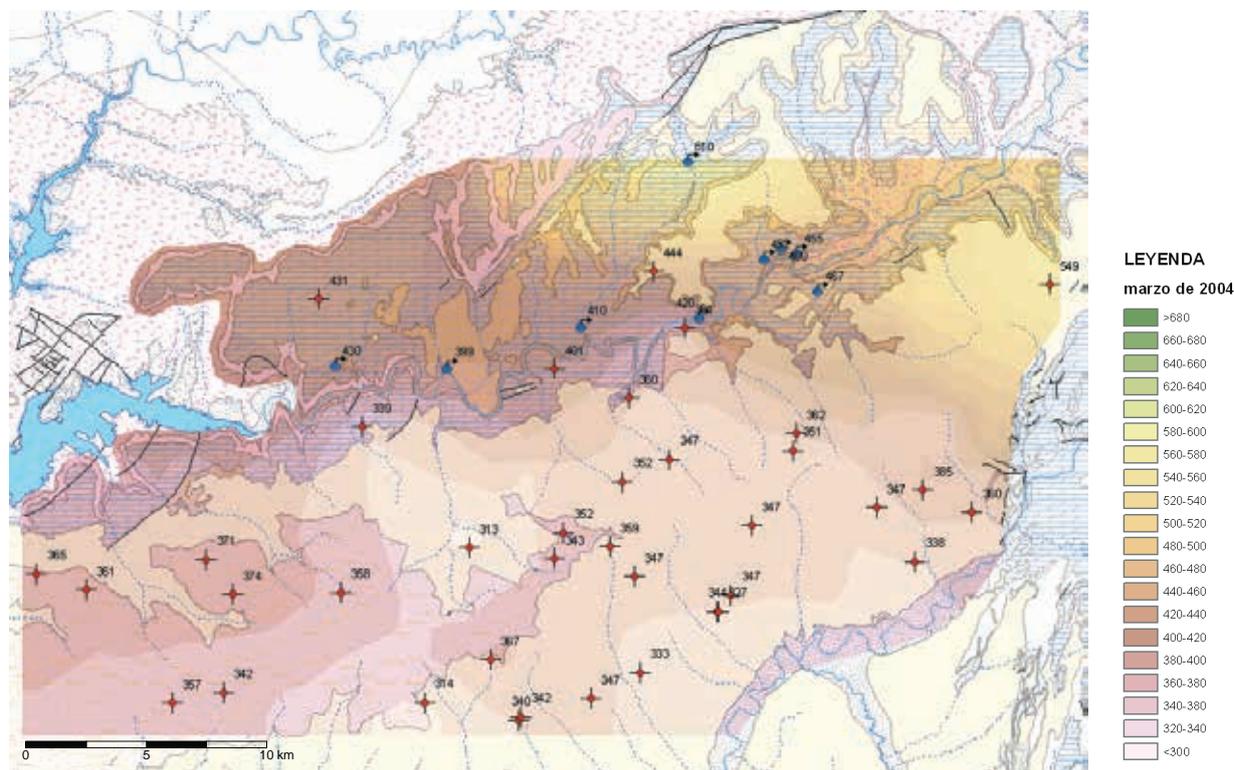


Figura 6. Plano de isopiezas del acuífero jurásico y triásico de la Loma de Úbeda. Periodo marzo de 2004

Recomendaciones

Las actuaciones futuras deben ir enfocadas a cubrir las lagunas de información existentes, especialmente importantes en lo que respecta al conocimiento de la geometría de los acuíferos confinados (acuíferos bajo el recubrimiento de margas miocenas, donde precisamente se produce la mayor explotación) y al seguimiento de la evolución de los niveles piezométricos en estos mismos acuíferos, cuestión que puede resolverse mediante la construcción de sondeos de investigación que posteriormente sean utilizados como piezómetros, pues con la excepción de los sondeos realizados por el IGME en el entorno del río Guadalimar, no existen piezómetros de control construidos para tal fin. Las medidas en la zona confinada son muy complejas, pues la mayoría de los sondeos están instalados, no disponen de tuberías piezométricas y los niveles piezométricos están muy profundos. Existe información piezométrica que cubre gran parte del acuífero jurásico en 1996, 2001 y 2004, y de la red de control en una serie de piezómetros puntuales que el IGME ha mantenido, pero es necesaria una actualización de información que permita conocer la situación presente.

Apenas se conoce la morfología de la superficie piezométrica ni su evolución temporal en el acuífero

triásico en la margen derecha de río Guadalimar, y se trata del acuífero más explotado en este sector. Además, las últimas investigaciones sugieren que este acuífero podría ser una fuente importante de recarga del acuífero jurásico, gracias a los juegos de fracturas existentes.

La investigación de las pautas de recarga presenta gran complejidad debido a la interacción entre los tres acuíferos y el río Guadalimar y, pese a los trabajos realizados, aún no está suficientemente bien conocida. Los acuíferos de la Loma de Úbeda están delimitados y atravesados por importantes ríos que presentan gran variabilidad anual e interanual en sus caudales. El aprovechamiento de los caudales en crecida puede mejorarse enormemente mediante la utilización de la recarga artificial, ya que la situación de estos acuíferos respecto a los ríos es idónea. Su viabilidad fue ya puesta de manifiesto en estudios anteriores. Debe plantearse como objetivo futuro, la instalación de un operativo experimental de recarga para evaluar la capacidad real de almacenamiento en diversos sectores del acuífero.

El acuífero mioceno también es poco conocido desde el punto de vista piezométrico, por lo que deben acometerse trabajos enfocados a definir su piezo-

metría tanto desde el punto de vista espacial como temporal.

Es necesario acotar los volúmenes de explotación actuales y los principales puntos de bombeo, labor muy compleja por el gran número de sondeos existentes.

05.24. Bailén-Guarromán-Linares

Si se tiene en cuenta exclusivamente el grado de explotación de la MASb en su conjunto, el agua extraída por bombeo (24,19 hm³/año para el año 2008 y 29,80 hm³/año para el 2009), excede en gran medida los recursos renovables calculados (entre 14,0 y 16,8 hm³/año), alejándose del concepto de uso sostenible. En consecuencia, la medida preventiva más adecuada es la declaración de sobreexplotación del conjunto de la MASb, proponiéndose como medida alternativa la aplicación de la norma de explotación que tenga en cuenta en cada acuífero de los que forman la MASb, entre otras, las condiciones de aprovechamiento en cuanto a volúmenes de agua reservados para uso urbano y su perímetro de protección u otros usos y las características geológicas y técnicas de cada una de las captaciones y su dimensionamiento.

Fundamentos

La información disponible es la referida únicamente a una situación puntual en el tiempo (enero de 2000) y aunque refleja un importante descenso de la superficie piezométrica en la zona sur del acuífero, se desconoce si se trata de una situación excepcional o si ha tenido una continuidad en los 10 años transcurridos hasta la actualidad. El no disponer de la ubicación de las captaciones de agua subterránea, hace que no sea posible discriminar entre los dos acuíferos que integran la MASb (Bailén-Guarromán y Linares) por lo que podría darse el caso de que uno de ellos se encuentre en riesgo de sobreexplotación y el otro no, a lo que habría que añadir un cierto grado de incertidumbre en cuanto a la relación hidrogeológica entre ambos acuíferos.

No existe ningún punto de la red actual de piezometría en la MASb. Tampoco existe red hidrométrica oficial de manantiales dentro de su poligonal envolvente. Con los datos de profundidad del nivel piezométrico de la base de datos AGUAS del IGME para enero de 2000, se trazó un mapa de isopiezas, (figura 7) que refleja que las líneas isopiezas dibujan un importante conoide de descenso en la zona sur del acuífero, quedando la zona norte con cierta falta de información. La falta de

puntos de control piezométrico en este acuífero hace que se desconozca la evolución temporal de la piezometría.

Dentro de la MASb existen dos puntos pertenecientes a la red de seguimiento del Estado Químico del Agencia Andaluza del Agua (AAA). El agua del acuífero de Bailén-Guarromán es de facies bicarbonatada cálcica o cálcico-magnésica con algún caso de agua sulfatada cálcica posiblemente debido a la comunicación del acuífero mioceno con el superficial, más rico en sulfatos, mientras que el acuífero de Linares presenta una facies bicarbonatada cálcica con un total de sólidos disueltos inferior a 500 mg/L.

Las entradas de agua a ambos acuíferos se deben principalmente al drenaje diferido de los materiales suprayacentes al acuífero, y en menor medida a la infiltración directa del agua de lluvia. Así, considerando el balance incluido en la norma de explotación de la unidad hidrogeológica 05.24 (Bailén-Guarromán-Linares), actualizada y modificada. (2001), las entradas en el conjunto de la MASb suponen entre 14,0 y 16,8 hm³/año.

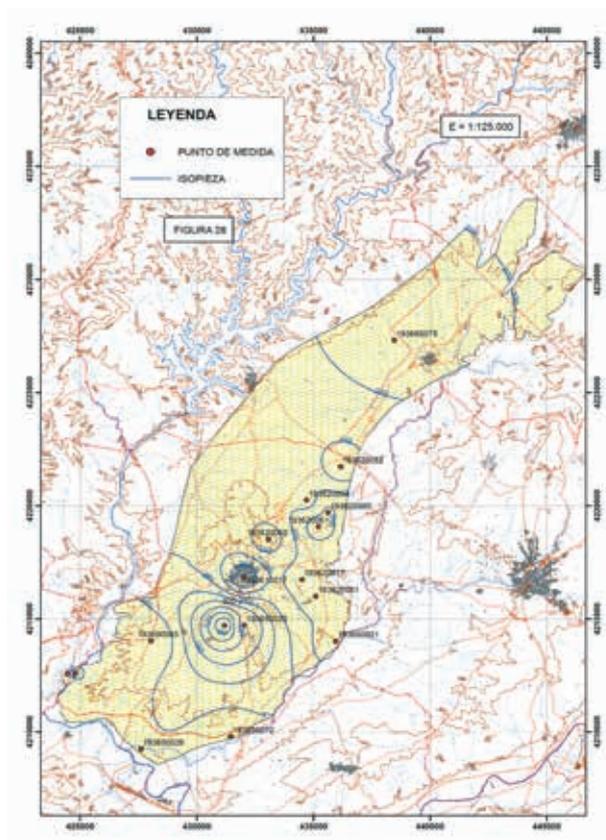


Figura 7. Mapa piezométrico del acuífero de Bailén-Guarromán enero del 2000 (Martín Montañés, 2007)

La explotación por bombeo en el año 2009, según la información facilitada por la CHG es de 29,80 hm³/año, lo que arrojaría un déficit cifrado entre 13,28 y 15,08 hm³/año. También se dispone de la explotación por bombeo para el año 2008 (fuente CHG) que es de 24,19 hm³/año, distribuidos en 21,99 hm³/año para riego, 0,19 hm³/año para abastecimiento urbano y 2,01 hm³/año para la industria.

Recomendaciones

La falta de información en cuanto a la distribución espacial y en el tiempo de los puntos de extracción y su discriminación por acuífero, junto con la inexistencia de puntos de control de evolución piezométrica, calidad e hidrometría hacen necesario llevar a cabo las siguientes actuaciones:

- Implantación de una red de control piezométrico en ambos acuíferos.
- Determinación de la ubicación de las captaciones.
- Realización de estudios complementarios dirigidos a aumentar el conocimiento hidrogeológico de la MASb sobre todo del acuífero de Linares, de su relación con el de Bailén-Guarromán y de ambos con el acuífero aluvial del Guadalquivir de la MASb 05.26 "Aluvial del Guadalquivir (Curso Alto)".

05.25. Rumblar

Considerando que el volumen de agua extraída por bombeo de esta MASb (11 hm³/año) junto con las salidas ocultas a la MASb vecina 05.26 "Aluvial del Guadalquivir (Curso Alto)" (3-6 hm³/año), exceden en gran medida de los recursos renovables calculados (de entre 3 y 10 hm³/año) se propone como medida para subsanar esta situación, la declaración de sobreexplotación, acompañada de la implementación de un plan de ordenación de aprovechamientos de la MASb.

Fundamentos

La información piezométrica disponible no indica un importante descenso de la superficie piezométrica, si bien hay que considerar que el periodo de medida es de apenas un año y medio y se trata de un punto situado en el límite sur de la MASb, hacia donde se dirige el flujo natural. La información hidroquímica tampoco es indicativa de sobreexplotación, aunque los valores observados son elevados con oscilaciones importantes y comportamientos muy diferentes. Este comportamiento

junto al escaso número de observaciones conlleva una escasa representatividad.

La densidad de las estaciones se puede considerar insuficiente y desde un punto de vista ambiental los valores observados de nitrato son excesivos, por lo que sería conveniente determinar su origen, si bien este aspecto no es indicativo de sobreexplotación. Asimismo, del estudio de las relaciones río-acuífero no se desprende ninguna consideración sobre la posible sobreexplotación de la MASb ya que la información es solamente de carácter bibliográfico.

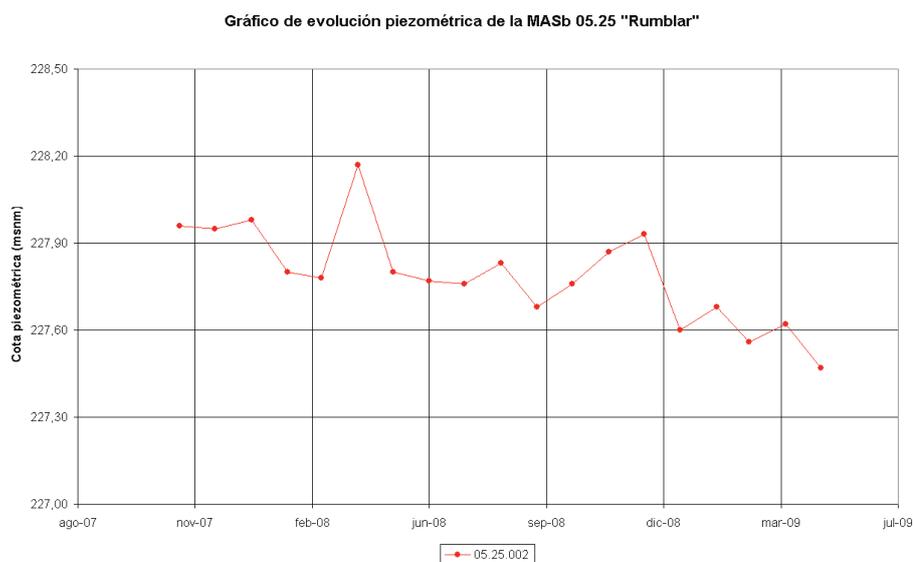
En cuanto a las redes de control, existe un único punto de la red nacional de piezometría (figura 8), al igual que de la red de seguimiento del estado químico (Agencia Andaluza del Agua), no disponiéndose de ningún punto de la red hidrométrica oficial de manantiales dentro de su poligonal envolvente.



Figura 8. Distribución espacial de las estaciones de seguimiento en la MASb 05.25

Con la información disponible, el nivel piezométrico se sitúa entre 0 y 50 m de profundidad, existiendo algunos sondeos surgentes (figura 9). En los sectores septentrionales, está próximo a la cota 360, descendiendo hacia el Sur, hasta cotas próximas a 260 ms.n.m. La dirección principal de los flujos es N-S, siendo E-O en las inmediaciones de los arroyos de Escobar, Las Piedras y La Fresneda, por constituir áreas de drenaje.

Figura 9. Evolución piezométrica de la MASB "Rumblar" 05.25



Las entradas de agua al acuífero se deben principalmente a la infiltración directa del agua de lluvia, ya que el retorno de riego se considera mínimo debido a que está implantado el riego por goteo en la totalidad de la zona regada. Así, considerando el balance incluido en la norma de explotación de la unidad hidrogeológica 05.25 (Rumblar), actualizada y modificada (2001), las entradas en el conjunto de la MASb suponen entre 6 y 10 hm³/año. Las salidas consideradas en ese mismo balance incluidas salidas por manantiales y galerías (0,5-1 hm³/año) y ocultas a la MASb 05.26 "Aluvial del Guadalquivir (Curso Alto)" (3-6 hm³/año) a las que deben sumarse los casi 11 hm³/año de extracciones por bombeo. Por tanto, las salidas, aún descontando 1 hm³/año que probablemente no surge en la actualidad por los manantiales que drenan la MASb, suman un total de entre 14 y 17 hm³/año lo que arroja un déficit cifrado en un valor entre 4 y 11 hm³/año. La explotación por bombeo para el año 2009, según información facilitada por la CHG es de 11,25 hm³/año. También se dispone de la explotación por bombeo para el año 2008 (fuente CHG) que es de 6,88 hm³/año, distribuidos en 6,65 hm³/año para riego y 0,228 hm³/año para la industria.

Recomendaciones

La falta de información en cuanto a la distribución de los puntos de extracción y su discriminación por acuífero junto con la inexistencia de puntos de control y datos históricos de la evolución piezométrica, hacen necesario llevar a cabo las siguientes actuaciones:

- Ampliación de las redes de control piezométrico, hidrométrico y de calidad.

- Determinación de la ubicación de las captaciones de aguas subterráneas.
- Realización de estudios complementarios dirigidos a aumentar el conocimiento hidrogeológico de la MASb sobre todo de su relación con el acuífero aluvial del Guadalquivir de la MAS 05.26 "Aluvial del Guadalquivir (Curso Alto).

05.38. EL Pedroso-Árcas

El balance hídrico para el conjunto de acuíferos incluidos en esta MASb: Pedroso, Arcas-Cerro Gordo, Cuevas Altas y Campo-Agro, (figura 10) con un funcionamiento hidrogeológico independiente, es del orden de los 4.9 hm³/año, de los que se extraen por bombeos del orden de los 3 hm³/año, el resto corresponden a salidas por manantiales, difusas y ocultas.

Aunque se observa un equilibrio hídrico, existen síntomas que apuntan a que se está haciendo un uso intensivo del agua subterránea en todos los acuíferos de esta MASb, por ello parece conveniente controlar las nuevas autorizaciones de extracción de agua subterránea, siguiendo las normas de explotación y proceder a la declaración de sobreexplotación o en riesgo y elaborar un plan de ordenación de las extracciones, que tenga en cuenta independientemente, el conjunto de acuíferos identificados en esta MASb a diferenciación, estableciendo para cada uno de ellos las condiciones de explotación.

Hay que tener en cuenta que el acuífero de Campo-Agro fue incluido en el catálogo de acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización realizada por

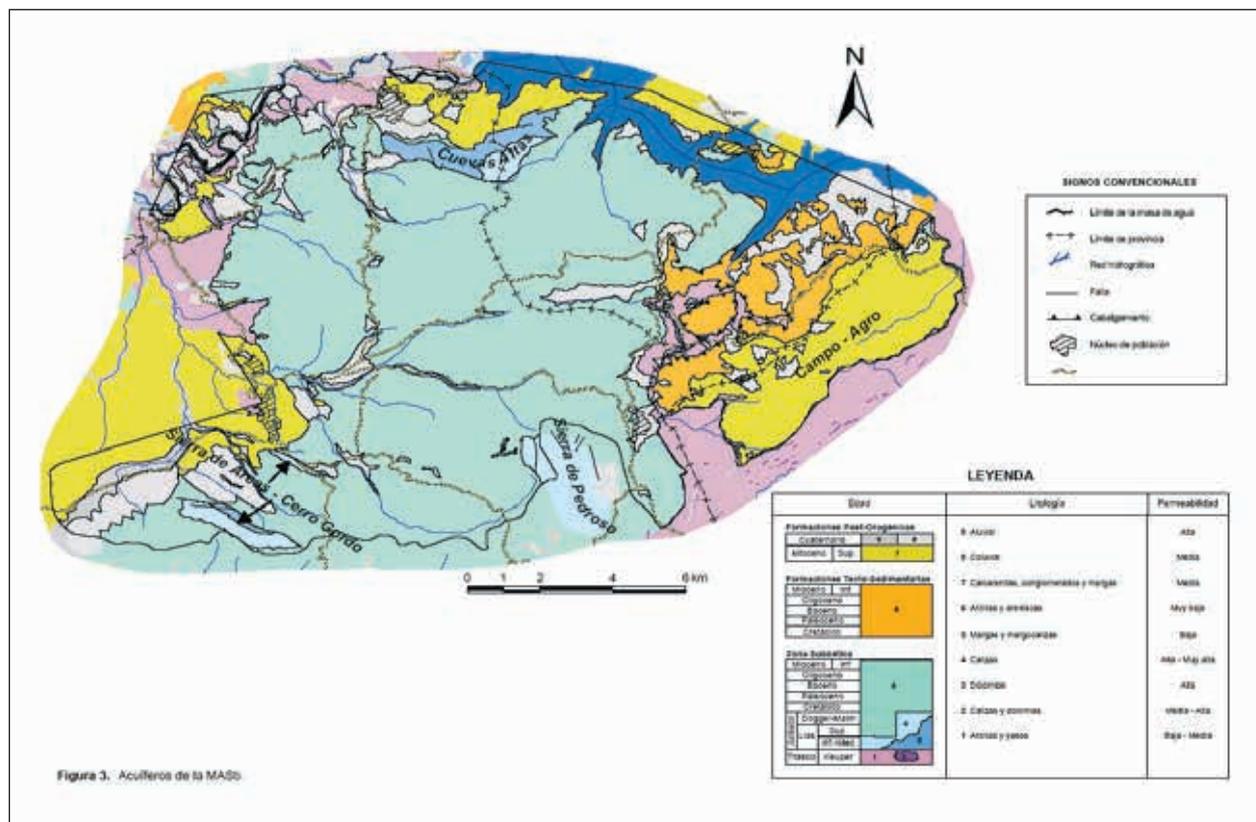


Figura 10. Acuíferos de las MASb “ El Pedro-Arcas”

el Ministerio de Medio Ambiente en 1997, en el que se indicaba que el volumen de agua explotado ya ponía en peligro el abastecimiento de algunas poblaciones y las salidas naturales del acuífero.

Fundamentos

Teniendo en cuenta el balance de forma individualizada, el acuífero del Pedroso funciona como un área de infiltración de agua que se trasfiere subterráneamente en dirección desconocida, siendo la recarga estimada del orden de 1 hm³/año, con unas salidas de 0.1 por bombeos y el resto 0.5 por otras formas (manantiales, difusas o ocultas). En el acuífero de Arcas-Cerro Gordo, la recarga está evaluada en 0,5 hm³/año. No se dispone de datos precisos de las extracciones, pero la cifra estimada podría ser equivalente a los recursos propios (0,5 hm³/año). Algún sondeo de abastecimiento a Villanueva de Algaidas ha sido abandonado por el incremento de la salinidad del agua captada, cuestión que parece estar relacionada con el uso intensivo del agua subterránea de este acuífero. El acuífero de Campo- Agro, debe su principal salida a las extracciones por bombeo (2,0 hm³/año) (IGME 2002), siendo la recarga de 2,7 hm³/año (IGME 2002). Para el acuífero de Cuevas Altas, su recarga

se ha calculado en 0,7 hm³/año estando evaluadas las extracciones por bombeo en 0,4 hm³/año y 0,4 hm³/año por manantiales y formas difusas.

No existe información piezométrica de esta MASb, tan solo existe un punto de control de la red oficial de calidad, siendo la gran mayoría de las aguas de la MASb de naturaleza bicarbonatada-cálcica. Algunos puntos, en el sector suroccidental de la Sierra de Campo Agro, son de facies sulfatada cálcica, debido posiblemente a la influencia de materiales triásicos. La dureza es media, con mineralización que oscila entre ligera a notable.

Recomendaciones

Las incógnitas que aún existen en relación con el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos incluidos en esta MASb y su posible interrelación hacen necesaria la realización de un estudio hidrogeológico que permita apoyar cualquier tipo de decisión para la gestión de sus aguas subterráneas.

El déficit de información en cuanto a, la distribución de los puntos de extracción y su discriminación por acuífero, junto a la inexistencia de puntos de control, de datos

históricos de evolución piezométrica, calidad y del caudal drenado por los manantiales, hace necesario llevar a cabo las siguientes actuaciones:

- Puesta en marcha de una red de control piezométrico, hidrométrico y de calidad de las aguas subterráneas
- Determinación de la ubicación y explotación de las captaciones de agua subterránea
- Realización de estudios complementarios dirigidos a aumentar el conocimiento hidrogeológico de la masa sobre todo de las situaciones individuales de cada acuífero y de su relación con los demás integrantes de la MASb.

05.41. Guadahortuna-Larva

En esta MASb, formada por materiales de distintas características litológicas y de permeabilidad, se ubican un conjunto de acuíferos, de los que se carece de información precisa para estimar la evolución de los niveles piezométricos y el balance hídrico de cada uno de esos acuíferos y por tanto del total de la MASb.

El volumen de agua extraída por, es de 16,4 hm³/año en 2009. Este volumen supera a las entradas de 12,5 hm³/año consideradas en el balance redactado en 2001 (pero de origen anterior) y el grado de explotación se aleja del concepto de uso sostenible. Es por ello que, en tanto no se disponga de mayor información en la que se ponga de manifiesto, al menos, el valor de extracción de aguas subterráneas que corresponde a cada acuífero, se propone como medida previa a la declaración de sobreexplotación, la elaboración de una norma de explotación de esta masa de agua subterránea que tenga en cuenta en cada acuífero, además de las extracciones por bombeo correspondientes a cada uno, las condiciones de aprovechamiento en cuanto a volúmenes de agua reservados para uso urbano y su perímetro de protección u otros usos y las características geológicas y técnicas de cada una de las captaciones y su dimensionamiento.

Asimismo, hay que hacer constar que el sector Chotos-Cortijo Hidalgo (anteriormente denomina-

do Acuífero Chotos-Cortijo Hidalgo) perteneciente al Acuífero Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos de la Subunidad Larva-Solera fue “*declarado sobreexplotado o en riesgo de estarlo según acuerdo de la Junta de Gobierno de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (BOP. Jaén de 24 de Octubre de 1992)*” proponiéndose también la continuidad de esa declaración.

Fundamentos

El conjunto de niveles productivos se han agrupado de acuerdo a su composición litológica: *Acuíferos carbonatados jurásicos y miocenos*: Subunidad de Larva-Solera: Acuífero de Cabra de Santo Cristo, Acuífero de Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos y Acuífero de Larva; Subunidad de Gante-Santerga: Acuífero de los Gallardos, Acuífero de Santerga y Acuífero de La Serreta-Gante-Cabeza Montosa; *Acuíferos calcareníticos oligocenos-aquitanienses*: Subunidad de Altos de Torrecardela y *Acuíferos detríticos*: Subunidad Plio-cuaternaria de la Depresión de Guadahortuna y Subunidad del Aluvial del Río Guadahortuna

La explotación por bombeo de la MASb para el año 2009, según información facilitada por la CHG, es de 16,42 hm³/año También se dispone de la explotación por bombeo para el año 2008 (fuente CHG) cifrado en 11,42 hm³/año distribuidos en 10,78 hm³/año para riego, 0,52 hm³/año y 0,12 hm³/año para la industria.

En cuanto a los datos disponibles de las redes de control, existen dos puntos de la red nacional de piezometría y los datos aportados por la Diputación Provincial de Jaén, que realiza conjuntamente con el IGME medidas periódicas de la profundidad en los sondeos Majablanquilla II, en el acuífero de Larva, y del sondeo Comunidad de Regantes (203870011), del acuífero de Cabra del Santo Cristo (tablas 4 y 5).

No existe ningún punto de la red hidrométrica oficial de manantiales dentro de la poligonal envolvente de la

Nº	Nombre	Provincia	Municipio	X	Y	Z (ms.n.m.)	Prof (m)	Inicio	Acuífero
05.41.001		Jaén	Cabra del Sto. Cristo	472638	4171588	1292	293	nov-07	Cabra del Sto. Cristo
05.41.003	Los Navajuelos	Jaén	Larva	481014	4177327	810	200	sep-07	Larva

Tabla 4. Características de los puntos de la red oficial de control piezométrico

N.º IGME	Nombre	Prov.	Municipio	X	Y	Z (ms.n.m.)	Prof (m)	Inicio	Acuífero
203840035	Majablanquilla II	Jaén	Larva	480775	4179011	835	210	mar-06	Larva
203870011	Comunidad de Regantes	Jaén	Cabra del Sto. Cristo	474375	4174350	1010	60	abr-04	Cabra del Sto. Cristo

Tabla 5. Características de los puntos de la red oficial de control de calidad

MASb. Se dispone, de dos puntos pertenecientes a la red de seguimiento del estado químico (AAA) codificados en el acuífero de Subunidad del Aluvial del río Guadahortuna y otro en el acuífero de Cabra del Santo Cristo. La escasez de datos de la red nacional no permite hacer ninguna consideración. Sin embargo, la serie de medidas del sondeo Comunidad de Regantes (203870011) del acuífero de Cabra del Santo Cristo sí tiene un número de datos significativos (4 años) y presenta un descenso progresivo prácticamente constante con leves recuperaciones relativas del nivel piezométrico. La tasa de descenso es de 6,6 m/año. En el caso del acuífero de Larva, el punto Majablanquilla II (203840035) con una serie de 2 años presenta una curva también con pendiente negativa y con una tasa de descenso de 4,4 m/año.

Recomendaciones

El déficit de información en cuanto a la distribución de los puntos de extracción y su discriminación por acuífero, junto con la inexistencia de puntos de control y datos históricos de evolución piezométrica, calidad y del caudal drenado por los manantiales, hacen necesario llevar a cabo las siguientes actuaciones:

- Ampliación de la red de control piezométrico, hidrométrico y de calidad de las aguas subterráneas.
- Determinación de la ubicación de las captaciones de agua subterránea.
- Realización de estudios complementarios dirigidos a aumentar el conocimiento hidrogeológico de la masa sobre todo de las situaciones individuales de cada acuífero y de su relación con los demás integrantes de la MASb.

05.43. Sierra Y Mioceno de Estepa

La MASb Sierra y Mioceno de Estepa, la componen diez acuíferos: acuíferos carbonáticos de la Sierra de Estepa (acuíferos de Becerrero, Águilas-Guinchón, Pleites, Hacho de Lora y Mingo), de los Caballos y de los Almadenes, y los acuíferos detríticos del Mioceno de Estepa, del Saucejo y de Martín de la Jara; todos con un funcionamiento hidrogeológico independiente (figura 11).

A partir de la información disponible, se puede indicar que, a tenor de los balances hídricos realizados y de la respuesta hidrométrica y piezométrica de los acuíferos de la unidad del Hacho de Lora-Mingo-Guinchón, su utilización constituye un evidente ejemplo de explotación intensiva de las aguas subterráneas que, en el caso del acuífero de Águilas-Guinchón, es manifiestamente preocupante.

Fundamento

Respecto a los datos utilizados para el balance del resto de acuíferos de la MASb se han tomado de diferentes fuentes, todas ellas muy desactualizadas. Esta situación anómala se debe a la falta de estudios hidrogeológicos específicos y actualizados para cada uno de los acuíferos diferenciados en la MASb. En tanto no se disponga de mayor información, se propone como medida la declaración de sobreexplotación, la elaboración de una norma de explotación de esta masa de agua subterránea que tenga en cuenta en cada acuífero, entre otras, las condiciones de aprovechamiento en cuanto a volúmenes de agua reservados para uso urbano y su perímetro de protección, otros usos, las características geológicas y técnicas de cada una de las captaciones y su dimensionamiento.

El grado de conocimiento de los acuíferos que componen la MASb muy dispar. Así, los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Estepa son bien conocidos, pero no ocurre lo mismo con el resto de los acuíferos. Este hecho condiciona el dictamen que se puede hacer de cada uno de estos acuíferos respecto a la conveniencia o no de su declaración como acuífero sobreexplotado individualmente. Tan sólo se podría emitir una opinión fundamentada en el caso de los acuíferos de la Sierra de Estepa.

Las redes de control del estado cuantitativo y cualitativo que son gestionadas actualmente, no son suficientes en esta MASb dado que la mayoría de los acuíferos carecen de puntos de control. Llama la atención la ausencia de redes de control de las aguas subterráneas de acuíferos como el de Águilas-Guinchón, que abastece a cuatro poblaciones sevillanas en exclusiva, y en el que existe un

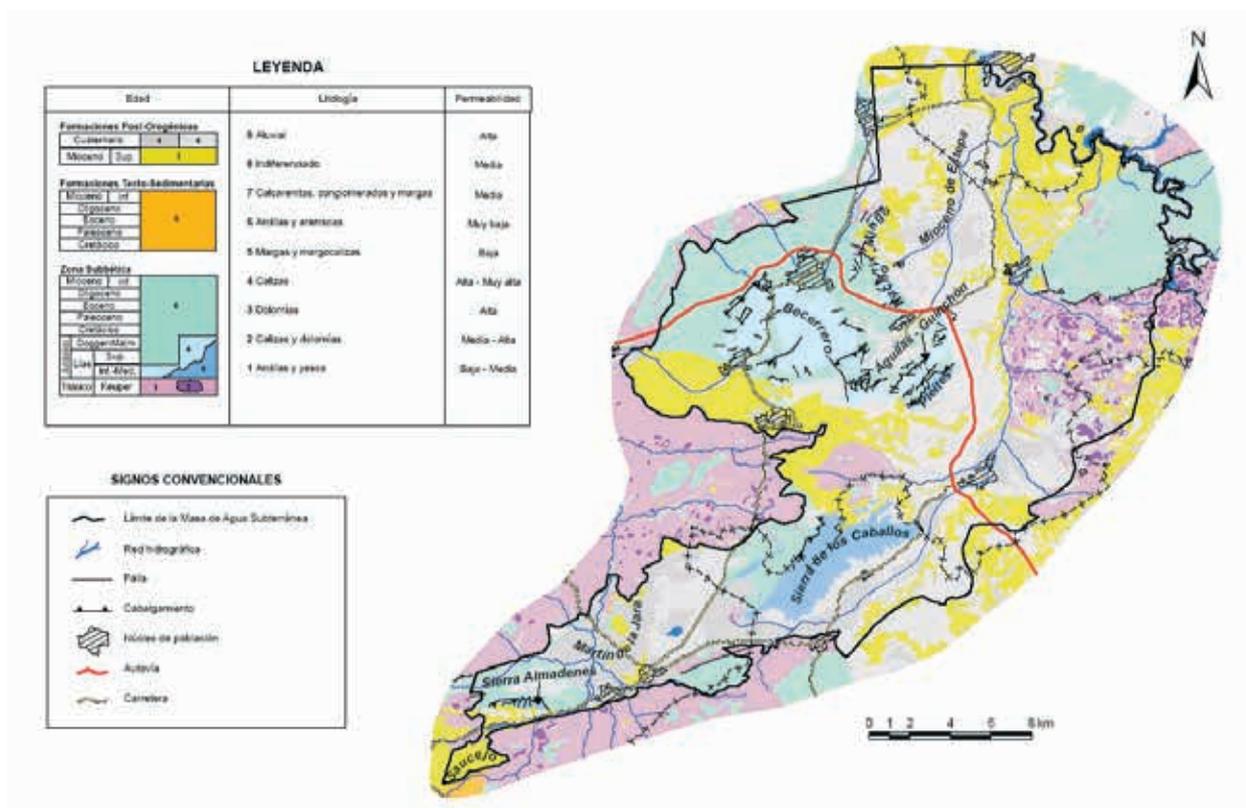


Figura 11. Acuíferos de la MASb “Sierra y Mioceno de Estepa”

piezómetro instalado por el IGME habilitado para tal fin, que no es controlado por la AAA. (tablas 6, 7 y 8)

En el balance de los acuíferos de la Sierra de Estepa se han considerado los valores medios de las salidas corres-

Identificación	N.º IGME	Provincia	Municipio	X	Y	Z	Prof	Fecha inicio medidas
05.43.002		Sevilla	Gilena	330954,0	4124837,0	471	271	01/01/2007
05.43.003	154180004	Sevilla	Pedraera	332242,0	4122246,0	464	80	01/05/1976
05.43.006	164110036	Sevilla	Estepa	336380,0	4124740,0	480	100	01/01/1985
05.43.007		Sevilla	Estepa	337547,0	4131486,0	355	125	01/01/2007

Tabla 6. Puntos de control piezométrico de la AAA en la MASb 050.43.

Identificación	N.º IGME	Manantial	Provincia	Municipio	X	Y	Z	Fecha inicio medidas
05.43	164110018	Lora de Estepa	Sevilla	Lora de Estepa	338053,0	4126400,0	435,0	01/10/1979
	154140021	Ojo de Gilena	Sevilla	Gilena	330675,0	4124980,0	469,0	01/11/1966

Tabla 7. Puntos de control hidrométrico de la AAA en la MASb 050.043

Identificación	Código	UTMX	UTMY	Punto de control
84	5.38.01	387005	4119285	Cortijo de la Torre
92	5.43.01	341614	4134595	La Mina
93	5.43.11	335345	4113220	Abastecimiento de Sierra Yeguas
94	5.43.12	336296	4126130	Fuente de Santiago (Abto. Estepa)
95	5.43.13	332150	4123125	Pozo Matagallar
96	5.43.21	327533	4111714	Laguna de Gosque

Tabla 8. Puntos de control de calidad de la AAA en la MASb 050.43.

pendientes al periodo 2003-2006; en el caso de las entradas, se ha analizado toda la información disponible, con el objetivo de estimar un valor lo más representativo posible de los recursos medios renovables del acuífero Sierra de Estepa: Sector Sierra de Becerrero (tabla 9), entradas 6,0 hm³/año, salidas: 5,3 hm³/año.

En el sector acuífero de Hacho de Lora-Mingo-Guinchón, están diferenciados cuatro acuíferos carbonáticos, desconectados hidráulicamente entre sí: acuíferos de Hacho de Lora, Mingo, Águilas-Guinchón y Pleites. El mayor de ellos es el de Águilas-Guinchón, en el que la escasa precipitación anual media y la marcada irregularidad interanual de ésta, combinada con la explotación intensa de sus aguas subterráneas, lo hace altamente proclive a sufrir situaciones de desequilibrio hídrico. En este sector de Águilas-Guinchón, existe un descenso acumulado de más de 63 m en el periodo 1997 a 2009. Los recursos medios renovables de los cuatro sistemas son de 2,2 hm³/año y se explotan 2,8 hm³/año, aspecto que se manifiesta en una disminución continuada de reservas en alguno de ellos y que ha provocado serios problemas, durante los últimos años, en el abastecimiento mancomunado que se hace desde el acuífero de Águilas-Guinchón (tabla 10).

Entradas (hm ³ /año)	Acuífero de la Sierra de Becerrero (hm ³ /año)
Entradas	
Infiltración del agua de lluvia	6,0
Salidas	
Salidas por bombeos	4,6
Salidas por manantiales	0,7
E-S	0,7

Tabla 9. Ensayo de balance hídrico del acuífero de la Sierra de Becerrero (Martos-Rosillo 2008)

	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)	E-S (hm ³ /año)
Mingo	0,16	0,282	-0,122
Hacho de Lora	0,305	0,334	-0,029
Águilas-Guinchón	0,995	1,806	-0,811
Pleites	0,48	0,35	0,13
Total	1,94	2,772	-0,832

Tabla 10. Ensayo de balance hídrico del acuífero de Águilas-Guinchón (Martos-Rosillo 2008)

Se presenta toda la información piezométrica del acuífero de la Sierra de Becerrero (figura 12), y se compara

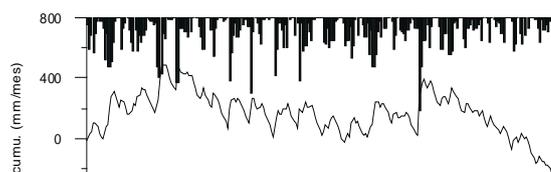


Figura 12. Precipitación mensual, desviación de la precipitación mensual, evolución piezométrica y puntos de control de la Sierra de Becerrero y extracciones anuales. Periodo 1976-2006 (Martos-Rosillo 2008).

con la precipitación mensual (medida en el observatorio de Estepa), con la desviación de la precipitación mensual respecto a la media y con las extracciones anuales. Asimismo, se señala, con una línea discontinua, la cota de los principales manantiales (466 m s.n.m.). Los dos rasgos más destacados que se ponen de manifiesto en esta figura son: los importantes periodos de tiempo en los que los niveles piezométricos del acuífero están por debajo de la cota de surgencia de los manantiales y la evolución del nivel piezométrico del sondeo de explotación Matagallá

En la figura 13 se representa toda información piezométrica correspondiente a los acuíferos de la unidad geológica del Hacho de Lora-Mingo-Guinchón. En la gráfica destacan la distinta evolución piezométrica que presentan los acuíferos diferenciados y la evolución manifiestamente descendente de los niveles piezométricos correspondientes al acuífero de Águilas-Guinchón. En el acuífero de Águilas-Guinchón los descensos acumulados desde 1997 a 2009 son de 63 m. La variación temporal en el acuífero de Pleites también presenta una tendencia descendente al haberse iniciado una intensa explotación para sustituir parte de los bombeos que se realizan para abastecimiento en Águilas-Guinchón (figura 13).

El régimen de bombeo que se realiza en el acuífero de Águilas-Guinchón, con una explotación muy regular durante todo el año, para cubrir el abastecimiento de la población, genera una respuesta piezométrica con unas variaciones de nivel intra-anales no muy marcadas; no obstante, la tendencia de los niveles es claramente descendente desde 1996.

En el acuífero de Pleites la información piezométrica es muy reducida si bien se ha constatado un descenso acumulado del mismo desde 2005 a 2010 de unos 10 m por lo que no es posible llevar a cabo un estudio detallado que pueda considerarse suficientemente significativo; con todo, la distinta evolución de los niveles piezométricos con respecto al acuífero vecino de Águilas-Guinchón, pone de manifiesto la falta de conexión hidráulica entre ambos.

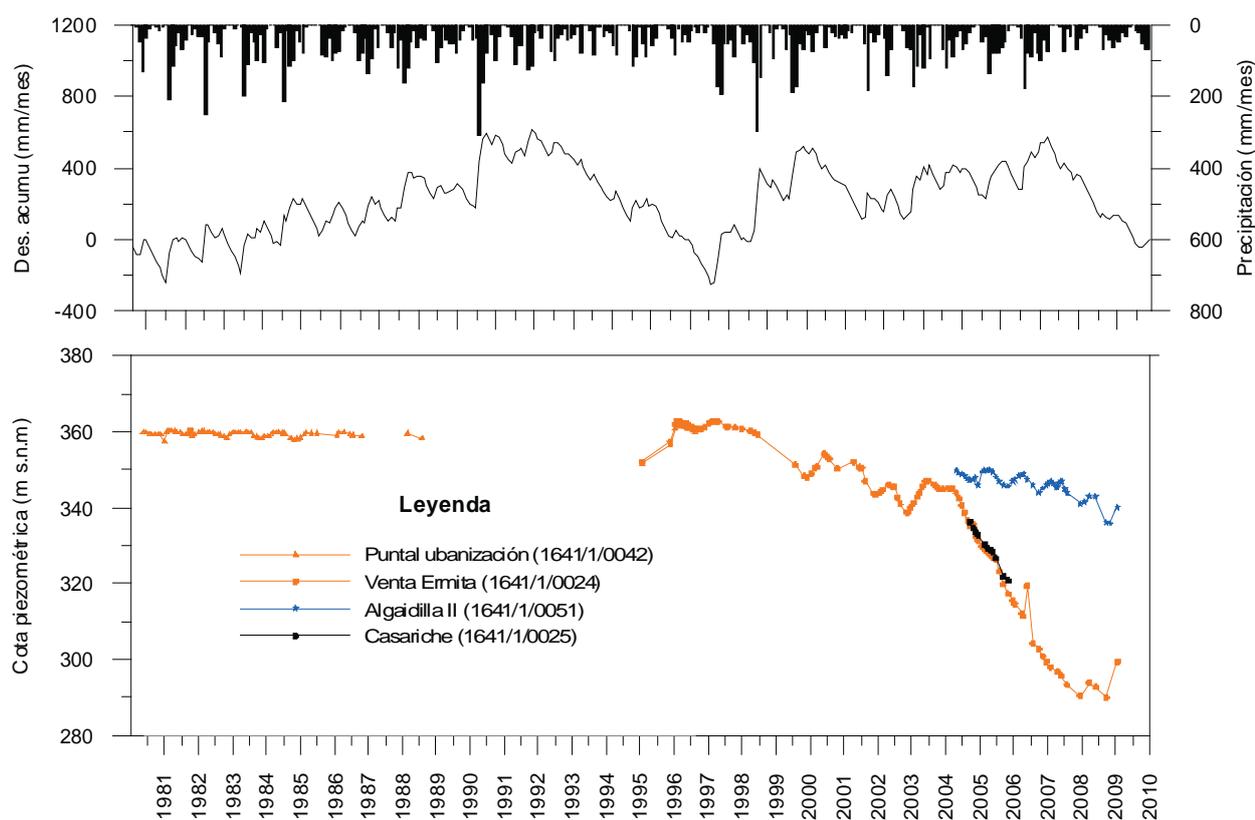


Figura 13. Precipitación mensual, desviación de la precipitación mensual, evolución piezométrica y puntos de control del Hacho de Lora-Mingo-Guinchón. Período 1981-(Martos-Rosillo 2008).

Respecto a la variación temporal de las características hidroquímicas de las aguas subterráneas de los acuíferos de la Sierra de Estepa, se puede indicar que la fuerte explotación, el reducido tamaño de los acuíferos de la Sierra de Estepa y la gran difusividad hidráulica de los materiales favorecen que el efecto hidrodinámico de las extracciones, se propague de forma rápida en cada uno de los sistemas acuíferos, produciéndose un descenso del potencial hidráulico que crea las condiciones hidrodinámicas necesarias para que se produzca la mezcla con las aguas subterráneas de los materiales acuitados y acuíferos que se sitúan en el sustrato y en los bordes de los acuíferos.

En este sentido, en 2009 se propusieron una serie de recomendaciones para la mejor gestión y protección de los acuíferos de Becerrero y de Águilas-Guinchón.

En el acuífero de la Sierra de los Caballos, los datos disponibles ponen de manifiesto una fluctuación piezométrica intra-anual comprendida entre 3 y 5 m. La importante explotación a la que está sometido este acuífero ha ocasionado abatimientos de la piezometría, en estos sectores, de hasta 11 m, si bien, en la actualidad los niveles están próximos a los que presentaba el sistema en régimen no influenciado. De los balances hídricos

realizados (IGME, 2002) se deduce un valor de recursos medios renovables de 2,7 hm³/año, mientras que la explotación mediante sondeos representa 2,9 hm³/año.

La información piezométrica disponible por el IGME del acuífero de la Sierra de los Caballos, prueba la existencia de una bajada generalizada de los niveles piezométricos en la última década que puede estar relacionada con el incremento de la explotación del acuífero.

Los escasos datos piezométricos disponibles del acuífero de la Sierra de Almadenes indican cierta tendencia descendente aunque la cadencia de medida y la representatividad de los datos es reducida. El acuífero de la Sierra de los Almadenes se alimenta, exclusivamente, por infiltración del agua de lluvia, y se descarga por las fuentes de El Esparto y El Tejar, en el extremo SE y hacia el arroyo de La Parra, al S. El nivel piezométrico de la única captación de la que se dispone de información, junto a la Fuente del Esparto, se sitúa entre 370 y 378 m s.n.m. La recarga media es inferior a 0,2 hm³/año, incluida la que se produce en los afloramientos mioceños contiguos y las salidas por bombeo son del orden de 10.000 m³/año. El agua presenta una conductividad eléctrica (CE) media de 1200 µS/cm.

El acuífero detrítico del Saucejo, es libre, y se recarga por infiltración directa del agua de lluvia. La superficie piezométrica se encuentra entre 5 y 10 m de profundidad y las fluctuaciones intra-anales son del orden de 2 m. La recarga media ha sido evaluada en 1 hm³/año. Las salidas por bombeo son del orden de 0,35 hm³/año, si bien esta última cifra no tiene prácticamente ninguna validez al no estar actualizada desde los años ochenta del pasado siglo.

El acuífero detrítico de Martín de la Jara, se recarga por infiltración directa del agua de lluvia y por retornos de riego. Las salidas se producen, fundamentalmente, hacia los arroyos de la Fuente y Salado y hacia la laguna del Gosque. El nivel piezométrico se encuentra a profundidades máximas de 5 m y fluctúa a lo largo del año entre 1 y 3 m. La recarga media es de 1,3 hm³/año y las salidas por bombeo se estimaron en 1 hm³/año. Los datos de bombeo disponibles datan de finales de los ochenta del siglo pasado.

El último balance del que se dispone del acuífero Mioceno de Estepa, se cita en el Atlas Hidrogeológico de la provincia de Sevilla (Durán 2003). Las entradas se cifraron en 4,2 hm³/año, mientras que las salidas se reparten en 3 hm³/año, para el riego, 1 hm³/año, para industria y para abastecimiento a las poblaciones de Puente Genil y la pedanía de La Mina. El resto (0,2 hm³/año) se supone que se drena hacia los ríos Genil y Yeguas.

En general la red de piezometría de la AAA sólo permite obtener información de 2 de los 10 acuíferos que forman la MASb, mientras que la red de hidrometría sólo considera dos sectores de uno de estos 10 acuíferos.

Recomendaciones

La falta de información de datos hidrogeológicos (explotación, piezometría, hidrometría e hidroquímica), tanto espaciales como temporales, en los acuíferos detríticos de la MASb (Saucejo, Martín de la Jara y Mioceno de Estepa) y en los acuíferos de la Sierra de los Caballos y Almadenes, hacen necesaria la actualización de su conocimiento hidrogeológico, para lo que será necesaria:

- La implantación de una red de control de las aguas subterráneas (se pueden aprovechar de los antiguos pozos y sondeos de abastecimiento).
- La actualización y georeferenciación de las explotaciones de cada acuífero.
- La evolución de la recarga y de las reservas de cada acuífero.

05.49. Niebla-Posadas

La evolución piezométrica en esta MASb, así como el balance hídrico y la evolución histórica en el conjunto de los diferentes acuíferos o sectores de situadas en ella, ponen de manifiesto un déficit anual explotación vs. recarga. Esto conlleva a tomar, como medida para reducir ese exceso de explotación, un volumen similar, que permita alcanzar un equilibrio en el balance hídrico, la posible *declaración de sobreexplotación* de la MASb y la elaboración del plan de ordenación de las extracciones, que tenga en cuenta la singularidad de cada uno de los acuíferos o sectores definidos en esta MASb, especialmente en lo referente al grado de explotación y la composición de sus aguas. Una alternativa a la declaración de sobre explotación podría ser la aplicación de la norma de explotación de esta masa de agua subterránea.

Fundamentos

Debido a sus cambios laterales de facies, en estudios precedentes, se diferenciaron 5 sectores en la U.H. (IGME 2003; Agencia Andaluza del Agua 2010): la zona Niebla-Gerena, Gerena-Cantillana, Cantillana-Lora del Río, Lora del Río-Hornachuelos, Puebla de los Infantes. Además de estos sectores, en la MASb 05.49 existe otro acuífero, que no forma parte del acuífero Mioceno de Base, como son los formados por las terrazas del río Guadalquivir ubicadas en la margen derecha del río, formando una franja de unos 3 km de ancho y de 5 a 15 m de espesor, constituido por gravas, arenas y limos cuyo comportamiento corresponde al de un acuífero libre.

Las redes de control de calidad y cantidad fueron gestionadas por el IGME hasta diciembre 2001, a partir de esa fecha el control lo ha realizado la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y posteriormente la Agencia Andaluza del Agua. La red de control de calidad actual está constituida por 5 puntos de control, uno en cada una de las subunidades de las que se compone la MASb.

El análisis de los datos disponibles de piezometría muestra, que durante los años ochenta, la mayoría de los puntos presentan niveles más o menos estables. La evolución general de la piezometría queda marcado por descensos importantes durante la sequía al principio de los años noventa, sin alcanzar a los mismos niveles piezométricos en los años posteriores. Se pueden observar importantes fluctuaciones de niveles, que por su dimensión, están asociados con explotaciones realizadas en la cercanía de los puntos.

- La Subunidad NIEBLA-GERENA: Dos de los cinco puntos de control presentan importantes descensos entre 20 y 30 m durante épocas de sequía, en un caso sin recuperación posterior (figura 14)
- La Subunidad GERENA-CANTILLANA: Este sector presenta tendencia al descenso en 5 de los 6 puntos observados. Los niveles han sufrido descensos sucesivos debidos tanto a la entrada en funcionamiento de nuevas explotaciones como al efecto conjunto de los periodos de sequía, de forma que en la actualidad se acumulan más de 15 m de descenso sin señales de recuperación (figura 15).
- La Subunidad CANTILLANA-LORA DEL RÍO: Ésta,

en las proximidades de Villanueva del Río y Minas, presenta una evolución anómala ya que desde 1983 la tendencia anual de la evolución piezométrica es ascendente. Esto se debe al abandono de la mina de Villanueva a principio de los años ochenta (IGME 2003) (figura 16).

- La Subunidad LORA DEL RIO-HORNACHUELOS: La evolución piezométrica en este sector presenta cambios significativos y uno de los 4 puntos monitorizados en Peñafior demuestra tendencias claras de descenso debido a un incremento de explotación entre Peñafior y Posadas. Los demás puntos se ven estrechamente influido por extracciones, pero presentan

Figura 14. Evolución de niveles piezométricos del sector Niebla-Gerena

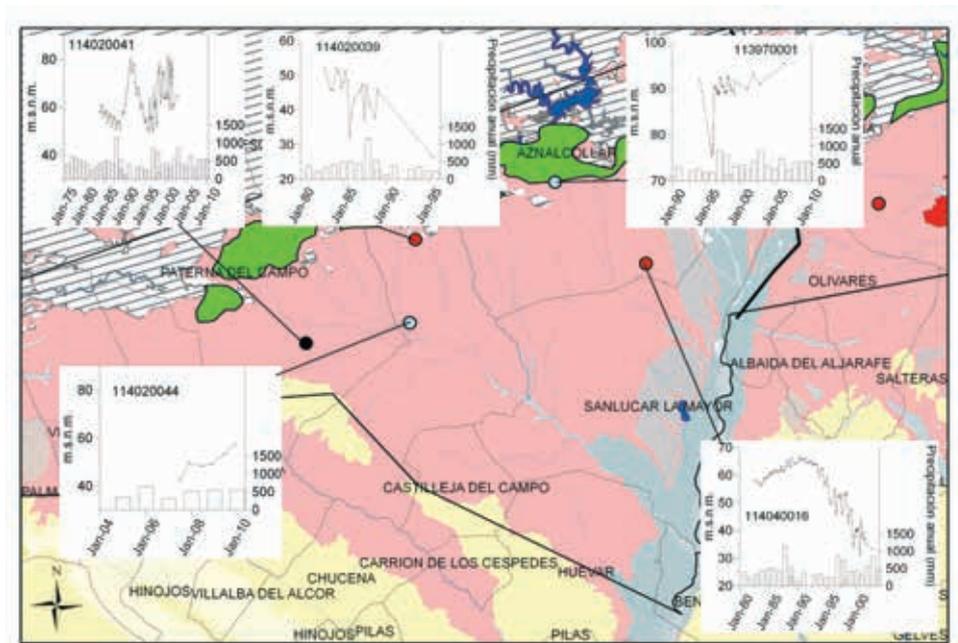
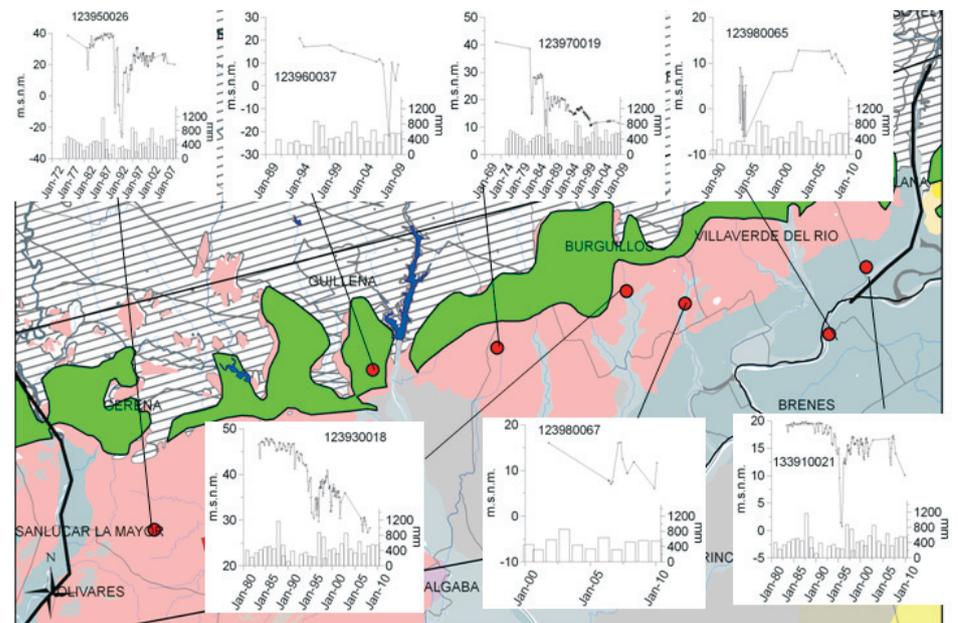


Figura 15. Evolución de niveles piezométricos del sector Gerena-Cantillana



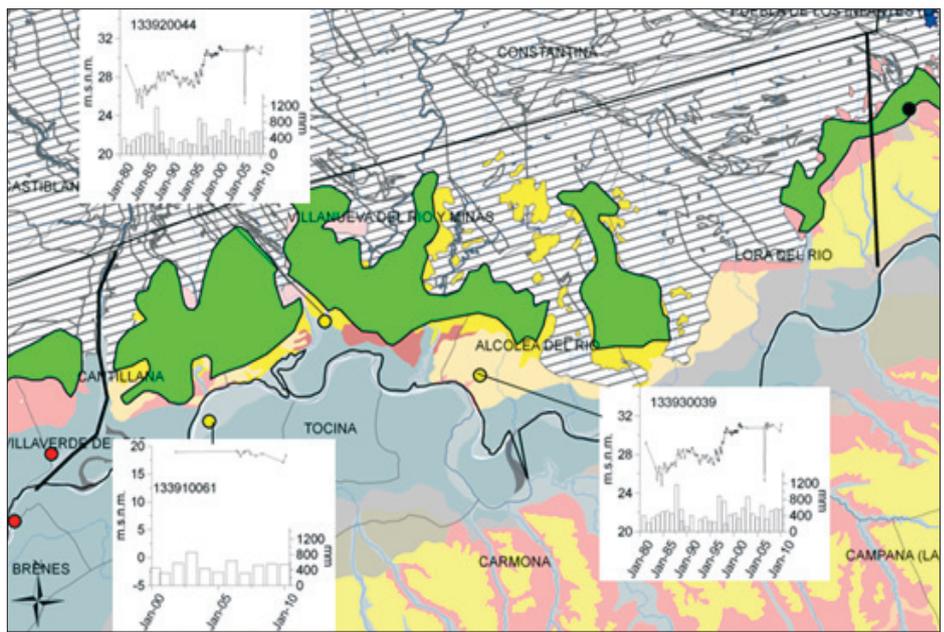


Figura 16. Evolución de niveles piezométricos del sector Cantillana-Lora del Río

capacidad de recuperación y no muestra tendencia al descenso. (figura 17)

En resumen, los cambios más significativos se observan en los sectores Niebla-Gerena y Gerena Cantillana que presentan descensos piezométricos durante las últimas décadas sin viso de recuperación, lo que pueden indicar que las extracciones reales superan la recarga del acuífero en estos sectores. En el sector Lora del Río-Hornachuelos se observa un descenso sin recuperación en Peñafior, mientras que en los demás puntos no se observa una tendencia al descenso. Los descensos en general se deben a extracciones agrícolas y se observan sobre todo en los acuíferos confinados, debido a

su menor transmisividad. Bajo este punto de vista, las zonas Niebla-Gerena y Gerena-Cantillana muestran características de sobreexplotación y el sector Lora Del Río-Hornachuelos está en riesgo, al estar cerca del límite de explotación.

En el sector Cantillana-Lora del Río se observan los mayores valores de conductividad eléctrica, aunque no existen extracciones intensivas de agua subterránea y los niveles piezométricos han subido considerablemente. En el sector Lora Del Río-Hornachuelos se observa un descenso de los niveles piezométricos sin recuperación en Peñafior, mientras que en los demás puntos no se observa una tendencia al descenso.

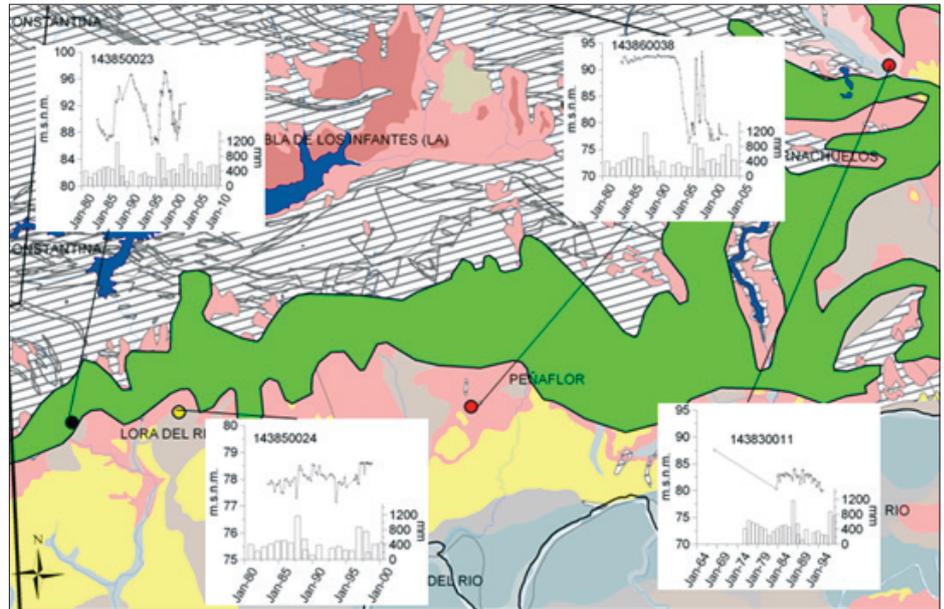


Figura 17. Evolución de niveles piezométricos del sector Lora del Río-Hornachuelos

No existe ninguna información recopilada sobre los volúmenes de extracciones reales por riego y/o abastecimiento durante las últimas décadas en el acuífero Gerena-Posadas. Las concesiones actuales de 8,75 hm³/a, concedidos por la Agencia Andaluza del Agua (mayo 2010), están muy por debajo del volumen de recarga del acuífero y no justifican el descenso piezométrico en ninguno de los sectores por lo cual hay que suponer alguna otra causa. Las salidas por extracciones de agua subterránea y su evolución temporal no se han registrado de forma accesible. No obstante, estimaciones de extracciones de agua subterránea para regadío en los años ochenta ya indican explotaciones superiores a la recarga en el sector Niebla-Gerena. Estimaciones más recientes de extracciones de agua subterránea para regadío, entre los municipios Guillena y Villanueva del Río y Minas, suman volúmenes de 8 hm³/año y 3 hm³/año por abastecimiento (IGME 2003) para años medios y secos, lo que se acerca bastante a las entradas respectivas.

Recomendaciones

El carácter dinámico de la MASb 05.49 y sus características de sobreexplotación en algunos sectores obligan a continuar una serie de trabajos y estudios adicionales que permiten una gestión sostenible de los recursos hídricos en el futuro. Bajo este punto de vista, se recomienda realizar las siguientes medidas en algunas zonas con cierta problemática.

- Para garantizar el uso sostenible de los recursos hídricos en los sectores Niebla-Gerena y Gerena-Cantillana es necesario abordar el estudio de recarga natural forzada ó recarga artificial en dichas zonas. De igual manera hay que prever su posible utilización en el resto del acuífero para subsanar los posibles desequilibrios que en el futuro, se podrían originar también en el sector Lora del Río-Hornachuelos. Las posibilidades de la aplicación de la recarga artificial por caudales excedentes en los cauces que atraviesan los sectores ya fueron evaluadas positivamente en estudios anteriores, tanto en cantidad como en calidad (IGME 1983; IGME 2003).
- Control de las extracciones reales, sobre todo en los sectores con desequilibrio de extracciones y recarga.
- Control anual de los nuevos sondeos que se realicen en el futuro para registrar los aumentos de las extracciones de agua.
- Realización periódica de aforos en los ríos y arroyos que atraviesan el sistema para poder cuantificar recargas y descargas del acuífero hacia los cauces lo que es imprescindible para estimar la recarga natural y los recursos hídricos disponibles en este sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Andaluza del Agua. (2010). Adaptación de los puntos de control de calidad de las aguas subterráneas a la D.M.A. para M.A.S. Niebla Posadas (05.49), Junta de Andalucía.
- Agencia Andaluza del Agua. (2010). Apoyo a la explotación de la red de control de calidad de las aguas subterráneas en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Establecimiento de la Red de Control CHG (2007). Resultados del modelo matemático de flujo subterráneo del sector del acuífero de Fuencaiente. Simulación considerando las posibles explotaciones establecidas por la CHG. Informe preliminar.
- CHG-IGME (2009). Análisis sobre las masas de agua subterránea 05.04 (Huéscar-Puebla) y 05.05 (La Zarza) como base para el establecimiento de normativas de explotación que permitan la recuperación del manantial de Fuencaiente y la conservación de los manantiales de Parpacén y Bugéjar. Encomienda de Gestión entre la CHG y el IGME. Act. 5. Documento interno.
- CHG-IGME (2001). Revisión y actualización de las normas de explotación de las UH de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete-Barbate: UH 05.04 Huéscar-Puebla.
- Durán, J.J. (2007). Atlas hidrogeológico de la provincia de Sevilla. IGME-Diputación Provincial de Sevilla Servicio de Publicaciones del IGME. Madrid.
- González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Rubio-Campos, J.C. y Núñez, I. (2007). *Los acuíferos de la Loma de Úbeda (Jaén)*. González-Ramón, A., Rubio-Campos, J.C. y López-Geta, J.A. (Eds.). IGME-AUAS. Madrid. 56 p.
- Gollonet, J.; Rubio-Campos, J.C.; Martín-Montañés, C.; González-Ramón, A. y Peinado, T. (2001). Los acuíferos de la Loma de Úbeda, reserva estratégica para el desarrollo del olivar. *Jornadas sobre presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*. Linares (Jaén). T-1: 379-383. DPG-UJ-IGME.
- González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Benavente, J.; Hidalgo, M.C.; Marín-Lechado, C.; Molina-Molina, A.; López-Martos, J.J.; Peinado, T. y Rubio-Campos, J.C. (2002). Acuíferos del borde de la meseta en la provincia de Jaén. *Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardenete. Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces*: 219-229. IGME-CHG-COPTJA-DPG.
- IGME (2003). Estudio de la incorporación de las aguas subterráneas al sistema de emergencia del abastecimiento a la ciudad de Sevilla y su área de influencia. Sevilla, Instituto Geológico y Minero de España: 131.
- IGME (2010). Análisis del modelo matemático elaborado en el sector acuífero relacionado con el manantial

- de Fuencaliente como base para la recuperación del manantial y recomendaciones para la conservación de los manantiales de Parpacén y Bugéjar (masas de agua subterránea 05.04 Huéscar-Puebla y 05.05 La Zarza). Encomienda de Gestión entre la CHG y el IGME. Actividad 5 documento interno.
- IGME-DGA (2009). Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2.015. (Demarcaciones Hidrográficas del Tajo, Guadiana y Guadalquivir). Encomienda de Gestión con la Dirección General del Agua (MARM) y el Instituto Geológico y Minero de España (MICINN).
- IGME-DGA (2009). Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial relevancia hídrica. Encomienda de Gestión con la Dirección General del Agua (MARM) y el Instituto Geológico y Minero de España (MICINN).
- IGME (2002). Norma de explotación de la Unidad Hidrogeológica 05.38. El Pedroso-Arcas. Instituto Geológico de España, Sevilla.
- IGME (2000). Plan de integración de los recursos hídricos subterráneos en el abastecimiento urbano. Estudios hidrogeológico de probabilidades de mejora de los abastecimientos urbanos del norte de la provincia de Málaga. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- ITGE (1995). Catálogo de acuíferos sobreexplotados. Madrid, Instituto Tecnológico Geominero de España.
- ITGE-CHG (1993). *Propuesta de Normas de Explotación de la U.H. 05.23 (Úbeda)*.
- ITGE. (1993). Propuesta de Norma de Explotación de la Unidad Hidrogeológica 05.43. Sierra y Mioceno de Estepa. Instituto Geológico de España, Sevilla.
- Lambán, L. J., and J. M. Pernía. (2004). Propuesta de indicadores sobre el estado cualitativo de las aguas subterráneas: aplicación al acuífero de la Sierra de Estepa. Pages 337-347 in VIII Simposio de Hidrogeología. Asociación de Hidrogeólogos, Zaragoza,
- MMA (1998). Programa de ordenación de acuíferos sobreexplotados/salinizados. Serie monografías. Ministerio de Medio Ambiente.
- MMA. (1997). Catálogo de Acuíferos con problemas de Sobreexplotación o Salinización. Predefinición del Programa de Actuación. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas., Madrid.
- Martín Montañés, C. (2007). Aplicación de técnicas hidrogeológicas dirigidas a la ordenación del territorio en la investigación de acuíferos sometidos a una potencial contaminación y/o explotación no sostenible: desarrollo metodológico
- 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, Granada.
- Martos-Rosillo, S., M. Martín Machuca, J. Cruz-Sanjulián, J. C. Rubio, C. Hermo, and A. Díaz Pérez. (2006b). Evaluación de los recursos medios renovables del acuífero carbonático de la Sierra de Estepa (Sevilla). Pages 203-211 in Karst, cambio climático y aguas subterráneas. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero, Málaga.
- Martos-Rosillo, S., F. Pérez-Fernández, A. Díaz, J. A. López Geta, M. Martín Machuca, and F. Ruiz -Bermudo. (2008a). Cálculo de la tasa de infiltración con el método APLIS en el acuífero carbonático de la Sierra de Becerrero (Sevilla). Análisis y contrastes de los resultados. 25-35 en A. Fernández Uría. IX Simposio de Hidrogeología. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Elche.
- Martos-Rosillo, S., F. Pérez-Fernández, and J. J. Durán. (2008b). Estimación de la recarga mediante el método APLIS en los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Estepa (Sevilla). Geo-Temas.
- Martos-Rosillo, S., A. M. Rebollo, A. Díaz, and F. Pérez-Fernández. (2008c). Evaluación del tiempo medio de residencia del agua subterránea en los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Estepa y su repercusión en la gestión de los recursos explotables. Pages 985-904 en VII Congreso del Agua en Andalucía. IGME, Baeza.

ESTUDIO DE DEFINICIÓN DE LA TRANSFERENCIA SUBTERRÁNEA
DE LA MASB BOQUERÓN CON OTRAS MASAS DEFINIDAS
EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

Ramón Aragón Rueda,
Jorge Hornero Díaz,
Clemente Trujillo Toro



En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Estudio de definición de la transferencia subterránea de la MASb Boquerón con otras masas definidas en la demarcación hidrográfica del Júcar*, llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

Ramón Aragón Rueda
Jorge Enrique Hornero Díaz
Clemente Trujillo Toro

Colaboración:

Empresa INTECSA-INARSA

ESTUDIO DE DEFINICIÓN DE LA TRANSFERENCIA SUBTERRÁNEA DE LA MASB BOQUERÓN CON OTRAS MASAS DEFINIDAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La zona comprendida en la denominada masa de agua subterránea Boquerón (070.004) disponía hasta la actualidad de un conocimiento hidrogeológico precario, pues su investigación se remonta a la década de los años 70 y principios de los 80 del siglo XX (IGME, 1979; 1980;

1981; 1985; 1988), (Senent *et al.*, 1975) dentro de las actividades llevadas a cabo por el IGME en el marco del Programa Nacional de Investigación de las Aguas Subterráneas de España (PIAS) y comienzos del siguiente Programa de Gestión y Conservación de Acuíferos (PGCA). Estudios posteriores parten de dichas investigaciones y adoptan básicamente el modelo geológico e hidrogeológico

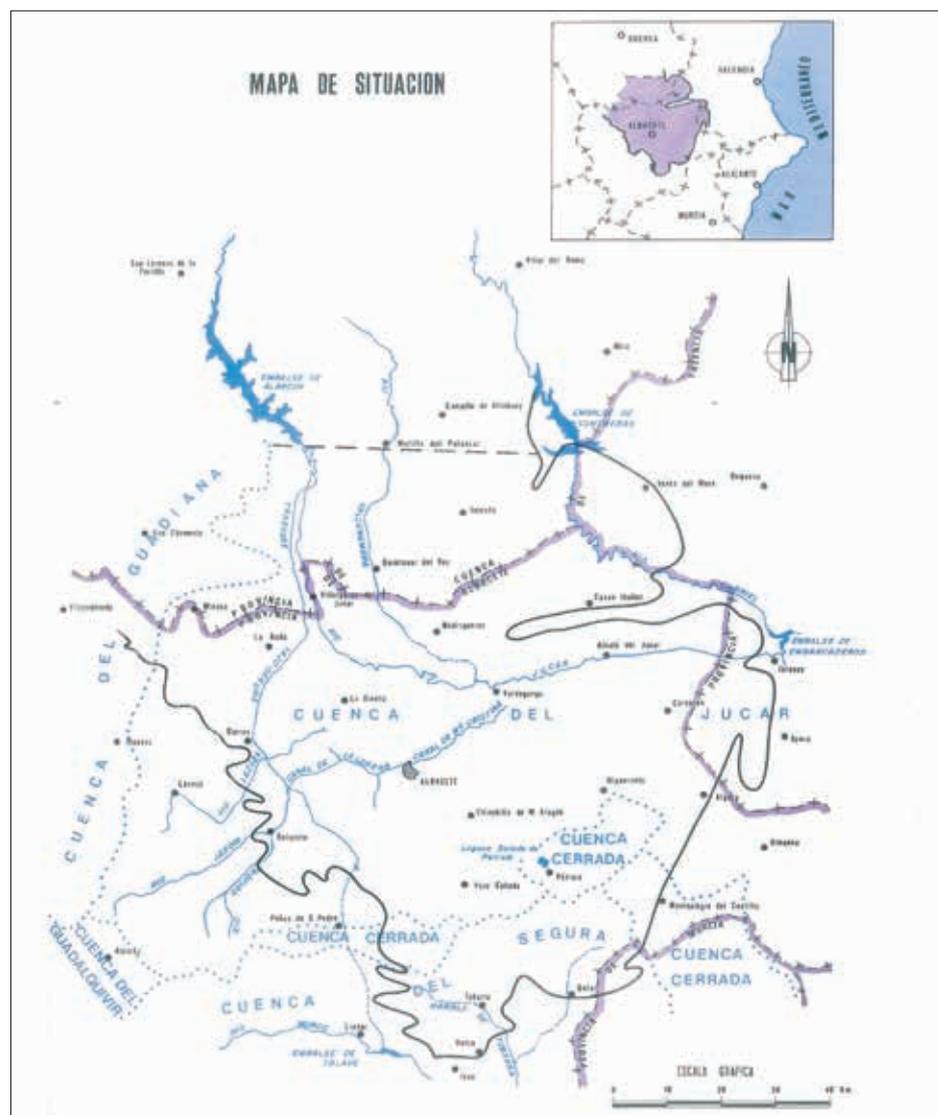


Figura 1. Localización de la unidad hidrogeológica de Albacete (IGME, 1979)

gico establecido anteriormente, y se limitan a actualizar diferentes aspectos relacionados con la gestión, como son las extracciones de agua subterránea, delimitación administrativa e incluso modelación numérica del flujo subterráneo, pero sin realizar investigaciones hidrogeológicas nuevas IGME (1999), (DGOH-IGME, 1988), (CHS, 1988; 1997; 2007). Además, las consideraciones que se efectúan apenas afectan a la zona correspondiente al límite entre las cuencas del Júcar y Segura, sino a las situadas el norte o sur de la misma.

Es precisamente en esta zona donde se concentran las principales ausencias de conocimiento tanto en lo concerniente a definición geométrica y delimitación de acuíferos como a su funcionamiento hidrogeológico, incertidumbres que adquieren especial relevancia por su significación en una cuestión de tanta trascendencia técnica y administrativa como es el posible intercambio de flujos subterráneos entre las mencionadas cuencas hidrográficas.

Este ha sido por tanto el objetivo fundamental de la investigación llevada a cabo, que lleva implícitos otros objetivos parciales como son la delimitación de los acuíferos y masas de agua subterránea en este entorno, su caracterización geométrica y establecimiento de su funcionamiento hidrogeológico.

ANTECEDENTES

De acuerdo con el conocimiento previo existente, la actual masa de agua subterránea quedaba englobada dentro de lo que se denominaba "Unidad de Albacete" o "Unidad Norte: Sistema hidrogeológico de Albacete". Dicha unidad se extiende ampliamente por la provincia de Albacete y comprende incluso el extremo meridional de la Cuenca, abarcando una superficie de 8500 km² (figura 1). Se definieron tres acuíferos principales constituidos por dolomías del Dogger (formación Chorro), calizas y dolomías del Cretácico superior (formación Benejama) y materiales calizos y detríticos del Terciario-Cuaternario. El primero de ellos es el de mayor importancia, mientras que el último presenta un interés reducido y variable espacialmente.

En la Llanura de Albacete estos acuíferos se encuentran superpuestos e hidráulicamente conectados vertical o lateralmente según los sectores, constituyendo un único acuífero multicapa que es drenado por el río Júcar. En el extremo meridional del sistema sólo está presente el acuífero Chorro, en conexión hidrogeológica con la

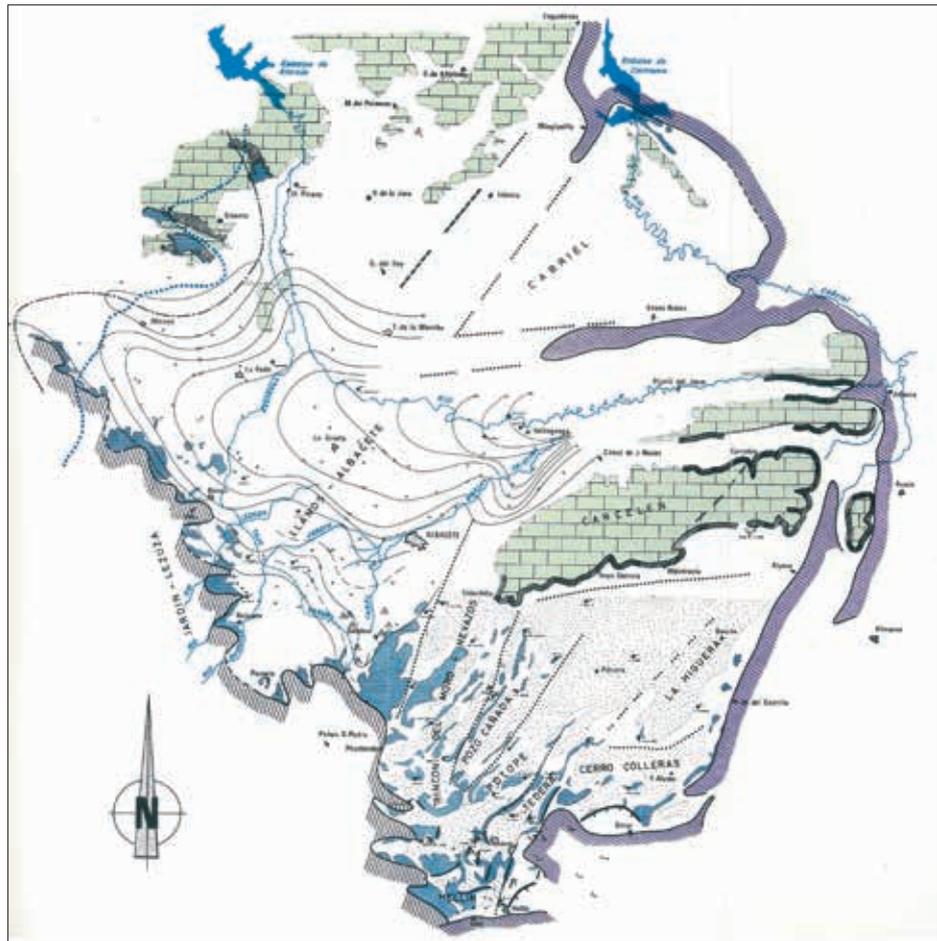
zona de la Llanura de Albacete y drenado en parte por el límite sur del sistema (manantiales de la zona de Hellín-Tobarra, evaluados entonces en unos 15 hm³/año). Este esquema global es más complicado a escala local por la existencia de numerosas discontinuidades estratigráficas y tectónicas (cambios de facies, fallas, etc.).

A grandes rasgos, se distinguieron hidrogeológicamente dos zonas que, aunque conectadas hidráulicamente, presentan características diferentes: zona de la Llanura de Albacete y zona de "tectónica en teclas de piano". La primera incluye los sectores central y septentrional del sistema y en ella están representados los tres acuíferos importantes antes mencionados, conectados en el sector central, y con el flujo subterráneo condicionado por el río Júcar hacia el que se produce el drenaje. La segunda zona ocupa el extremo meridional del sistema, está constituida por una serie de alineaciones montañosas correspondientes a los afloramientos de las dolomías del Dogger (único acuífero de interés aquí representado) y se encuentra compartimentada en subsistemas relacionados entre sí y limitados en la mayoría de los casos por barreras de transmisividad (figura 2).

En esta zona, a través de las fallas o de los núcleos de los anticlinales existentes, puede darse localmente una interrupción hidráulica en el acuífero, pero este hecho no es general, siendo frecuente, sin embargo, que se produzca una importante disminución de potencia saturada del acuífero en esos lugares, lo que crea una especie de barreras por reducción muy considerable de la transmisividad, que generan diferencias bruscas de la piezometría entre ambos lados de las mismas. De esta manera se definieron bloques con diferentes piezometrías, pero hidráulicamente comunicados. La circulación subterránea muestra por una parte un gradiente hacia el norte comunicándose hidráulicamente con la Llanura de Albacete y, por otra, en el sector meridional, con gradiente general hacia el sur produciéndose la descarga a través del límite meridional (manantiales de Hellín-Tobarra).

Posteriormente (IGME, 1980; 1981), y con objeto de simplificar la investigación y la gestión de un área tan extensa, esta unidad se dividió 11 zonas hidrogeológicas (figura 3), una de las cuales, la denominada Zona 4 (Petrola-Hellín) está incluida casi en su totalidad en la cuenca del Segura, y corresponde aproximadamente a las actualmente denominadas masas de agua subterránea 070.004 Boquerón, 070.005 Tobarra-Tedera-Pini-lla, 070.008 Ontur, 070.007 Conejeros-Albatana (parcial), 070.001 Corral Rubio y 070.002 Sinclinal de la

Figura 2. Sectorización de la U.H. de Albacete (IGME, 1979)



Higuera. Además incluye los reducidos sectores pertenecientes a la cuenca del Júcar de Nava de Abajo y este de Pozo Cañada. De los acuíferos que forman el Sistema de Albacete, el único presente en toda esta zona es el Chorro (materiales carbonáticos jurásicos), que alcanza potencias máximas próximas a 300 m, y se encuentra afectado por una tectónica de bloques que ha provocado su división en una serie de compartimentos, entre los que existe una deficiente conexión hidrogeológica puesta de manifiesto por diferencias piezométricas. El flujo del agua subterránea tiene sentido hacia el sur, aunque la presencia de barreras de transmisividad condiciona la circulación y da lugar a una serie de manantiales, todos en el sector sur, que constituyen el drenaje natural. Ya se advertía que, aunque la zona estaba en equilibrio hídrico, sin transferencias laterales subterráneas y con una coincidencia aproximada entre las divisorias de cuencas hidrográficas Júcar y Segura y de aguas subterráneas, el previsible incremento de las extracciones de agua subterránea implicaría un desplazamiento hacia el norte de la divisoria piezométrica, pudiendo establecerse flujo subterráneo desde la cuenca del Júcar hacia la del Segura. Igualmente, la estructura del acuífero en compartimentos haría que

se produjeran sobreexplotaciones locales, con la aparición de umbrales hidrogeológicos que independizarían zonas dentro de un mismo compartimento, resultando inevitablemente afectados los manantiales.

En IGME (1985;1988) se desagregan del sistema hidrogeológico de Albacete las actualmente denominadas masas de agua subterránea 070.001 Corral Rubio, 070.002 Sinclinal de la Higuera y 070.005 Tobarra-Tedera-Pinilla. El sector de Corral Rubio no se estudió y se siguió considerando como parte del sistema hidrogeológico mencionado. El resto de los sectores se subdividió en diferentes bloques o compartimentos denominados, de norte a sur, Sinclinal de la Higuera, Pinilla, Tedera y Tobarra. La formación acuífera principal es la constituida por dolomías del Dogger, siendo el sentido del flujo subterráneo hacia el sur, con circulación en forma de "cascada" como consecuencia del escalonamiento hidrodinámico originado por la tectónica de bloques que afecta al acuífero, que da lugar a fuertes saltos o escalones en la superficie piezométrica y a la diferenciación en los compartimentos citados, intercomunicados entre sí por conexiones laterales a través de las zonas de fractura. Los límites laterales con el resto del sistema hidro-

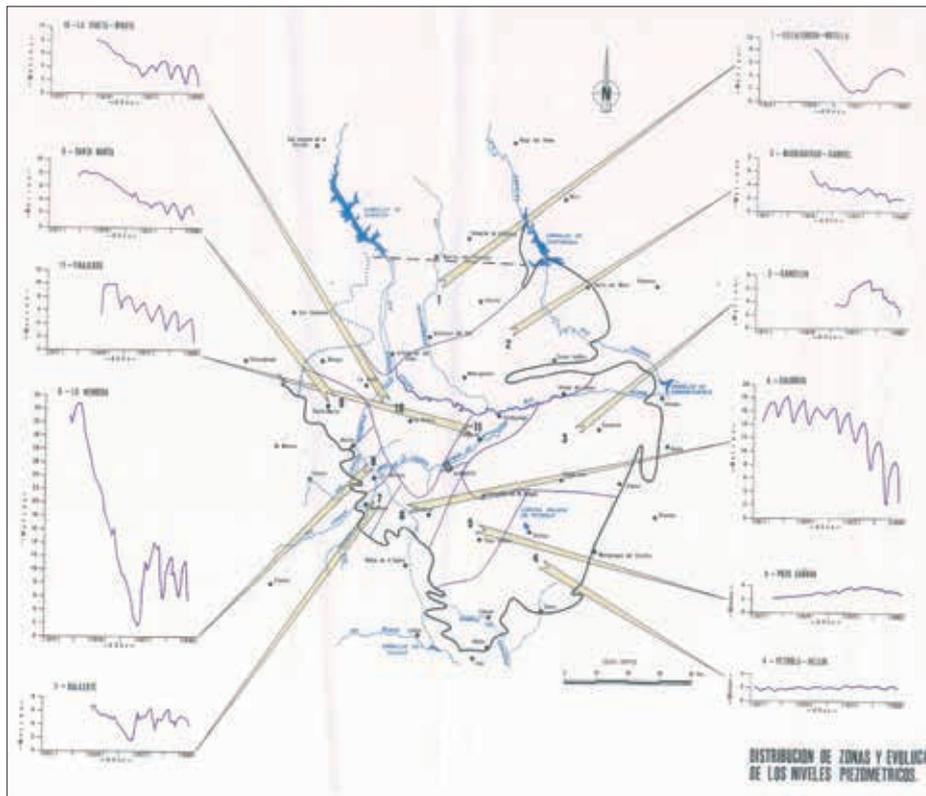


Figura 3. Distribución de zonas y evolución de los niveles piezométricos en la U.H. de Albacete (IGME, 1980)

geológico de Albacete se estiman como impermeables, con algunas posibles excepciones locales en el caso de Tecera.

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

En DGOH-IGME (1988) se adopta oficialmente la denominación de U.H. 08.29 Mancha Oriental y se modifica el límite sur que se hace coincidir con la divisoria entre las cuencas hidrográficas del Júcar (CHJ) y Segura (CHS). Este es el límite que se ha considerado posteriormente por CHS, con la matización de que la cuenca endorreica de Pozohondo se asigna actualmente a la CHJ, por lo que quedaría incluido en la

Mancha Oriental. De este modo, el sector de Nava de Abajo resultó posteriormente excluido de la masa 070.004 Boquerón a pesar de que, según documentos recientes de CHS, incluiría parcialmente los acuíferos de Buhos y Umbria.

En los estudios posteriores no se aportan más novedades para Boquerón y la zona intercuenas que la consideración de que el hacer coincidir los límites hidrogeológicos con los hidrográficos es una cuestión administrativa (por motivos exclusivos de mayor facilidad y eficacia en la gestión hídrica), pero que la realidad física es diferente, por lo que existe un flujo subterráneo con sentido norte-sur, es decir, desde la cuenca del Júcar a la del Segura (IGME, 1999). También existen algunas diferencias en cuanto a la subdivisión interna de Boquerón (CHS, 1997).

Por último, en CHS (2007) se expone que la unidad de Boquerón, cuyos límites adopta los del Plan Hidrológico del Segura (CHS, 1997), tiene un funcionamiento muy complejo, compartimentado, con límites difíciles de establecer, teniendo comunicación con la cuenca del Júcar por el norte y con la unidad de Tobarra por el este. Es interesante el análisis piezométrico que se efectúa y las consideraciones respecto al intercambio de flujos subterráneos entre las cuencas del Segura y Júcar (figura 4), cuya cuantificación no se realiza, sino que se admiten

las establecidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Segura, es decir: entradas laterales a Boquerón, desde Mancha Oriental, 10,27 hm³/año; salidas laterales desde Boquerón, sin especificar claramente si es hacia la Mancha Oriental o hacia Tobarra-Tedera-Pinilla: 2,2 hm³/año.

Asimismo se indica que se está produciendo un descenso generalizado de niveles piezométricos, más acusado en el sector occidental y vertiente del Júcar (figura 4). Este descenso está provocando un "arrastre" hacia el Júcar (salidas laterales), mientras que todo el sector oriental mantiene sus flujos primigenios con una sobrealimentación, que en principio se origina al noreste de la Unidad de Boquerón, en la cuenca del Júcar. Para justificar las evoluciones piezométricas que se registran, donde en ocasiones se observan significativos ascensos de niveles, se ha considerado la existencia de aportes laterales, pues la infiltración de agua de lluvia no es capaz por sí misma de explicarlos. La situación de desequilibrio se inició en el año 1980, aunque los descensos de niveles no comenzaron a producirse hasta el año 1983. En los últimos años los niveles han llegado a descender por debajo de la cota de descarga, anulándose por tanto la Fuente de Isso (llegó a descargar 150L/s), aunque con recuperaciones coyunturales ligadas a episodios de alta pluviosidad. Todos los manantiales restantes están secos actualmente.

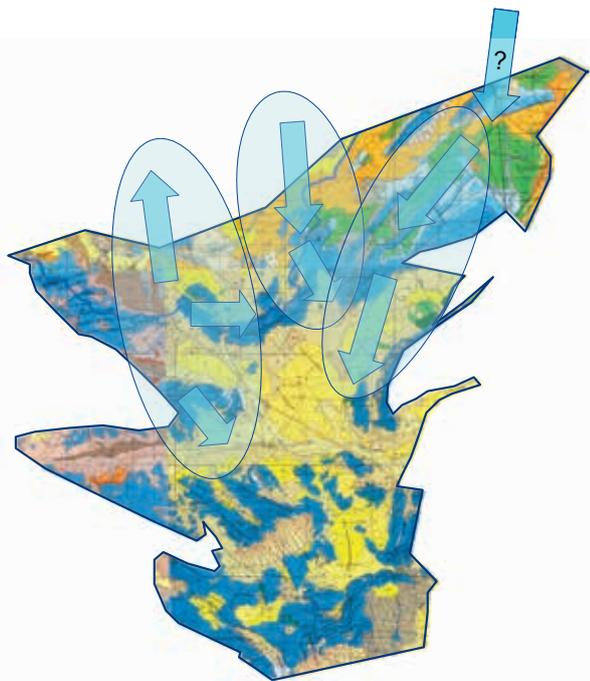


Figura 4. Intercambio de flujos subterráneos entre las cuencas del Segura y Júcar (CHS, 2007)

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para alcanzar los objetivos propuestos se ha procedido en primer lugar a una completa recopilación y análisis de la documentación existente, que ya desde un principio se comprobó que apenas comprendía a la zona de límite entre las cuencas hidrográficas del Júcar y Segura. Se trataría además de numerosos estudios que actualizaban algunos de los aspectos de los acuíferos involucrados pero que no aportaban prácticamente nada en cuanto a los aspectos fundamentales de geometría, evaluación de recursos hídricos, funcionamiento hidrogeológico y balance, pues se remitían en estas cuestiones a los estudios primigenios del IGME.

En consecuencia, ha sido necesario proceder a un reconocimiento geológico e hidrogeológico de campo que, junto con la actualización del inventario de puntos de agua y de extracciones por bombeo, aportasen la base adecuada para revisar la delimitación externa e interna de los acuíferos y masas de agua subterránea involucrados en el área del estudio.

Con objeto de mejorar la caracterización geométrica, y en especial para definir la naturaleza de los límites en el entorno de la divisora hidrográfica entre las dos demarcaciones, se han utilizado varias técnicas hidrogeológicas: revisión de cartografía en el campo; cortes hidrogeológicos; campaña piezométrica *flash* y análisis del balance hídrico.

Para dar coherencia a la nueva delimitación, en especial en la zona del límite intercuenas, y, sobre todo, para tratar de esclarecer la cuestión fundamental de la existencia o no del intercambio de flujos subterráneos entre ambas demarcaciones hidrográficas, ha sido preciso evaluar la recarga a los acuíferos y determinar el flujo subterráneo. Para ello se ha establecido su balance hídrico y se han analizado las evoluciones piezométricas mediante la realización de campañas en puntos que se han nivelado para la ocasión. El fin último que se buscaba es la coherencia entre la nueva definición geométrica, su esquema de circulación y la cuantificación de sus recursos, habiéndose utilizado para un mayor rigor de la evaluación de la recarga varios métodos de cálculo: balance de agua en el suelo y balance de cloruros.

El estudio ha concluido con una propuesta de nueva delimitación para las masas de agua subterránea que ha incidido fundamentalmente en el límite entre ambas cuencas y en la consideración del flujo entre ambas, as-

pecto de especial interés por su importancia en la planificación hidrológica.

CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA

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

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

La formación permeable principal está constituida por los materiales dolomíticos del Dogger (denominados en documentos anteriores Formación Chorro), coronados por un tramo calizo poco potente del Oxfordiense, que dan al conjunto un espesor próximo a 300 m. A muro del Dogger se encuentra una formación margosa poco permeable del Lías, que se utiliza generalmente en la definición de los límites hidrogeológicos. Por debajo, hay una formación dolomítica del Lías que ape-

nas aflora y de la que se conoce poco de su comportamiento hidrogeológico, así como de la salinidad de su agua, que puede ser localmente más elevada que la del Dogger. El impermeable de base general es la formación arcillosa del Trías, que localmente también actúa como límite lateral. Otras formaciones permeables a techo del Dogger son de muy reducido interés y tienen una piezometría descolgada del acuífero principal.

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

La zona se caracteriza por la escasez de afloramientos del impermeable de base general del Trías en la mayor parte de los límites y por una presencia limitada de la formación Madroño, de naturaleza margosa (Lías). En estas condiciones, juegan un papel fundamental los subafloramientos de estas formaciones en los ejes de los anticlinales y en las unidades cabalgantes, por lo que la comprensión de la estructura geológica de la zona tiene una importancia fundamental.

La delimitación de acuíferos se define con un carácter general a nivel del Jurásico, pues como antes se ha indicado es la formación dolomítica del Dogger la de mayor importancia hidrogeológica de la zona. Se desconoce el carácter de los materiales dolomíticos del Lías inferior, ya que no son captados por sondeos, aunque el conocimiento regional del flujo induce a pensar que guarda relación con el Dogger (figura 5).

Los límites, tanto los externos de la masa como los internos entre los acuíferos que la componen, son en parte de difícil definición. El sector meridional de Boquerón aparece claramente constituido por los afloramientos de Trías al SO de Hellín. Desde esta zona, tanto los límites laterales de la MASb (límite occidental de los acuíferos Boquerón, como el oriental del acuífero Búhos) deben estar definidos por levantamientos del impermeable de base, en anticlinales o cabalgamientos, en los que aflora de un modo parcial. Este tipo de estructura determina el límite entre los acuíferos Umbría y Boquerón. El resto de límites este-oeste resultan más difíciles de determinar.

El límite entre Umbría y Boquerón no resulta de definición clara, y puede proponerse su eliminación, dejando los actuales dos acuíferos, Boquerón y Umbría, como uno solo Boquerón-Umbría.

El límite entre Umbría y Búhos se traza por levanta-

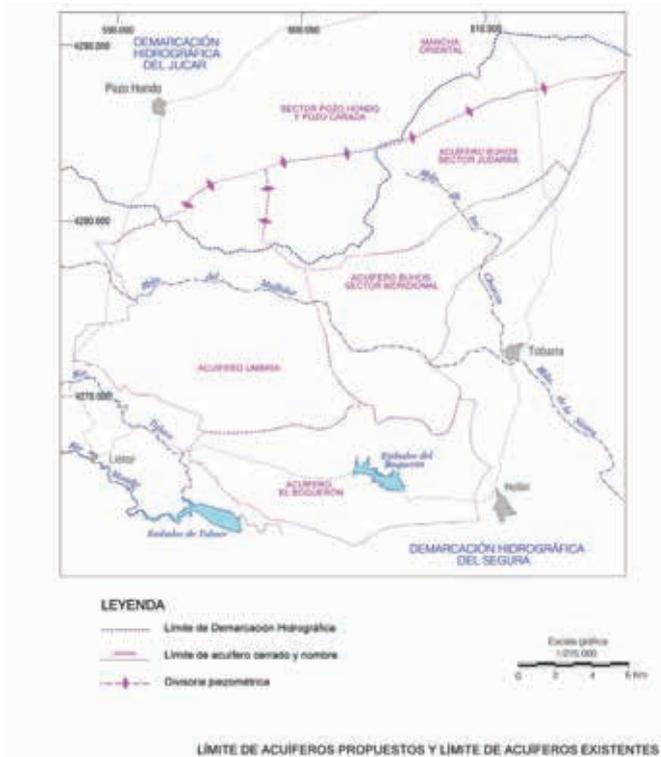


Figura 5. Delimitación de acuíferos propuesta

miento de la formación margosa del Lías por la acción de cabalgamientos sucesivos que existen en esta zona.

El límite septentrional de la MASb (acuíferos Umbría y Búhos), de especial interés para la planificación hidrológica por la posible conexión hidráulica subterránea intercuenas, es el más difícil de establecer, dada la ausencia de barreras impermeables que afloran de un modo continuo. Se deduce que se compone de divisorias piezométricas condicionadas por zonas de baja transmisividad y por la distribución de los bombeos. En el caso del acuífero Umbría se ha trazado basándose en el levantamiento del impermeable de base al sur de Nava de Arriba hasta el Dogger del Cerro del Romeral. En el amplio sector del acuífero Búhos la situación es más compleja debido a la ausencia de límites geológicos claramente identificables, siendo esta la razón de que en el Plan Hidrológico del Segura (1997) se le asigne un carácter abierto y permita unas entradas subterráneas procedentes del mismo acuífero, en su parte situada en la cuenca del Júcar. La existencia de esta transferencia en régimen natural no es más que la constatación de que el límite actualmente definido en el Plan es convencional y que el real debe situarse más al norte, dentro de la Demarcación del Júcar. Aunque no es posible precisar su posición exacta, sí ha resultado factible determinar la extensión del acuífero en base al análisis de la coherencia de la superficie permeable con la tasa de recarga evaluada, lo que es una manera indirecta de aproximar su superficie en la cuenca del Júcar.

Los límites propuestos se indican en la figura 5 y en algunos casos presentan variaciones apreciables con respecto a la definición previa recogida en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura.

Por otro lado, las extracciones actuales que se vienen realizando en el acuífero Búhos son superiores a los valores de recarga, lo que ocasiona que se encuentre en una situación de sobreexplotación (figura 6). Ésta ha ocasionado la compartimentación del acuífero por divisorias piezométricas de modo que en la situación actual aparece dividido en al menos tres sectores, denominados Meridional, Judarra o Intermedio y Septentrional (figura 5). Este último se localizaría al norte de Judarra, aunque su delimitación precisa se desconoce por las variaciones del flujo subterráneo inducidas a causa de la sobreexplotación.

Al tratarse de límites hidráulicos determinados por la distribución de las extracciones y condicionados por las barreras de transmisividad, son límites que espacialmente pueden variar. No obstante, esta movilidad queda restringida por la distribución de las características hidráulicas del acuífero, que en gran parte están condicionadas por la tectónica. Las zonas donde aflora el Dogger tienen una sección saturada muy pequeña debido a su altitud, e incluso en algunos casos pueden encontrarse desaturadas. En base a esta disposición, es posible precisar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero en sus sectores Meridional y Judarra. Se mantiene la incertidumbre en la geometría del límite sep-

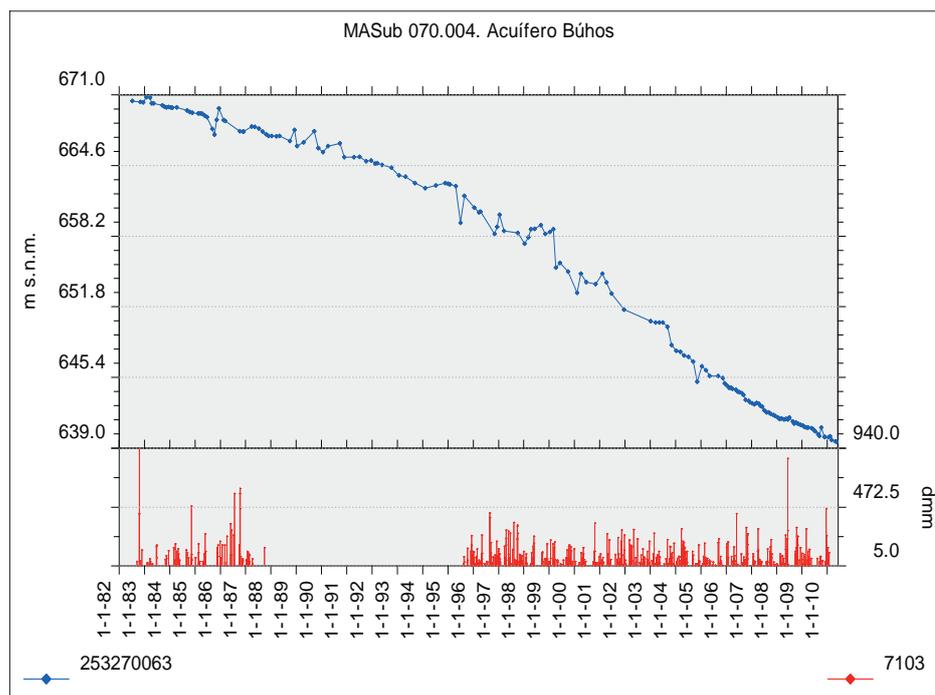


Figura 6. Evolución piezométrica en el acuífero Búhos

tentrional, como ya se ha comentado anteriormente al describir este límite.

DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

La información piezométrica disponible para caracterizar con una cierta precisión la circulación del agua subterránea en régimen natural es bastante incompleta, pues desde la definición del acuífero Boquerón (Senent *et al.*, 1975) no se han realizado estudios complementarios hasta el realizado por CHS (2007). No obstante, en la presente investigación se ha definido mediante el análisis de la información de las redes de control piezométrico en los acuíferos Boquerón, Umbría, Búhos y sector meridional del acuífero Mancha Oriental y de los datos históricos del IGME.

En régimen natural, los recursos de los acuíferos Umbría y Boquerón descargaban por la fuente de Isso (253420029) y en menor medida por los manantiales

de La Teja (253420030) y del Prado (253420030), estas últimas con unos caudales de unos 5 L/s cada una. La fuente de Isso registró caudales en torno a los 100 L/s, con un máximo observado de 150 L/s en marzo de 1990. A partir de 2002 la fuente permanece seca, si bien ha vuelto a surgir esporádicamente en relación con periodos en los que se han producido fuertes precipitaciones. Los recursos generados en el acuífero Umbría se transfieren por escorrentía subterránea al acuífero Boquerón a través de un límite de carácter abierto. El acuífero Búhos descargaba en régimen natural por las fuentes de Polope y Mercedes. Es importante también indicar la probable existencia de una transferencia subterránea desde el sector meridional del acuífero Búhos al acuífero Boquerón.

A partir de 1980, los bombeos en la zona sur de Albacete fueron incrementándose gradualmente hasta superar en algunos casos los recursos subterráneos renovables. Los significativos descensos piezométricos causados por

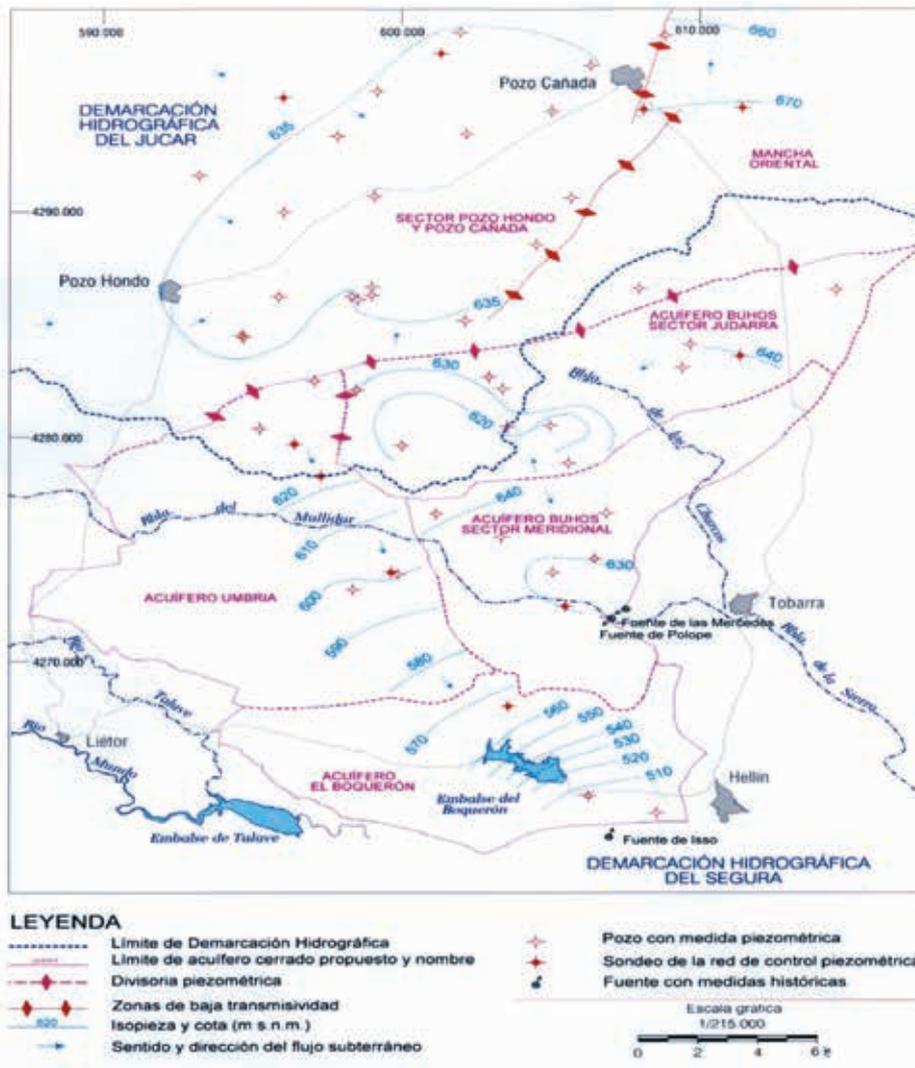


Figura 7. Definición del flujo subterráneo

estos bombeos han alterado muy significativamente el esquema de circulación del agua subterránea en todos los acuíferos de esta zona (figura 7).

Desde hace años la explotación por bombeo es muy intensa, 28,46 hm³/año (CHS, 2007), lo que ocasiona descensos generalizados y que se observen grandes conos piezométricos que permiten deducir variaciones en las direcciones de flujo con respecto a una situación previa a los años 1970, en régimen natural. El régimen influenciado ha producido divisorias piezométricas que deben ser tenidas en cuenta.

En el acuífero Umbría-Boquerón se aprecia un flujo subterráneo continuo NO-SE. En la zona septentrional, la posición del límite con el sector Judarra del acuífero Búhos e incluso con el sector Pozo Cañada-Pozo Hondo de Mancha Oriental se establece por divisorias piezométricas condicionadas por los bombeos. La parte más occidental del acuífero ha sido cortada por el túnel del Talave, que podría drenar de un modo muy local esta zona. En la situación actual, las detracciones de recursos al acuífero a consecuencia de los bombeos en la cuenca del Júcar parecen poco significativas y la disminución del caudal de la Fuente de Isso es consecuencia de los bombeos en el sistema Umbría-Boquerón, que en función del análisis realizado podría considerarse como un único acuífero.

En el acuífero Búhos el flujo natural desde el sector septentrional hacia los manantiales de Polope y Mercedes (2533-20031 y 20032) se ve interrumpido en el denominado sector Judarra. No se descarta una pequeña transferencia subterránea a través de su límite nororiental, pero el área generadora de recursos subterráneos drenables hacia Judarra en la situación actual es pequeña, y aparece limitado por la barrera de transmisividad Ontalafia-Chertal. En cualquier caso, los bombeos han mermado muy significativamente o incluso hecho desaparecer la transferencia subterránea que en régimen natural existía entre las demarcaciones del Júcar y Segura. Por otro lado, no puede descartarse completamente una transferencia poco significativa a través del límite suroriental del sector Judarra hacia el sector meridional del acuífero Búhos. Dentro de este sector, las mayores depresiones se observan en los pozos situados al oeste de las antiguas surgencias naturales del acuífero. Precisamente por esta situación de explotación intensiva, el flujo subterráneo hacia el acuífero Boquerón debe ser muy poco importante, en caso de existir.

Entre Pozo Hondo y Pozo Cañada, ya en el acuífero Mancha Oriental, se ha formado una amplia zona de

primida piezométricamente a consecuencia de los bombeos que se producen en su interior. La alineación Ontalafia-Chertal (al SO de Pozo Cañada) define una barrera de transmisividad determinada por el afloramiento de la formación Madroño, que debe de continuar por el este de Pozo Cañada, según la interpretación piezométrica de los sondeos a ambos lados de la misma. Es muy posible que en régimen natural, con una disposición piezométrica más favorable, el sector definido al este de la Sierra de Ontalafia drenara hacia la cuenca del Segura, pero la ausencia de información piezométrica impide precisarlo.

ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO Y COHERENCIA CON LA DELIMITACIÓN GEOMÉTRICA DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA BOQUERÓN

Un estudio reciente realizado por el IGME-CHS (2009) ha ayudado a definir con mayor precisión la estructura hidrogeológica y el balance hídrico en áreas limítrofes a la zona de estudio, concretamente en la masa de agua subterránea de Alcazoz. Las masas de agua subterránea de Alcazoz y Boquerón presentan singularidades parecidas, fundamentalmente en lo que se refiere a sus características hidrogeológicas, tipo de estructura y materiales permeables. Además, por su cercanía, las variables climatológicas presentan características similares que permiten correlacionar y extrapolar ciertos parámetros que sirven de base en determinadas estimaciones relacionadas con el cálculo de sus recursos.

En este sentido se ha considerado factible extrapolar en la MASb Boquerón, el valor de la recarga media interanual estimada en la MASb de Alcazoz mediante la aplicación del código numérico Visual Balan (Samper y García-Vera, 1999). Este tipo de modelación numérica está basada en el carácter secuencial de determinados balances de agua que se producen en los acuíferos durante el proceso de recarga, concretamente los balances de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el propio acuífero. En la masa de agua subterránea de Boquerón ha sido necesario encontrar variables y series de datos regulares de tipo hidrométrico que permiten su calibración, como son, por ejemplo, la evolución piezométrica y el volumen temporal de descarga concentrada a través de sus principales manantiales. Es importante significar que la estimación de la recarga en los acuíferos está siempre sometida a ciertas incertidumbres, sobre todo relacionadas con la distribución espacial y temporal de la precipitación, con las condiciones atmosféricas am-

bientales (temperatura), las características del suelo y de la vegetación, y a veces con las modificaciones o perturbaciones derivadas de algunas acciones antrópicas (Custodio, 2009).

Las investigaciones hidrogeológicas relacionadas con el cálculo de los recursos hídricos mantienen que es necesario contrastar el valor mediante diferentes métodos. Entre éstos, uno de los métodos más recomendable para el cálculo de la recarga está basado en el valor de deposición total atmosférica del ión cloruro sobre el acuífero, ya que se puede estimar el promedio de recarga a partir del balance químico de sustancias conservativas procedentes casi exclusivamente de la lluvia (Eriksson y Khunakausem, 1969). Esta metodología ha sido tratada por Custodio (1997, 1998 y 2009) y Alcalá y Custodio (2004). Los resultados obtenidos con el uso de esta metodología la proyectan como una técnica solvente a la hora de establecer el valor de la recarga difusa media en determinados acuíferos; además también sirve de ayuda a la hora de precisar algunos términos de difícil cuantificación, como puede ser la posible transferencia de agua por entradas o salidas laterales con acuíferos adyacentes.

En definitiva, la causa principal que ha motivado la aplicación de estos métodos ha sido analizar la coherencia de la nueva definición geométrica propuesta, que modifica parcialmente los límites hidrogeológicos, con la estimación de los recursos generados dentro de la masa de agua subterránea de Boquerón. Este análisis ha estado apoyado en:

- Extrapolación de los resultados obtenidos mediante Visual Balan en la MASb Alcadozo (IGME-CHS, 2009), considerando el valor de la recarga media interanual obtenida para una serie de 20 años hidrológicos (1989-90 hasta 2008-09) (figura 8).
- Aplicación de métodos de balance químico utilizando el ión cloruro atmosférico (CMB).

Estimación de la recarga media aplicando Visual Balan

Los datos obtenidos en la masa de agua subterránea de Alcadozo (IGME-CHS, 2009) indican que la relación porcentual entre la precipitación (P) y la recarga (R) obtenida para el periodo hidrológico 1989/90-2008/09 es $P/R \approx 10,66\%$. Con la nueva definición geométrica de la MASb Boquerón se han modificado parcialmente sus límites hidrogeológicos y, por tanto, la distribución y superficie de los materiales permeables (Lías y Dogger). Se han considerado idénticas variables hidrogeológicas en ambas masas de agua subterránea. La precipitación media registrada en la estación termoplumiométrica de Ontur ha sido de 300 mm, aproximadamente un 25% menos que la registrada en la estación de control de Liétor-CHS localizada en la MASb Alcadozo. Con los valores de precipitación total interanual, superficies permeables en cada sector acuífero de la MASb Boquerón y porcentajes de recarga extrapolados de la MASb Alcadozo se han estimado los valores anuales de recarga y la recarga media. Con estos datos el valor de la recarga media por infiltración de agua de lluvia sobre los

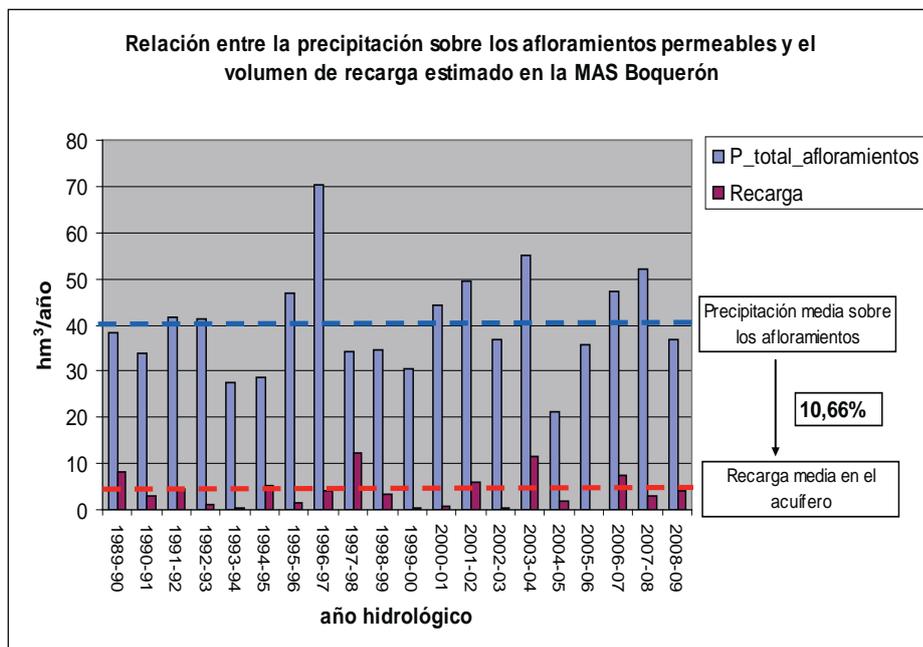


Figura 8. Distribución temporal de la precipitación y la recarga en la MASb Boquerón a partir de los datos extrapolados de la MASb Alcadozo.

122,7 km² de superficie total permeable en la MASb ha quedado fijada en 3,62 hm³/año.

Análisis de los resultados obtenidos en régimen variable

El Plan de Cuenca (CHS, 1997) establece que existe un equilibrio entre las entradas y salidas. En el estudio de cuantificación del volumen anual de sobreexplotación realizado por el Organismo de Cuenca (CHS, 2007) se ha obtenido que la variación de almacenamiento es -13,19 hm³.

El área permeable en la MASb Boquerón está cercana a los 122 km². Con el porcentaje de recarga/precipitación cercano al 10,66%, la recarga media está sobre los 3,62 hm³/año, aunque con una importante variabilidad temporal (figura 8). Si se asumen los valores aportados en el informe de CHS (2007) referidos a los demás términos del balance hídrico, sobre todo por su impacto, los volúmenes de explotación de agua subterránea, el resultado confirma que se está produciendo durante estos últimos años una variación de almacenamiento negativa cercana a los 14 hm³/año.

La evolución piezométrica refleja que la situación de desequilibrio comienza en la década de los años 80 (figura

9). Posteriormente el uso intensivo de las aguas subterráneas ha creado un escenario de sobreexplotación caracterizado por descensos piezométricos continuos que han debido ser determinantes en la modificación del esquema de funcionamiento del acuífero. Este nuevo escenario hidrogeológico implica que hay diferencias respecto del esquema de flujo subterráneo conocido y, por tanto, también respecto de las posibles relaciones internas entre los diferentes sectores acuíferos y de la propia masa de agua con otros acuíferos o masas de agua adyacentes.

La piezometría refleja un evidente vaciado del volumen almacenado en el acuífero, el gráfico representado en la figura 9 muestra unos descensos totales en los puntos de control que oscilan entre los 16 m y 58 m para un periodo aproximado de 30 años (1980-2010). Los descensos mayores se localizan en la parte norte del acuífero Umbría y Búhos, y los descensos menores se observan en el borde suroriental del sector acuífero Boquerón. La evolución de las principales descargas naturales (figura 10) muestran oscilaciones puntuales e intensas con descensos de caudal no recuperado debido fundamentalmente a dos situaciones derivadas del uso intensivo de las aguas subterráneas: por un lado, la gestión relativa-

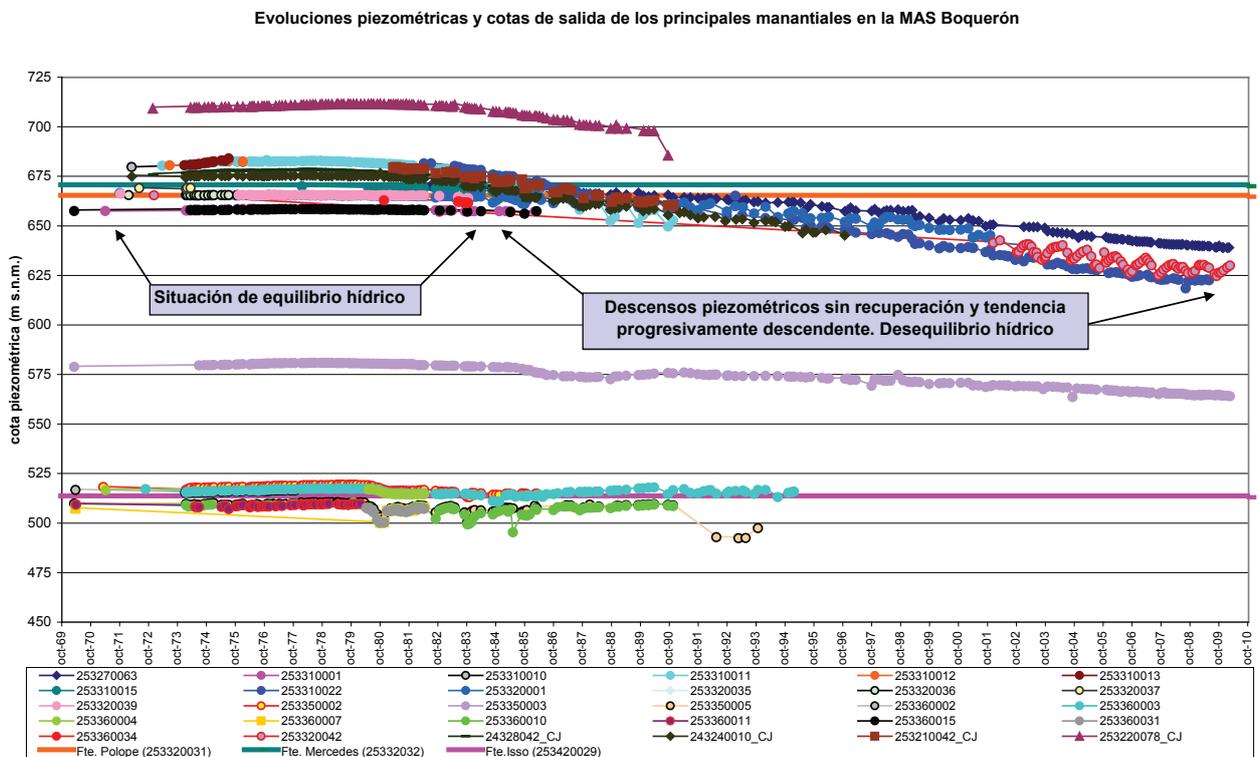


Figura 9. Evolución histórica de los niveles piezométricos y su relación con las cotas de salida de los principales manantiales en la MASb Boquerón.

mente planificada de algunos manantiales mediante la construcción en sus inmediaciones de sondeos de regulación, y por otro, al efecto de agotamiento en los caudales de descarga debido a la sobreexplotación del acuífero. El escenario temporal en el que se hacen evidentes estos efectos negativos en la situación hidrogeológica de la masa de agua subterránea, se puede determinar observando la intersección de las principales evoluciones piezométricas con las cotas de salida de los manantiales controlados.

Se ha estimado que existe una importante variabilidad interanual en los valores de recarga (figura 8) y, aunque los datos de explotación histórica son muy escasos, 9,82 hm³ (IGME, 1988) y 28,46 hm³ (CHS, 2007), se considera que en términos generales la aportación de recursos a la masa de agua ha estado notablemente descompensada respecto de los volúmenes de agua extraídos, es decir, su evolución histórica responde a un escenario temporal de agotamiento de sus reservas hídricas subterráneas. Se puede concluir de este análisis que a pesar del factor de incertidumbre que acompaña a este tipo de estimaciones, se considera válido que aproximadamente un 10,66% del agua de precipitación se pueda infiltrar en el acuífero.

Si se toman como elementos de referencia en el diag-

nóstico de la situación hidrogeológica de la masa de agua subterránea las variaciones temporales de la piezometría y la evolución de las descargas subterráneas (escorrentía no visible y manantiales), el estado más favorable que permite hacer una relativa calibración es cuando el acuífero no esté sometido a ninguna perturbación, es decir, el mejor escenario hidrogeológico posible ha de reflejar el estado natural del acuífero, situación que no se observa en la MASb Boquerón desde el inicio de la década de los años 80.

Cuantificación de los recursos generados y de la superficie permable en régimen natural

Se ha realizado en régimen natural un análisis comparativo entre los caudales descargados desde los principales manantiales y la superficie permeable existente, con el objetivo de comprobar la coherencia hidrogeológica en relación a los recursos generados dentro de los límites de la masa de agua. El escenario temporal escogido es anterior al comienzo de la explotación, concretamente el que transcurre entre los años hidrológicos 1975-1979.

El conocimiento geológico e hidrogeológico de la MASb propone que el análisis comparativo se debe hacer de manera independiente para los acuíferos

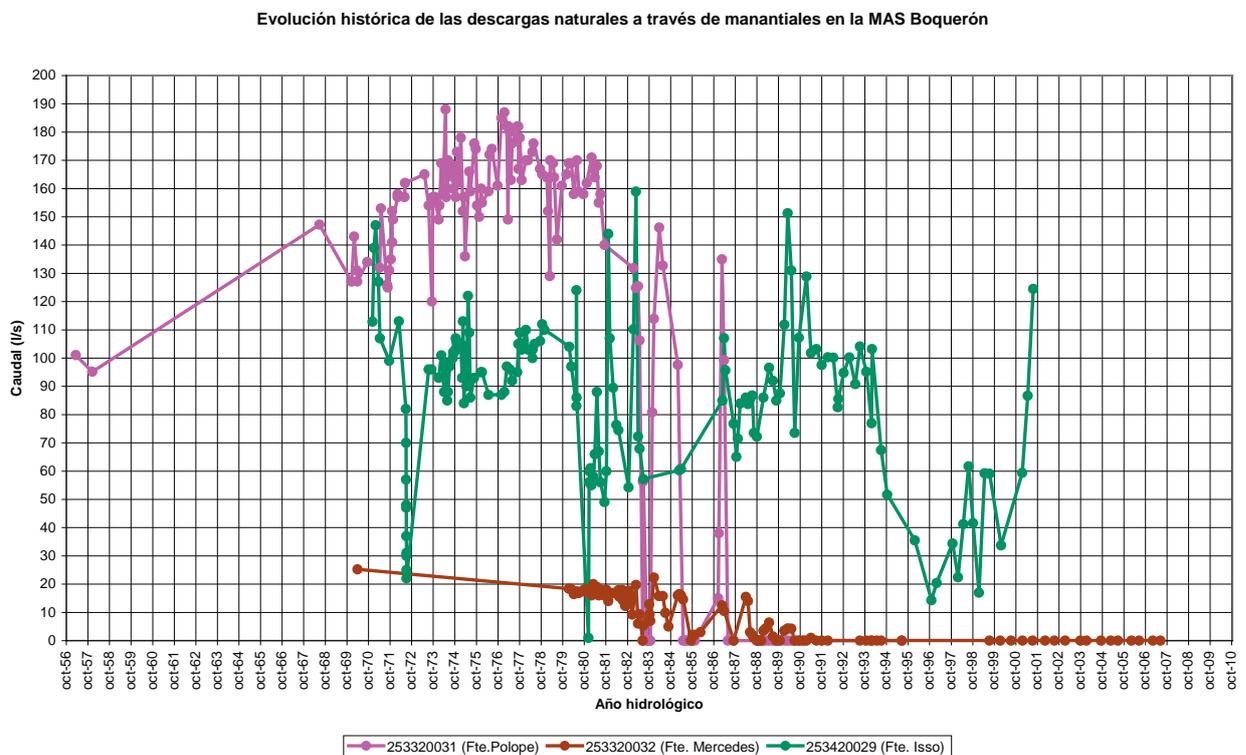


Figura 10. Evolución histórica de las descargas por manantial en la MASb Boquerón