

EL DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADIANA: ASPECTOS HIDROLÓGICOS

Joaquín Cruces de Abia.**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

María del Espino Casado Sáez.*

Dra. en Ciencias Geológicas.

Manuel Ramón Llamas Madurga.*

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

África de la Hera Portillo.*

Licenciada en Ciencias Geológicas.

Luis Martínez Cortina.**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*Dept. de Geodinámica. Fac. de CC Geológicas. Universidad Complutense.

**Dept. de Física Aplicada. E.T.S. Ingenieros de Caminos. Univ. de Cantabria.

RESUMEN

La cuenca alta del río Guadiana, con un clima semi-árido, abarca 16.130 km² desde su nacimiento hasta el embalse de El Vicario. En la cuenca existían más de un centenar de humedales de singular valor ecológico que en 1981 fueron declarados Reserva de la Biosfera por la UNESCO. Hace dos décadas se pusieron en regadío más de 100.000 ha, en su mayoría sostenidas con bombeos de aguas subterráneas. El regadío ha sido el motor económico de la zona en las dos últimas décadas pero a su vez ha producido impactos ecológicos serios en algunos humedales importantes de la Mancha Húmeda, como el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel ó los Ojos del Guadiana. Se presentan algunos resultados de un proyecto de investigación financiado en parte por la Unión Europea: Proyecto EFEDA. Los recursos hídricos renovables del alto Guadiana parecen oscilar entre unos 200 Mm³/año y 500 Mm³/año. Se han producido daños irreparables en muchos de sus humedales, singularmente en las Tablas de Daimiel, pero la mayor parte de ellos pueden ser conservados o restaurados sin conflicto con los intereses agrarios y mantener una economía sostenible.

ABSTRACT

The upper basin of the River Guadiana, in the NE of the southern Castilian Range, with a semi-arid climate, extends over some 16.000 km² from the source of the river to the El Vicario dam. Some 100 wetlands in the basin were declared Reserved of the Biosphere by Unesco. Twenty years ago, more than 100,000 Ha. were placed under irrigation, mainly by pumping groundwater. This irrigation has brought prosperity to the zone but has caused serious ecological damage in some important wetlands such as the Tablas de Daimiel National Park or the Ojos del Guadiana. This article presents some results of a research project partly financed by the European Union-The EFEDA Project. The renewable water resources of the Upper Guadiana appear to fluctuate between about 200 Mm³/year and 500 Mm³/year. Irreparable damage has been caused in many of the wetlands, particularly in the Tablas de Daimiel, but most of them can be preserved or restored without harming agricultural interests and while maintaining a sustainable economy.

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
abril de 1997.

Recibido en ROP:
diciembre de 1996

1. INTRODUCCIÓN

La Cuenca Alta del río Guadiana constituye una región natural que cubre una extensión de 16.130km², en el nordeste de la Submeseta sur castellana. Comprende el área drenada por el Guadiana hasta el embalse de El Vicario, próximo a Ciudad Real, ver fig.1. Sus límites naturales son la Sierra de Altomira en el Nordeste, los Llanos de Albacete en el Este, los Montes de Toledo en el Oeste y la llanura del Campo de Montiel en el Sur.

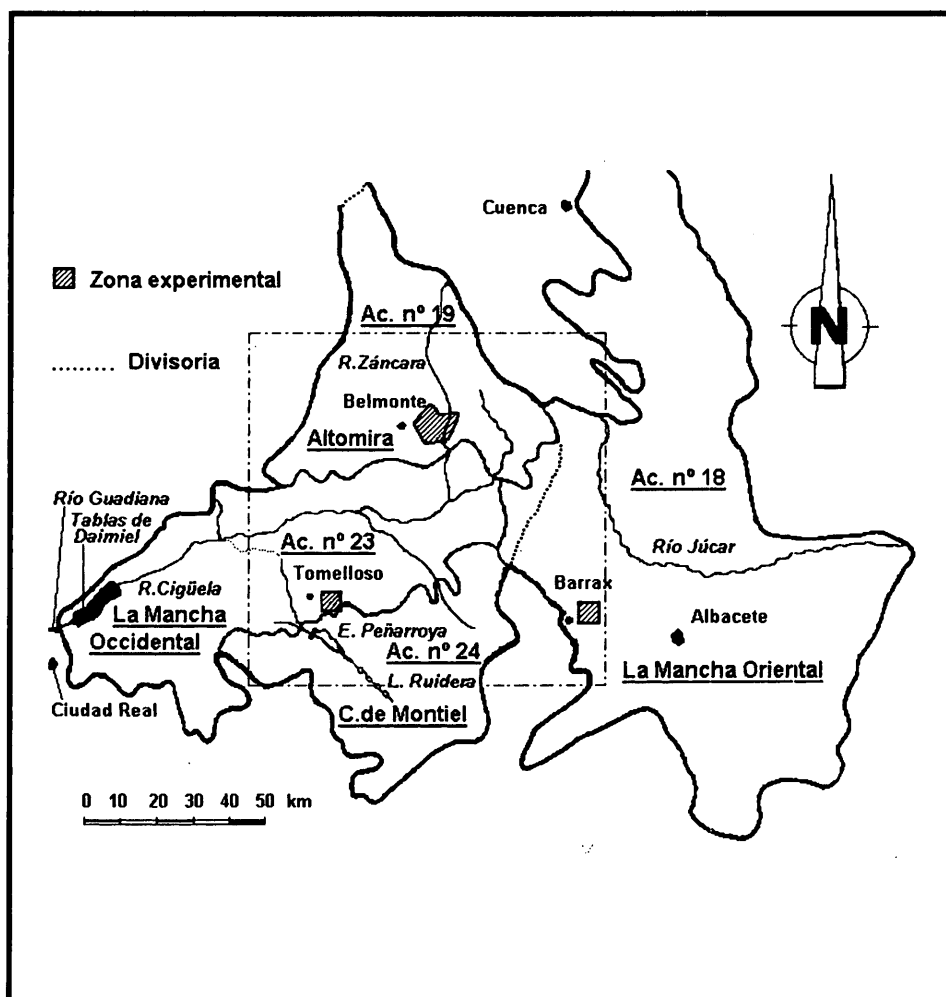
La morfología de la zona corresponde a una gran llanura con suaves colinas con una altitud comprendida entre 600 m en El Vicario y 770 m en el límite con la cuenca del Júcar. El escaso relieve de la cuenca, la ausencia de una red de drenaje bien definida, su abundancia en formaciones acuíferas, y su complicada interrelación con los cauces superficiales, ocasionan la existencia de numerosas lagunas de diverso tamaño, génesis y funcionamiento hidráulico que constituyen la llamada "Zona húmeda de la Mancha", y abarcaban unas 25.000 ha. Merecen especial mención dos zonas de excepcional im-

portancia por su extensión y valor ecológico, hoy Parques Nacionales: Las Lagunas de Ruidera y Las Tablas de Daimiel. Este último se ha visto afectado en los últimos años por el descenso del nivel freático y la reducción en sus aportaciones tanto de aguas superficiales como subterráneas. Con los niveles freáticos en la situación actual y el volumen de agua extraída de las reservas del acuífero (más de 3.000 millones de m³ en los últimos años), la vuelta del sistema a su funcionamiento hidráulico natural llevaría varias décadas, incluso suponiendo una drástica reducción de los bombeos en la zona.

La Unión Europea, dentro de este marco tan problemático, financió durante cuatro años, una investigación, "proyecto EFEDA", entre cuyos objetivos se encontraba el análisis hidrológico de la Cuenca Alta del Guadiana. Así pues, se realizó un modelo de flujo saturado para toda la cuenca, se estudió la

génesis de los humedales más representativos y se procedió a evaluar la recarga por distintas metodologías en parcelas experimentales, situadas en los pueblos, de Belmonte (Cuenca), Tomelloso, (Ciudad Real) y Barrax (Albacete), ya cuenca del Júcar, pero con características muy similares a las condiciones geológicas, climáticas, topográficas y edafológicas, de grandes extensiones dentro de la Cuenca Alta del Guadiana. Se presenta un breve resumen de los aspectos hidrológicos analizados dentro de este proyecto

Figura 1. Mapa de situación de los principales acuíferos de la zona.



2. CLIMATOLOGÍA

La zona de estudio es una de las más áridas de España. Las precipitación media se encuentra en torno a los 400 mm/año ó incluso menos en la parte meridional de la cuenca. En la figura 2 se presentan las desviaciones acumuladas en la estación de Quintanar de la Orden (hacia el centro de la cuenca) con unos 50 años. En ella pueden apreciarse dos series secas entre 1964-74 y 1978-86, tras una larga serie húmeda que va desde 1950 hasta el 64. Puntos a resaltar son: a) las series secas son usualmente más largas que las húmedas, a veces rotas por uno o varios años húmedos; b) la diferencia entre la máxima desviación y la mínima puede ser hasta el triple del valor medio; c) hay evidencia de que series secas como la ocurrida en los años 80 son usuales en tiempos recientes; d) los perí-

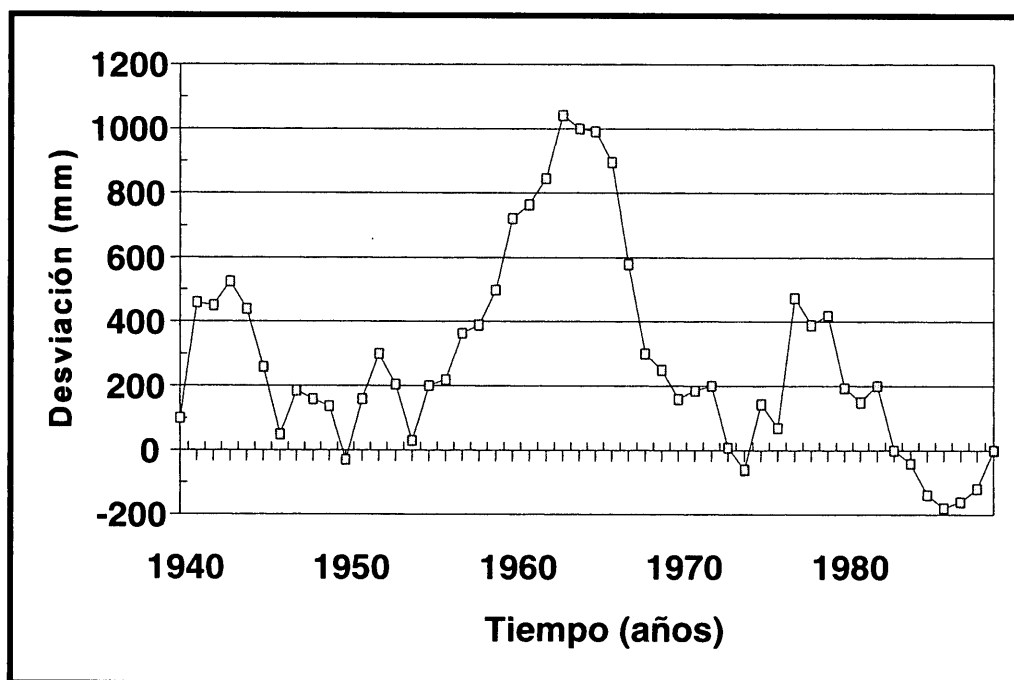


Figura 2: Desviaciones acumuladas en Quintanar de la Orden. Precipitación media: 404 mm/año.

la casi totalidad de la evapotranspiración, y no a la evaporación neta.

3. CURSOS DE AGUA SUPERFICIALES

Los ríos de esta cuenca han tenido una gran interrelación con los acuíferos, siendo ganadores o perdedores a veces incluso dentro del mismo río ó incluso estacionalmente. Pueden incluso cambiar su situación en series secas o húmedas. Los tres principales ríos que aportan caudales al Guadiana en

su cuenca alta son el Cigüela, el Záncara y el propio Guadiana (unos 100 Mm³/año, cada uno).

La salida neta de la cuenca alta del Guadiana a la altura de El Vicario ha sido estimada en unos 400 Mm³/año, para el período 31/71 por SGOP (1982) ó para el período 43/74 por Bromley et al., (1996). De estos, una media de 300 Mm³/año son aportados como flujo base por los acuíferos, aunque con gran variabilidad de unos años a otros, oscilando entre los 68 Mm³/año y los 864 Mm³/año.

La figura 3 presenta los valores de precipitación y escorrentía específica para el Záncara en la estación de aforos de El Provencio (nº 204 hasta el año 73-74, siendo reemplazada por la 224 un poco aguas abajo tras la confluencia del río Rus). Faltan dos años correspondientes al traslado. Las aportaciones disminuyen desde comienzos de los 80, a pesar del incremento del área de la cuenca, siendo en los últimos años casi nulas, y con unas precipitaciones similares.

Las mismas tendencias pueden encontrarse en otros ríos de la cuenca (cfr. Dolz et al., 1996). En conjunto las reducciones no parecen estar justificadas por una disminución en las precipitaciones de los años 80, que correspondieron a una sequencia seca.

4. UNIDADES ACUÍFERAS

Gran parte de la unidades geológicas que subyacen la Cuenca Alta del río Guadiana, constituyen importantes unidades acuíferas. Han sido agrupadas en sistemas, de acuerdo con los comportamientos más o menos homogéneos que presentan, así como por la aparición de facies semipermeables

odos de sequía están distribuidos en la cuenca de manera irregular y con diferente intensidad según las zonas. Las variables del balance hídrico más difíciles de medir a nivel regional, y que tienen una transcendencia mayor en el conjunto del balance en climas semiáridos son, la recarga, la evaporación en las masas de agua superficiales y la evapotranspiración en las zonas húmedas. Para la estación de Toledo, los valores de evaporación medida en tanque clase A oscilan entre 977 y 1495 mm/año, (media de 1242 mm/año), en la década 82-92, (Forrás, 1994).

La evapotranspiración es uno de los parámetros que ha sido sistemáticamente subestimado en la mayoría de los balances realizados hasta la fecha. En zonas húmedas, la evapotranspiración puede exceder hasta dos veces la evaporación en lámina libre de agua (cfr. Calder, 1976). Esta diferencia procede de dos fuentes. En primer lugar se trabaja con el concepto de evaporación neta (diferencia entre la evaporación real deducida en tanque A y la lluvia que ha precipitado). Este método es adecuado en superficies de agua libre pero no en las zonas vegetadas de los humedales. En segundo lugar, la adecuación del método anterior depende de a qué tipo de balance se aplique. Así, si el balance que se realiza corresponde a las aguas subterráneas de un acuífero, la precipitación que cae sobre los cauces y zonas encharcadas durante los meses más fríos, pasa a formar parte de la escorrentía superficial sin entrar en relación con el acuífero, por lo que habría que tenerlas en cuenta sólo en un balance de aguas superficiales. En cambio el agua evapotranspirada durante los meses más cálidos puede proceder de la infiltración producida en otras zonas del acuífero y transmitida a las zonas más bajas de descarga en ríos y humedales, por lo que las pérdidas del acuífero corresponderían a

Figura 3: Precipitación y escorrentía específica en el río Záncara en El Provencio.

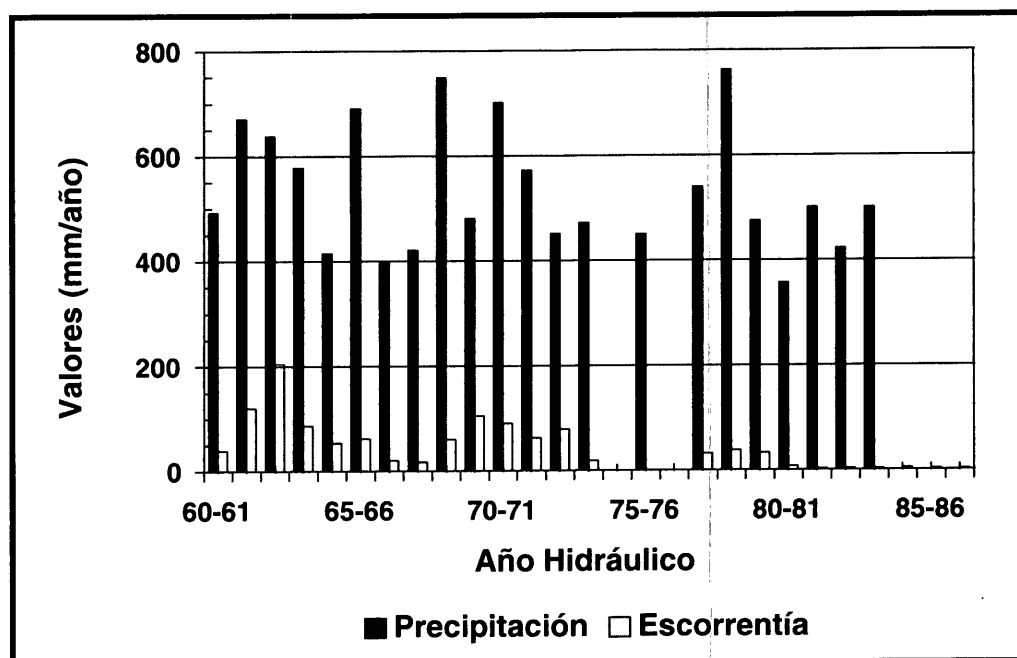
que individualizan unos sistemas de otros.

Los sistemas acuíferos existentes (ver fig.1) en la cuenca son: a) sistema acuífero de la Mancha Occidental (nº 23) en el centro; b) sistema acuífero del Campo de Montiel (nº 24) al sur; c) sistema acuífero de Altomira (nº 19) al nordeste; y d) sistema acuífero de Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas (nº 20) al noroeste. Todos ellos mantienen una divisoria de aguas subterráneas con el sistema acuífero de la Mancha Oriental o de Albacete (nº 18), que no coincide exactamente con la divisoria de aguas superficiales con la cuenca del Júcar pero que está próxima a ella. La hidrogeología de la zona (cfr. IGME, 1985a) está controlada fundamentalmente por el sistema acuífero 23, al que descargan los otros tres, tanto por flujo lateral subterráneo como a través de aguas superficiales.

Un resumen de las principales características de cada sistema puede verse en la tabla 1.

5. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOQUÍMICAS

La calidad química de las aguas subterráneas es variable y en general son aguas bicarbonatado cálcicas ó sulfatadas cálcicas, cálcico-magnésicas y/o magnésicas; ocasionalmente pueden llegar a ser cloruradas. Su grado de mineralización



también variable, no obstante suele ser elevado. Son aguas muy duras ó extremadamente duras. De acuerdo con IGME (1985b), los cationes mayoritarios son el calcio (6-800 mg/l) y el magnesio (2-550 mg/l). En cuanto a los aniones, el sodio oscila entre 20 y 60 mg/l, el potasio no suele superar los 100 mg/l y el cloruro suele ser despreciable. Localmente las concentraciones pueden desviarse mucho de las medias. Debido a las prácticas agrícolas, las concentraciones en nitratos pueden llegar a ser elevadas, especialmente en el sistema más explotado, el S.A. de la Mancha Occidental. Así pues, la concentración media de nitratos en este sistema se aproxima a 50 mg/l, pero pueden medirse concentraciones locales de hasta 400 mg/l. Las aguas procedentes de las unidades acuíferas inferiores, suele ser de buena calidad tanto para consumo humano como para riego.

Tabla 2. Valores de la recarga en la Cuenca Alta del Guadiana estimada por distintos procedimientos

Autor	Método	Valores de recarga estimados
(1) Gouweleeuw (1995)	Posición pico de tritio. Perfil de 10 m	Entre 25 y 125 mm/año
(2) Thornes et al. (1996)	Modelo de crecimiento de vegetación	75-775? mm/año
(2) Imeson y Bergkamp (1996)	Medidas de infiltración	Entre 9 y 15 mm/año
(1 y 3) Bromley et al. (1996)	Datos de aforos (flujo de base)	Entre 9 y 28 mm/año
(1) Casado (1996)	Medidas experimentales	Entre 2 y 40 mm/año
(1) Llamas et al. (1996)	Modelo unidimensional de flujo no saturado	Entre -10 y 220 mm/año

(1) Zona experimental de Barrax; (2) Zona experimental de Belmonte; (3) Zona experimental de Tomelloso.

Tabla 1. Resumen de las características de los principales acuíferos de la Cuenca Alta del Guadiana
(Datos extraídos de Barroso (1992), Fornés (1994), e ITGE (1989))

Sistema Acuífero	Principales Unidades Acuíferas	Espesores m	Trasmisividad m ² /día	S%	Tipo
S.A 04.04 M. Occidental 5.500 km²	Calizas y margas Mioceno Calizas Jurásico	35-200 100-300	500-20.000 200-6.000	5	Libre Conf.
S.A. 04.01 S.Altomira 2.500 km²	Rocas detríticas Terciario Calizas Mesozoico	300 1.100	10 ⁻⁴ -15 100-1.500	5-15 10 ⁻⁴	Ambos Conf.
S.A 04.06 C.Montiel 2.700 km²	Calizas Mesozoicas	50-200	50-1.500	2-5	Libre
S.A. 04.02 Lillo-Quintanar 3.400 km²	R.Detríticas Plio-Cuat. Calizas Mioceno Calizas Cámbrico	500 20 200	Variable 5-200 300	0,2-5	Ambos Libre Libre

6. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NATURAL DE LOS ACUÍFEROS

La recarga natural puede considerarse que es el parámetro fundamental para el establecimiento de planes de gestión y desarrollo sostenible de los acuíferos. Por otro lado, es uno de los parámetros más difíciles de estimar, ya que su medida directa es prácticamente imposible.

Se han venido realizando diversas estimaciones basadas fundamentalmente en balances hídricos. Así en SGOP (1979) cifra la recarga media del S.A. 04.04 en unos 50 mm/año. IGME (1981) estima que la recarga media de los S.A. de Lillo-Villacañas, Sierra de Altomira, y Campo de Montiel es respectivamente en 30, 14 y 43 mm/año de media. MOPT y MINER (1994) estiman una recarga media igual a 50 mm/año para el conjunto de los tres S.A. de la Mancha Occidental, Montiel y Altomira. Las estimaciones de la recarga que se han realizado en el Campo de Montiel, debido a su condición de acuífero cárstico, se han basado fundamentalmente en la aplicación de una serie de coeficientes empíricos de infiltración a los datos de precipitación. De esta forma Montero, (1994), estima la recarga en un año medio igual a 107 mm/año.

Dentro del proyecto EFEDA, se ha tratado de medir o estimar por muy diferentes procedimientos este parámetro. Algunos valores obtenidos pueden consultarse en la tabla 2. Así pues se han realizado análisis del tritio contenido en el agua intersticial (Goweeleuv, 1995) para tratar de localizar los picos de tritio, correspondientes a las pruebas nucleares de 1965. Aunque los resultados obtenidos tienen sus limitaciones, pare-

ce que la recarga podría encontrarse comprendida entre 25 y 125 mm/año, y a favor de caminos preferenciales en algunos casos. Thornes et al., (1996), utiliza un modelo semidistribuido de crecimiento de vegetación, modelo PATTERN, con el que calcula la infiltración. Llega a la conclusión, que puntualmente pueden medirse infiltraciones comprendidas entre 75 y 775 mm/año. Según Imeson y Bergkamp (1996), la recarga se produce en lugares con suelos poco potentes, y especialmente en suelos pedregosos, y estima que la recarga en la zona experimental de Belmonte se halla comprendida entre 9 y 15 mm/año. Estas estimaciones se realizaron de acuerdo con los resultados obtenidos en unas parcelas en las que miden directamente infiltración y escorrentía. Por su parte el Instituto de Hidrología (IH), (cfr. Bromley et al., 1996), se aproxima al problema estudiando los datos procedentes de la estación de aforos del Torreblanca, cerca del embalse del Vicario, para la serie de años, 1943-1974. Según la estimación de flujos base, en estado de no afección por los bombeos para el período de 1943 a 1959 el valor medio de la recarga sería igual a 9 mm/año, e igual a 28 mm/año para el período 1959/74. Casado (1996) realiza medidas de recarga, basadas en datos de tensiometría, obtenidos en unos perfiles de hasta 10 m de profundidad instalados en Barrax. Según los resultados obtenidos la recarga para el período, muy seco, 1993-1995, habría estado comprendida entre 2 y 40 mm/año, así mismo parece que la acción evaporante de la atmósfera puede exceder con mucho el plano de raíces y alcanzar casi 6 m. Llamas et al., (1996a) realizan un modelo de flujo no saturado para el perfil de 10 m de la zona de Barrax. De acuerdo con sus resultados,

Figura 4: Esquema del funcionamiento hidráulico del Sistema Acuífero de la Mancha Occidental. Tomado de García y Llamas (1994).

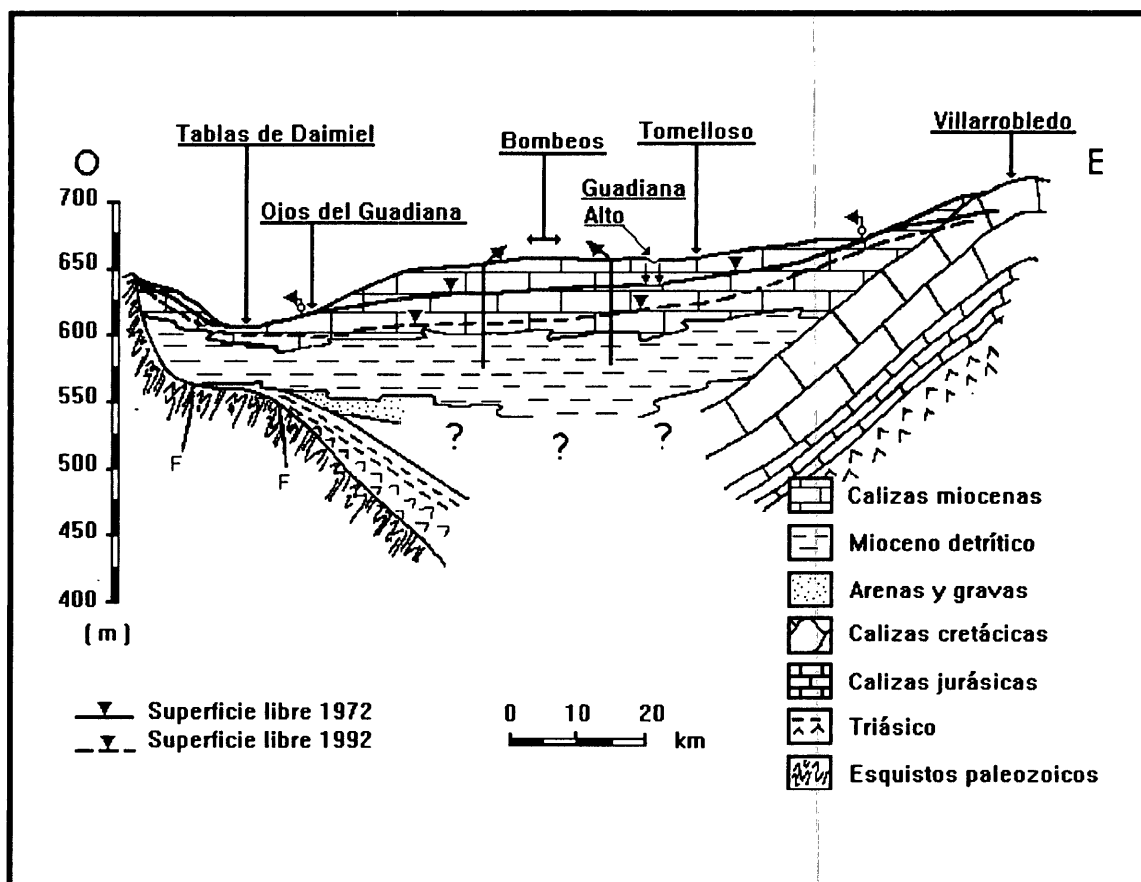
la recarga podría oscilar entre -10 mm/año y 100 mm/año, pudiéndose evaporar agua directamente desde la zona saturada. De acuerdo con sus resultados, los períodos de sequía influyen mucho más en la recarga, que los húmedos. Así pues una reducción del 20% en la precipitación puede producir la anulación de la recarga ese año, e incluso un flujo ascendente desde la superficie libre aunque ésta se encuentre a varios metros de profundidad.

Por el contrario un aumento de la pluviometría de un 20% no proporciona un aumento equivalente en la recarga.

Los procedimientos empleados no son comparables, dados que por unos métodos se ha estimado recarga "bruta" (esto es precipitación menos ETR), por otros como los procedentes de los datos de aforos, recarga "neta" (esto es la recarga bruta menos el agua que va a parar a lagos y ríos, puntos a partir de los cuales vuelve a evaporarse), y por otros lo que realmente se ha estimado es infiltración. No obstante, puede concluirse diciendo que la recarga es muy variable, que los suelos poco potentes y con riegos son más susceptibles de producir recarga y que esta puede llegar incluso a ser negativa algunos años.

7. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HIDROLÓGICO: MODELO CONCEPTUAL

Aunque el sistema acuífero de la Mancha Occidental ha sido uno de los más estudiados en España en los últimos años, aún quedan muchas incertidumbres en cuanto al conocimiento de sus características, incluyendo propiedades físicas e hidrológicas como sus mismos límites, espesor y permeabilidad de los materiales permeables, recarga natural y la distribución espacial de todas ellas. El conocimiento del comportamiento del



acuífero es complicado por las interacciones con los sistemas acuíferos limítrofes (19 y 24) y un borde abierto con la cuenca del Júcar. Parte de la información acumulada en los últimos años se refiere a zonas locales, como Las Tablas de Daimiel, aunque con repercusión para el resto de la cuenca, ya que estas últimas constituyen la salida natural de descarga del acuífero. No existe hasta el presente ningún estudio global que incluya todos los sistemas implicados y sus interacciones. Un primer intento ha sido recientemente realizado por el equipo firmante dentro del proyecto EFEDA II, financiado, por la Unión Europea y será continuado en los próximos tres años por otro proyecto también de la UE, el GRAPES.

A pesar de ello, los principales aspectos de los mecanismos de flujo del acuífero sí parecen claramente establecidos. En régimen natural el sistema acuífero 23 puede ser descrito como un gran embalse subterráneo cerrado por materiales impermeables en su extremo suroeste. El afloramiento del zócalo rocoso en la zona de El Vicario cierra el paso a las aguas que circulan por el acuífero forzándolas a aflorar en los lugares topográficamente más bajos, donde la superficie freática corta a la topográfica, en forma de manantiales cársticos, lagunas y humedales, como los ya mencionados (cfr. SGDGOH, 1989). La recarga natural del acuífero procede de la lluvia, otros acuíferos con niveles más altos y pérdidas de los ríos. Todos estos valores son difíciles de medir o estimar y son susceptibles de

grandes errores, como se puede observar en las diferentes cifras dadas a lo largo de los años, incluso por el mismo organismo.

Las pérdidas del sistema por evapotranspiración son también muy difíciles de calcular dada la gran variabilidad de zonas encharcadas a lo largo del año y la ausencia de medidas directas de evapotranspiración. Desde nuestro punto de vista la mayoría de los cálculos parecen subestimar su valor. En la figura 4 puede verse un perfil longitudinal del acuífero 23 de las zonas de recarga en el NE a las de descarga en el SO. La superficie libre dibujada para 1972 puede representar aproximadamente el estado natural del sistema. Los ríos cuyo cauce quedaba por encima del nivel freático solían infiltrarse, como el Guadiana Alto y el Azuer, en tanto que donde la superficie freática corta la topográfica se producen manantiales como los señalados en los Ojos del Guadiana y al oeste de Villarrobledo. En general el nivel freático solía estar bastante profundo en la mayoría de la zona, lo que causaba el aspecto normalmente seco de los campos de la Mancha, dedicados a cultivos de secano. Las únicas excepciones eran los lugares topográficamente más bajos donde las aguas superficiales o las subterráneas o ambas, permitían mantener zonas encharcadas permanentes o estacionales. La descarga principal del acuífero se producía bien de forma concentrada en los Ojos del Guadiana y en las Tablas de Daimiel o distribuida a lo largo de los cauces de los ríos y zonas húmedas.

8. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HIDROLÓGICO: MODELO NUMÉRICO

8.1. EL MODELO

Para tratar de reproducir el funcionamiento hidrológico descrito en el apartado anterior, se ha llevado a cabo un modelo numérico bidimensional de una sola capa de todos los sistemas acuíferos incluidos en la Cuenca Alta del Guadiana. El principal objetivo de un modelo de estas características es tratar de obtener a grandes rasgos el balance hídrico del sistema, más que intentar reproducir de cerca la evolución de niveles en cada punto. Un vez correctamente calibrado, el modelo puede suministrar información importante sobre la previsible evolución de niveles a nivel regional, volúmenes desembalsados, caudales aportados por o a los ríos, etc., según las diferentes estrategias de explotación planteadas. Para la realización del modelo se eligió un programa conocido y aceptado universalmente, el MODFLOW, como código así como el programa de pre y postprocesado, PROCESSING MODFLOW (PM). MODFLOW es un programa de cálculo de flujo de agua subterránea en diferencias finitas que incluye un módulo de relaciones acuífero-río, el paquete STREAM, que permite realizar un seguimiento del balance hídrico en el río, tramo por tramo y celda a celda, lo que es especialmente importante en un caso

como el Guadiana Alto, donde las interrelaciones entre las aguas superficiales y subterráneas juegan un papel primordial. Una limitación a tener en cuenta en la interpretación de los resultados del modelo y su comparación con los datos de afloramientos, es que el modelo únicamente puede tener en cuenta el agua que circula por los acuíferos, por lo que los resultados que se describirán a continuación están en relación con los caudales de base de los ríos, una vez descontada la escorrentía superficial, lo que a veces no es fácil de estimar.

El modelo incluye los principales sistemas acuíferos de la cuenca (nº 19, 20, 23 y 24 en la nomenclatura antigua ó 04.01, 04.02, 04.03, 04.04 y 04.06 de la nueva). La zona activa de la malla cubre 13.800 km² con un total de 552 celdas activas de 5x5 km² cada una (ver figura 5). El gran tamaño de malla no permite una reproducción muy detallada de niveles en sitios específicos, pero es capaz de simular la configuración regional de la superficie libre y las interacciones entre acuíferos y con los cuerpos de agua superficial muy efectivamente. Así, a escala de cuenca es un instrumento útil capaz de proveer predicciones realistas sobre el impacto de futuras estrategias de extracción de aguas o cambios climáticos. Una de las características más importantes a destacar es que constituye el primer modelo en considerar conjuntamente todos los sistemas acuíferos de la cuenca, con sus interrelaciones si bien simplificadas al ser de una sola capa. En el actual proyecto GRAPES se mejorará su diseño al incluir varias capas que tengan en cuenta la estructura vertical de cada sistema acuífero en aquellas zonas en que haya suficiente información para llevarlo a cabo.

Diferencias entre los primeros resultados del modelo y los datos de campo obligaron a realizar la calibración en dos etapas. Una primera llamada "estacionario perturbado" calibrado con los datos disponibles en torno a los primeros años setenta, pero que incluye algunas perturbaciones antrópicas (riegos tradicionales con norias, primeros bombeos, presa de Peñarroya) cuyos datos de niveles pueden contrastarse con medidas de campo. Un segundo estado llamado "estacionario no perturbado" correspondería al anterior pero eliminadas las influencias antrópicas, y debería corresponder al estado natural del sistema en régimen permanente, aunque no existen datos de campo para su contraste. Las diferencias entre los dos estados serían: 1) una extracción de aguas subterráneas de 85 Mm³/año que representarían un compromiso entre los regadíos tradicionales y la media de extracciones estimada en 150 Mm³/año por el SGOP (1979) para el período 66/67-75/76; 2) derivación de 60 Mm³ para riego en la presa de Peñarroya con un retorno del 25%. A continuación se desarrolló un modelo en régimen transitorio, partiendo como niveles iniciales de los resultados del estacionario perturbado, que reproduce aproximadamente la situación existente en 1974, fecha que se tomó como inicio. El modelo simula la evolución del sistema entre 1974 y 1994, con el régimen de extracciones estimado a partir de los datos existentes, fundamentalmente los realizados por el SGOP en el seguimiento de la explotación del sistema acuí-

fero de La Mancha Occidental y la propia Confederación del Guadiana con la que se ha colaborado estrechamente en los últimos años. También se ha utilizado información procedente de varias tesis y tesinas elaboradas a lo largo de los últimos años en el Departamento de Geodinámica de la UCM, especialmente en lo que se refiere a los restantes sistemas acuíferos. Finalmente se realizó un modelo de predicción de 15 años (1995/2010) manteniendo la situación de 1994

8.2 RESULTADOS DEL MODELO EN RÉGIMEN PERMANENTE

Los resultados del modelo para la situación previa a 1974 revela la presencia de un sistema sostenible razonablemente equilibrado. La recarga bruta de los sistemas acuíferos (es decir, lo que llega a los acuíferos procedente de la lluvia y previa a la evaporación u otros procesos) fue estimada por el modelo en unos 450 Mm³/año, basándose en los flujos base obtenidos por el IH. Se supuso también una entrada de aguas superficiales en la cabecera del Azuer de 45 Mm³/año a su entrada en el sistema acuífero nº 23, según datos de aforos de la estación de Vallehermoso. Las salidas del sistema predichas por el modelo fueron: evapotranspiración en ríos y humedales (170 Mm³/año), descarga a los ríos (200 Mm³/año en El Vicario), derivaciones para riego de aguas superficiales (45 Mm³/año de consumo neto en Peñarroya) y bombeos de aguas subterráneas (85 Mm³/año). No obstante existen numerosos bucles intermedios con tramos de río perdedores cuyas aguas son aportadas a otros tramos aguas abajo del lugar de infiltración por el acuífero. A resaltar que en estas condiciones las extracciones de agua subterránea no llegaban al 20% de la recarga. La mayor parte de la misma era descargada de manera natural a los ríos o se evaporaba en los humedales de la zona. Eliminando las influencias antrópicas, el régimen natural no perturbado permite estimar una aportación media a largo plazo en El Vicario ligeramente superior a los 300 Mm³/año. El valor medio estimado por el Institute of Hydrology del Reino Unido (Cfr. Bromley et al., 1996), para la aportación total en el Vicario, es de unos 400 Mm³/año, lo que da una idea de la importancia de la componente subterránea del flujo en los ríos de la cuenca. Las isopiezas obtenidas por el modelo y su ajuste a los datos de campo puede verse en la figura 5.

8.3 RESULTADOS DEL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO

La segunda etapa del proceso es la calibración del modelo en régimen transitorio para estudiar el impacto de la puesta en regadío de más de 100.000 ha. Los niveles iniciales utilizados han sido los resultados del modelo en régimen "estacionario perturbado". La ejecución se dividió en tres fases: período de calibración de 11 años; período de validación de 10 años; y período de predicción de 15 años. Los dos primeros corresponden a todos los años de que se tienen datos de bombeo relativamente detallados. Las estimaciones de extracciones de

aguas subterráneas para el sistema acuífero nº 23 han sido tomadas del SGOP y de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, y están basadas en el área de los cultivos junto con una dosis de riego media estimada para cada tipo de cultivo. Para los restantes sistema acuíferos, cuyos consumos son del orden del 10% del consumo en el nº 23, se han utilizado estimaciones puntuales localizadas en determinados períodos de tiempo e interpoladas entre ellos, aunque dada su cuantía no se considera necesaria una mayor dedicación.

Las primeras pasadas de calibración se realizaron manteniendo todos los datos previos del modelo "estacionario perturbado". Ante la imposibilidad de reproducir los descensos medidos en campo hubo que replantearse la oportunidad de modificar algunas hipótesis: disminuir las entradas y el coeficiente de almacenamiento. La reducción de este último del 6% al 3% aumentó los descensos pero no en la cuantía necesaria, por lo que se consideró imprescindible replantearse el tema de la recarga. Dada la gran variabilidad del régimen de aportaciones de los ríos de la cuenca, se hizo un estudio paramétrico de la influencia de la recarga en la aportación al final de la cuenca, en El Vicario. El resultado fue una relación casi lineal entre la recarga total de los acuíferos y la escorrentía en el Vicario. El análisis de los flujos de base en la estación de Torreblanca (cerca del embalse de El Vicario) para la serie 1943/94 revela la existencia de series de 15-20 años con valores medios que pueden estar en la relación 3:1. A la vista de todo se decidió utilizar un valor de la recarga anual variable de unos años a otros. En ausencia de un modelo calibrado de precipitación/escorrentía para la cuenca, se utilizó una correlación entre la precipitación total calculada sobre toda la cuenca por el método de los polígonos de Thyssen por el SGDGOH (1991) y los flujos base obtenidos por el Institute of Hydrology para el período 43/74. Los resultados obtenidos son una serie variable de valores de recarga para el período transitorio, con un valor medio de unos 300 Mm³/año, cuando la media general era de unos 450 Mm³/año. Esto revela que el período considerado corresponde a una serie seca dentro de la climatología general de la zona. El modelo fue capaz de simular razonablemente bien los descensos medidos, así como su evolución en el tiempo. La desaparición de Los Ojos del Guadiana y el secado de las Tablas se reproduce en las mismas fechas y con valores de descolgamiento similares a los medidos.

Finalmente el modelo en régimen transitorio fue utilizado para realizar una primera predicción sobre posibles medidas a ser tomadas para conseguir la estabilización y recuperación de los acuíferos de la cuenca. El objetivo de esta ejecución era obtener el impacto de mantener los niveles actuales de explotación hasta el año 2010. Se hizo una pasada inicial utilizando los niveles obtenidos del modelo al final de 1994 como niveles iniciales y manteniendo los valores de recarga de la anterior ejecución, que corresponderían a la media de los últimos 20 años (300 Mm³/año) manteniéndose también los valores de extracciones estimados para 1994 (unos 350 Mm

recuperación del acuífero a una situación similar a la existente antes de 1975 requeriría que la recarga excediera las extracciones en unos 250-300 Mm³/año por un periodo de al menos 20 años, para reponer los aproximadamente 6.000 Mm³ de déficit que el modelo predice se han acumulado en los últimos 20 años. Dado que las perspectivas para esta última opción son muy remotas, la restauración de Las Tablas y el flujo en el Guadiana a su estado originario parece prácticamente inalcanzable.

9. IMPACTOS ECOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS INDUCIDOS POR ACCIÓN ANTRÓPICA

Las actuaciones del hombre descritas en Llamas et al. (1996a) especialmente el incremento de las extracciones de aguas subterráneas, han producido una profunda modificación en la hidrología de la Cuenca Alta del río Guadiana hasta el embalse de El Vicario. Desde un punto de vista hidrológico se podrían resumir en los siguientes apartados.

9.1 MODIFICACIONES EN LA HIDROLOGÍA GENERAL DE LA CUENCA

Una de las modificaciones más visibles actualmente en la hidrología general de la zona es la progresiva reducción de las corrientes de aguas superficiales, llegando en muchos casos a su desaparición. Quizá el caso más llamativo, ya aludido, es el del río Guadiana en su tramo alto. Primero como consecuencia de la construcción del embalse de Peñarroya, se redujo su flujo en el tramo correspondiente entre Ruidera y el canal del Guadiana que llevaba los excedentes del citado embalse hasta la confluencia con el Cigüela. Posteriormente, desde 1983 los Ojos del Guadiana han dejado de fluir, siendo en la actualidad un campo de cultivo. El Záncara que era otro de los principales contribuyentes a las Tablas está prácticamente seco durante gran parte del año. En verano sus aguas no llegan siquiera hasta El Provencio, en el sistema acuífero 23, como consecuencia de las extracciones en su cuenca alta. El Cigüela apenas lleva agua salvo después de las tormentas y cuando se descarga del A.T.S. La descarga de aguas superficiales al parque de las Tablas es nula. El embalse de El Vicario únicamente recoge las aguas del arroyo Bañuelos y otros pequeños arroyos. La presa de Puente Navarro, construida para retener las aguas de las Tablas no se ha llenado desde su construcción.

Como ya se ha comentado, una de las características esenciales del sistema acuífero-río en la mayor parte de los tramos de los ríos en la cuenca, es su conexión hidráulica con el acuífero, hasta el punto de ser determinante del particular funcionamiento de todo el sistema y la aparición de las zonas húmedas que dan nombre a la región. En estos momentos puede afirmarse que la mayoría de los ríos y humedales se encuentran descolgados del acuífero principal, excepto quizá en las

zonas de cabecera y en el acuífero 24, que tiene un régimen de funcionamiento peculiar. Se han producido descensos del nivel freático de hasta 50 m, alcanzándose 20-30 m en gran parte del acuífero, a una media de descenso del orden de 1-2 m/año, produciendo la progresiva desecación de los pozos menos profundos o que se encuentran en los bordes del acuífero.

En la actualidad el esquema natural de flujo desde las zonas de recarga en el nordeste de la cuenca a las de descarga en el suroeste se ha invertido como consecuencia de la bajada de niveles piezométricos producidos por los intensos bombeos llevados a cabo en la zona central del acuífero 23, quedando controlado por los conos de bombeo.

En estos momentos la única salida del acuífero es a través de los bombeos, como se verá con más detalle en el siguiente apartado. Las zonas tradicionales de descarga al fondo de la cuenca han sido sustituidas por los campos de cultivo en regadío, situados fundamentalmente hacia el centro de la misma. Esto impone un modo de funcionamiento para el acuífero totalmente anormal. Por otra parte, la descarga que en régimen natural estaba concentrada en algunos puntos, está ahora distribuida en más de 130.000 ha y se produce con preferencia en los meses más cálidos y en los años más secos.

Como se ha ido poniendo de manifiesto a lo largo de la exposición prácticamente todos los caudales tanto de aguas superficiales como subterráneas se han visto afectados por las actuaciones llevadas a cabo en las últimas décadas. Como muestra cabe señalar que de la aportación media que solía desaguar la cuenca en El Vicario, 403 Mm³/año entre 1931-71, actualmente se ha reducido prácticamente a cero. Asimismo las aportaciones subterráneas del acuífero 23 a los ríos del sistema acuífero en las condiciones existentes a principios de los años setenta han sido estimadas por el modelo en 134 Mm³/año. Estas aportaciones no sólo han desaparecido sino que en estos años el acuífero recibe una recarga adicional procedente de las Tablas y ríos de la zona, aparte de los retornos de regadío. A pesar de ello las reservas del acuífero tienen que aportar unos 300 Mm³/año de media. En los años secos disminuyen las entradas naturales del acuífero y aumentan las extracciones para regadío, precisamente para compensar la escasez de lluvias. Algunos balances pueden verse en las referencias suministradas, especialmente los informes del SGOP, IGME e ITGE.

9.2 INCREMENTO DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES COMO CONSECUENCIA DE LA DESECACIÓN DE LOS HUMEDALES

Tal como se ha visto en apartados anteriores una de las principales salidas del sistema en régimen natural la constituyen las pérdidas por evaporación y evapotranspiración en ríos y zonas húmedas. Uno de los efectos del rebajamiento de los niveles freáticos es la progresiva desconexión del acuífero en

estas zonas, con lo que se van reduciendo consiguientemente dichas pérdidas. Según los datos suministrados por el modelo de los 176 Mm³/año que se evapotranspirarían en toda la cuenca desde los acuíferos, en régimen natural no perturbado, se habría pasado, con las mismas hipótesis de evapotranspiración potencial máxima y profundidad de extinción, a unos 25-30 Mm³/año, que corresponderían al valor estimado en la ejecución de predicción (1995-2010). Esta última cifra corresponde en su mayoría a Las Lagunas de Ruidera. Desde este punto de vista y de forma todavía preliminar, se podría decir que se estarían ahorrando del orden de unos 150 Mm³/año como consecuencia de la eliminación de pérdidas en los humedales. Parte del agua de lluvia que al existir los humedales pasaban a formar parte de la escorrentía superficial, pasarían ahora a incrementar la recarga. No obstante sí parece claro que, si bien no toda la evapotranspiración evitada en los humedales es un ahorro neto, sí que lo sería en su mayor parte. Otro problema es el coste ecológico microclimático que la desaparición de este efecto acarrea a los humedales y sus zonas próximas.

9.3 IMPACTOS ECOLÓGICOS EN LOS HUMEDALES DE LA "MANCHA HUMEDA"

En general, el rebajamiento del nivel freático en las zonas de descarga del sistema acuífero de la Mancha Occidental en más de 30 metros, ha provocado la desaparición de todos los humedales situados sobre el mismo, al menos desde el punto de vista de su funcionamiento natural. Esta situación no parece que pueda ser reparada ni siquiera a medio plazo, dados los datos con que se cuenta en la actualidad. El principal humedal en esta situación es el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, cuyo funcionamiento actual no difiere mucho del de un embalse artificial. Es rellenado con las aportaciones de aguas superficiales de los ríos que confluyen en él (limitadas a episodios esporádicos de fuertes lluvias, como las registradas en diciembre del 95) o con los aportes derivados del Trasvase Tajo-Segura y se vacía por evaporación e infiltración en el acuífero subyacente. Prácticamente al contrario de su funcionamiento en régimen natural.

Los humedales del sistema acuífero del Campo de Montiel no parece que estén afectados por las extracciones de aguas subterráneas, en grado de desarrollo muy inferior al anterior, sino más bien por las secuencias climáticas. Así el secado de algunas lagunas y la desconexión entre la mayoría de las restantes de los últimos años parece haberse restablecido en la actualidad tras un sólo invierno con precipitaciones superiores a la media. El riesgo de estos humedales proviene más bien de medidas de gestión del entorno que de problemas hídricos.

Por último quedan aquellos humedales situados en zonas de aguas de baja calidad por lo que no compiten con la agricultura por dicho recurso y que han sido dañados en el pasado por otras acciones, como desecación, canalización y rectifi-

cación de cauces, protección de avenidas, etc. La mayoría se encuentran situadas en la ribera derecha, concretamente en el acuífero de Lillo-Quintanar. La restauración de los mismos parece factible sin más que un estudio individualizado de las posibilidades de obtención de recursos hídricos, bien superficiales mediante la restitución de los caudales y conexiones existentes previamente, bien mediante aguas subterráneas de baja calidad existentes bajo los mismos, o ambas. Un estudio piloto para confirmar esta opinión está siendo llevado a cabo por algunos de los autores en el humedal de Vadanchó, con el soporte económico de la propiedad del mismo. Un informe preliminar parece confirmar la factibilidad de su restauración, lo que podría ser un acicate para el resto los mismos, tanto de propiedad pública como privada, que en conjunto representan una extensión superior a la de Las Tablas de Daimiel.

10. CONCLUSIONES

De acuerdo con todo lo visto pueden extraerse las siguientes conclusiones: 1) Los recursos hídricos renovables del alto Guadiana parecen oscilar entre unos 200 y 500 Mm³/año. 2) Los descensos generalizados de la superficie freática del S.A. de La Mancha Occidental han producido daños prácticamente irreparables en sus humedales, singularmente en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. No obstante, se han reducido las "pérdidas de agua" por evaporación en unos 100 ó 150 Mm³/año. 3) La economía agrícola del alto Guadiana puede ser sostenible y mejorable con los recursos hídricos de la propia cuenca. Se requiere un control de las extracciones, (manteniendo los volúmenes de explotación próximos a los registrados en los últimos años), una selección racional de los cultivos, y una política de ahorro de agua. 4) Parece claro que la restauración del sistema a su estado de funcionamiento natural es prácticamente inviable y en especial Los Ojos del Guadiana y Las Tablas de Daimiel. Gran parte de los humedales existentes fuera del acuífero 23 podrían ser restaurados y mantenidos con una gestión adecuada. 5) Para alcanzar estos objetivos, es urgente ampliar las investigaciones con objeto de cuantificar con mayor precisión los recursos hídricos renovables y de conocer mejor el funcionamiento hidrológico de los humedales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barroso J.L., (1992). "Hidrogeología de la Cuenca media del Río Záncara, en la zona de Belmonte (Cuenca). Tesis de Licenciatura. Fac. de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 68 pp más anexos.
- Bromley J., Hodnett M., Cooper J.D., Dixon A.J., y Young A., (1996). "Hydrological response to land use change and

over-exploitation of water resources in a semi-arid area of Spain". pp. 1.1-1.62. En EFEDA II Hydrology Group Final Report. Editado por J. Bromley.

–**Dolz J., Gómez Valentín M., Sánchez Juny M., y Urbano A.**, (1996). "Surface water resources of the upper Guadiana basin". pp.5.1-5.18. En EFEDA II Hydrology Group Final Report. Editado por J. Bromley.

–**Calder, I.R.**, (1976). "The measurement of water losses from a forested area using a natural lysimeter". Journal of Hydrology, n.30 n°4, pp 311:325.

–**Casado, M.**, (1996). "Contribución al estudio de la recarga natural en el sistema acuífero de los Llanos de Albacete". Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 244 pp.

–**Fornes, J.M.**, (1994). "Hidrología de algunas lagunas de Castilla-La Mancha". Tesis de Doctoral. Fac. de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 315 pp.

–**García, M., Llamas, M.R. y Cruces, J.**, (1994). "Influence of groundwater exploitation on the functioning of the Tablas de Daimiel National Park (Spain)". Europe. Geophysical Society. XIX General Assembly. Tomo Abstracts p. 165. Grenoble.

–**Goweeleuv, B.**, (1995). "Movement of Infiltrated water in the Llanura Manchega aquifer, Central Spain" (en prensa?).

–**Imeson, A.C. y Bergkamp, G.**, (1996). "Soil profile drainage under natural vegetation". pp.4.1-4.26. En EFEDA II Hydrology Group Final Report. Editado por J. Bromley.

–**INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME)** (1981). "Estudio de los recursos subterráneos de la Cuenca Alta del Guadiana. Sistemas acuíferos n.19, 20, 21, 22, 23 y 24". Informe Técnico 32082. Madrid.

–**INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME)** (1985a). "Síntesis hidrogeológica de Castilla-La Mancha". Colección Informes. Memoria, 19 pp más mapa. Madrid.

–**INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME)** (1985b). "Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España". Informe de síntesis." IGME. Tomo I memoria 281 pp, más anejos y planos.

–**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y GEOMINERO DE ESPAÑA (ITGE)** (1989). "La aguas subterráneas de España." IGME Estudio de Síntesis. Tomo 590 pp más planos.

–**Llamas, M.R., Casado, M., de la Hera, A., Cruces, J., y Martínez, L.**, (1996a). El desarrollo sostenible de la cuenca Alta del río Guadiana. Aspectos socio-económicos y ecológicos". RETEMA. Medio Ambiente. Sept./Oct.1996. pp.66-74. Madrid.

–**Llamas, M.R., Cruces, J., Casado, M., de la Hera, A., y Martínez, L.**, (1996b). "Groundwater modelling and estimation of recharge using one dimensional soil water model". pp.2.1-2.38. En EFEDA II Hydrology Group Final Report. Editado por J. Bromley.

–**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE (MOPT), Y MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGÍA (MINER)**, (1994). "Libro blanco de las aguas subterráneas". Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica.135 pp.

–**Montero, E.**, (1994). "Funcionamiento hidrogeológico del sistema de las Lagunas de Ruidera". Tesis Doctoral. Fac. de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 275 pp más anexos.

–**SERVICIO GEOLÓGICO DE OBRAS PUBLICAS (SGOP)** (1979). La influencia en las Tablas de Daimiel de la extracción de aguas subterráneas en la Llanura Manchega. Informe 11/79. SGOP. M.O.P.U. Madrid. 1979.

–**SERVICIO GEOLÓGICO DE OBRAS PÚBLICAS (SGOP)** (1982). "Estudio de la utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas de la Cuenca Alta del Río Guadiana". Estudio 12/82. M.O.P.U. Madrid, 5 vol. Madrid.

–**SERVICIO GEOLÓGICO DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS, (SGDGOH)** (1989). Estudio para la ordenación de las extracciones del acuífero de la Mancha Occidental. Informe 12/89. SGDGOH. M.O.P.U.. 116 pp+ anejos. Madrid. 1989.

–**SERVICIO GEOLÓGICO DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS (SGDGOH)** (1991). "Evolución de las extracciones y niveles piezométricos en los acuíferos de la Llanura Manchega y Campo de Montiel. Primera parte: Llanura Manchega". Estudio 05/91.Madrid.

–**Thornes, J.B., Burke, S., Harrison, A., y López Bermúdez,** (1996). "Regional estimation of groundwater recharge and the role of changing land use."pp. 3.1-3.32. En EFEDA II Hydrology Group Final Report. Editado por J. Bromley. ●