

Perspectiva general del papel y gestión de las aguas subterráneas en el Área de Doñana, Sudoeste de España

E. Custodio⁽¹⁾, M. Manzano⁽²⁾ y C. Montes⁽³⁾

(1) Dpto. Ingeniería del Terreno. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona
E-mail: emilio.custodio@upc.edu

(2) Dpto. Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica, Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena
E-mail: marisol.manzano@upct.es

(3) Dpto. Ecología, Universidad Autónoma de Madrid. Cantoblanco, Madrid
E-mail: carlos.montes@uam.es

RESUMEN

El Área de Doñana es el ámbito geográfico que comprende el Parque Nacional de Doñana y su entorno, el cual es la principal reserva natural de Europa Occidental. Está situada en las provincias de Huelva y Sevilla, y se extiende desde el Océano Atlántico al sur hasta cerca del río Tinto al norte, y entre la desembocadura del río Guadalquivir al este y la de los ríos Tinto y Odiel al oeste. Fuera de estos ríos, en sus extremos, y sin tener en cuenta el río Guadiamar, actualmente desviado para desaguar en el Guadalquivir antes de su desembocadura, no hay aporte externo de aguas superficiales. Existe una gran Marisma y una extensa área de arenas que contiene un importante acuífero. Buena parte de las manifestaciones hídricas (arroyos, lagunas, descargas en ecotonos, áreas de freatofitas, aportes sostenidos a la marisma) guardan o guardaban relación con el agua subterránea. También existe una importante extracción de agua subterránea para regadíos agrícolas intensivos y en menor grado para usos poblacionales y turísticos. Esto crea un conflicto entre la conservación de la Naturaleza y el suministro a las demandas humanas, que se ha manifestado en los últimos 30 años, y que debe cambiar para lograr complementariedad. Este cambio requiere instituciones y participación activa de los ciudadanos. La evolución de la gestión del agua va en ese sentido, debiéndose superar obstáculos de conocimiento, conseguir voluntad de la sociedad civil y política, además de la confianza entre las partes.

Palabras clave: Aguas subterráneas, Doñana, ecología, gestión

General perspective of the role and management of the groundwater in the Area of Doñana, Southwest of Spain

ABSTRACT

The Doñana Area is the space of the geographical territory around the Natural Space of Doñana and its surroundings, which is the main natural reserve of Western Europe. It is placed in the provinces of Huelva and Sevilla, and extends from the Atlantic Ocean to the south up to around the Tinto River to the north, and from the mouth of the Guadalquivir River to the east up to that of the Tinto and Odiel Rivers to the west. Out of these boundary rivers, and excluding the Guadiamar River, which is currently derived to discharge into the Guadalquivir, before its mouth, there is no external contribution of surface water. There is a large marsh and an extended area of sands, which contains an important aquifer. A large part of water manifestations (ravines, lagoons, discharges in ecotones, phreatophyte areas, sustained flows to the marsh) are or were related with groundwater. There is also an important groundwater draft to supply intensive irrigation fields and, with less intensity, town and touristic demands. This arises a conflict between Nature conservation and human demand supply, which has appeared in the last 30 years. This must be changed to achieve complementarity. Institutions and active participation of citizens are needed. Water management evolves in this direction, but knowledge barriers have to be abated, the interest of civil society and politicians has to be attracted, and confidence among the partners has to be achieved.

Key words: Doñana, ecology, groundwater, management

Introducción

El Área de Doñana está situada en el sudoeste español, en el entorno de la desembocadura del río Guadalquivir, en las provincias de Huelva y Sevilla. Es

un área de excepcional interés ambiental por el relativo buen estado ecológico de sus ecosistemas, tanto de marismas como de sus mantos eólicos, playas y estuario. En ella está el Parque Nacional de Doñana y las áreas protegidas circundantes. Bajo la actual

denominación de Espacio Natural de Doñana el conjunto constituye una de las áreas protegidas más importantes de Europa Occidental. Conjuntamente supone alrededor de 110.000 ha de superficie protegida gestionadas por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. En sus proximidades hay importantes núcleos urbanos (Sevilla, Huelva, Cádiz) que usan ese ámbito como áreas de esparcimiento, principalmente sus playas. Como resultado es un área de competencia entre conservación de la Naturaleza y el desarrollo turístico-residencial y agrícola, al tiempo que es objeto de manifestaciones religiosas multitudinarias derivadas de la devoción a la Virgen del Rocío, centrado en la población de El Rocío.

La palabra Doñana evoca imágenes en las que el agua es el motivo principal, bien se trate de paisajes, de fauna, de vegetación o de modo de convivencia del ser humano con la Naturaleza. Y cuanto más se entra en el conocimiento de las relaciones entre la conservación de sus ecosistemas y el bienestar humano de sus habitantes más se aprecia el papel del agua, tanto la superficial como la subterránea, tanto

por su presencia como por su ausencia, con marcados cambios estacionales. Basta ver la gran variedad de ecosistemas acuáticos y terrestres, y las de formas de ocupación y aprovechamiento, de ahora y del pasado, que se remontan hasta más de 5000 años atrás con la civilización tartesia.

A pesar de los esfuerzos de conservación que se están llevando a cabo en la zona, existe un fuerte conflicto entre la conservación de sus ecosistemas y la biodiversidad que alberga y el crecimiento económico de la Comarca expresado en la expansión de la agricultura de regadío, del turismo y de los proyectos de urbanización del litoral. Dado que todos estos proyectos demandan cantidades crecientes de agua, se tiene el aparente dilema de priorizar la distribución del agua para satisfacer las necesidades de los humanos o para la conservación de su naturaleza singular.

Bajo este contexto el objetivo de este artículo es presentar de forma general las relaciones entre hidrogeología, ecología y extracciones de agua subterránea en un área compleja, como es Doñana, considerando los aspectos sociales que están involucrados.

Características del territorio

Doñana está situada al final de la gran depresión geológica del Guadalquivir, que se abre al Océano Atlántico desde el interior de la Península Ibérica (fig. 1). El extremo final de esta depresión ha sido un área receptora de depósitos geológicos no consolidados desde hace millones de años hasta la actualidad, los cuales han ido colmatando un profundo estuario. Hoy se encuentra una gran llanura aluvial, escasamente por encima del nivel del mar, con una larga barra costera de arena que la aísla del mar abierto, con un dique natural, hoy recrecido artificialmente, que la separa del río Guadalquivir, y con elevaciones laterales en las que a distintas alturas moderadas (hasta 60 m) dominan arenas fluvio-marinas y eólicas, depositadas en épocas diferentes, según la posición del mar y la abundancia de aportes terrígenos. El área se acabó de modelar hace entre 12.000 y 10.000 años, tras la rápida subida del nivel del mar desde una posición algo más de 100 m bajo la posición actual, para alcanzar una altura muy ligeramente superior a la presente hace unos 6000 años. El calentamiento global de la Tierra augura un nuevo ascenso del nivel del mar, que en las próximas décadas será un nuevo desafío a la geografía de Doñana y que comportará una remodelación territorial.

En esta situación, al final de la cuenca geológica del Guadalquivir, que es rica en generación de sedimentos -incluyendo al propio río Guadalquivir y a los

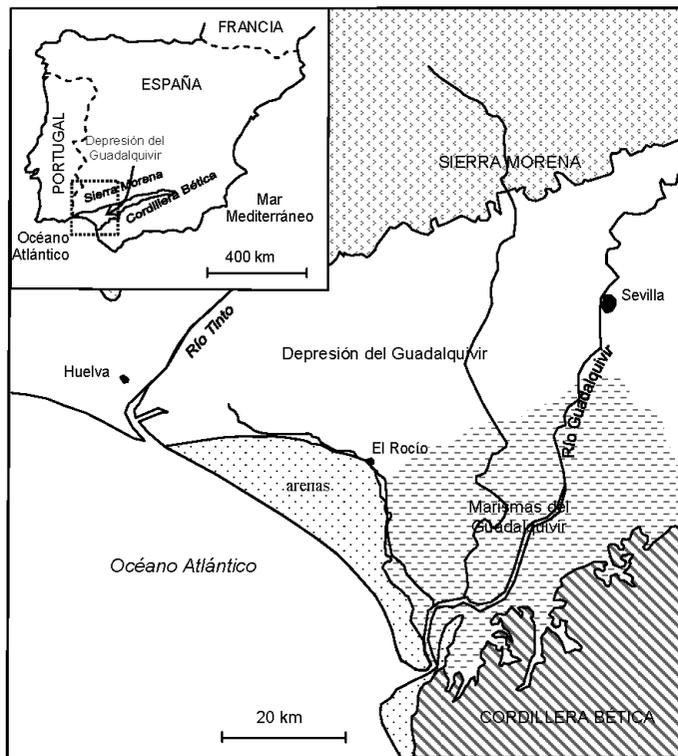


Figura 1. Depresión del Guadalquivir y su ubicación geográfica
 Figure 1. Guadalquivir graven and its geographical situation

afluentes locales como el río Guadimar- y la entrada de agua externa a la marisma, cambiante estacional e interanualmente, son importantes condicionantes del ciclo hidrológico. También es importante el aporte directo de la lluvia sobre el territorio del que se conoce actualmente como Comarca de Doñana (Fig. 2). Este agua en parte se acumula como aguas superficiales y en parte se infiltra en el terreno y alimenta a los acuíferos que se albergan en las extensas formaciones de arenas silíceas -también ocasionalmente de gravas en profundidad- que ocupan buena parte de este territorio (Salvany y Custodio, 1995).

Las aguas subterráneas, ubicuas en el territorio pero no directamente visibles, son las que mantienen manantiales, cursos de agua, diferentes tipos de humedales y áreas permanentes de vegetación freatófita (Llamas, 1990; Custodio y Palancar, 1995), y por ello son parte inseparable de la esencia de Doñana, y desde hace pocas décadas son también una importante fuente de agua dulce para abastecer a la población local y atender a sus actividades económicas.

En lo que sigue se tratará de las aguas subterráneas, de importancia capital para el desarrollo económico de la zona pero también para sustentar muchos de los ecosistemas de interés para la conservación de especies amenazadas o en peligro de extinción como es el caso del lince ibérico (*Lynx pardinus*), el felino más amenazado del planeta. No se trata aquí de las aguas superficiales de la Marisma, que aunque son la joya de la corona, no quitan importancia a las aguas subterráneas, el gran tesoro escondido.

El agua subterránea en Doñana: Aspectos Generales

Las aguas subterráneas son permanentes -solo fluctúan naturalmente de forma lenta y suave- y mantienen manifestaciones hídricas y formaciones palustres permanentes o semipermanentes (IGME, 1992; Trick, 1998; Iglesias, 1999; Lozano, 2004; Custodio, 2000; Trick y Custodio, 2004), que son el contrapunto y complemento de la extrema fluctuación de las aguas superficiales, resultan un recurso sostenido para la biodiversidad y crean una fuente de variación en la arquitectura del paisaje (Coletto, 2003).

La recarga se produce predominantemente por infiltración del agua de lluvia (Iglesias et al., 1998).

Las aguas subterráneas mantienen el arroyo de La Rocina, que tributa permanentemente a la Marisma y sostiene una importante área boscosa de vegetación de ribera. Tiempo atrás, hace cuatro décadas, también sucedía lo mismo en otros arroyos locales. Las aguas subterráneas también crean numerosas descargas de agua a lo largo del contacto entre las arenas y la marisma -en los ecotonos Norte, de la Vera y de La Retuerta- alimentan lagunas permanentes como las del sistema de Santa Olalla y son la causa de la existencia temporal de muchas otras lagunas en amplias áreas de El Abalarío y Los Cotos (Manzano, 1999, 2001; Manzano et al., 2000), además de ser el agua permanente para la vegetación de raíces penetrantes tipo freatófita, como el monte negro (brezales) y las destacadas e importantes manchas de alcornoques (Sousa Martín, 2004), éstos últimos de gran relevancia local para la avifauna.

El agua subterránea se evapora de forma natural en sus áreas de descarga -en algunas lagunas puede dar lugar a fluctuaciones de gran interés en el nivel del agua y en su salinidad, como en el complejo lagunar de Santa Olalla- produce contribuciones periféricas a la Marisma y mantiene la Marisma de El Rocío. En la Fig. 3 se da un diagrama simplificado de funcionamiento.

Las variaciones interanuales y estacionales de la precipitación en el Bajo Guadalquivir son importantes

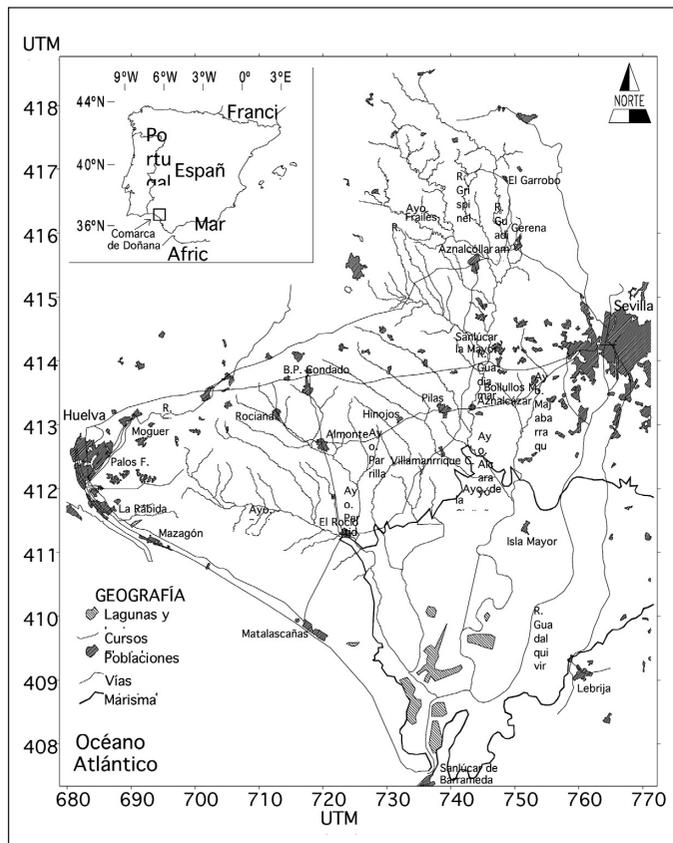


Figura 2. Comarca de Doñana y sus alrededores
Figure 2. Doñana region and its surroundings

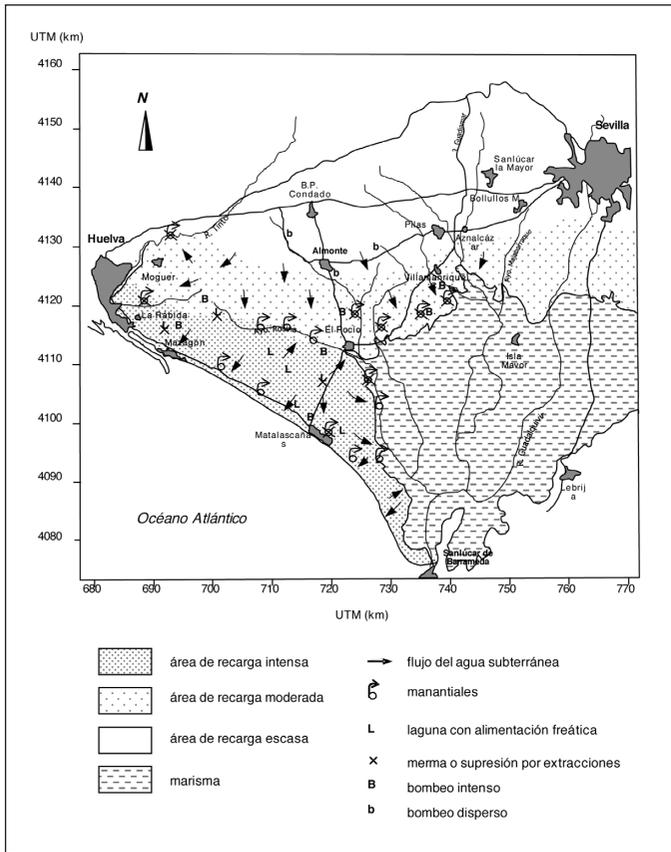


Figura 3. Esquemización del funcionamiento de los acuíferos de la Comarca de Doñana
 Figure 3. Schematic dynamics of Doñana region aquifers

y por lo tanto lo es también la recarga a los acuíferos. Esta variabilidad ha estado siempre presente, con posibles ciclos de decenas de años, lo que hace que en general se tenga poca memoria de lo sucedido con anterioridad y se dé excesivo peso a las situaciones temporalmente próximas. En la Fig. 4 se muestra la desviación acumulada de la pluviometría respecto a la media para el período 1866-2005 para la serie restituida de Sevilla. Los ascensos sostenidos corresponden a épocas húmedas en que llueve más que la media y los descensos prolongados a épocas secas en que llueve menos que la media. Se identifica una época de tendencia seca entre 1941 y 1959, y una época notablemente húmeda en el entorno de 1960-1970, mientras que el conjunto de los últimos 40 años corresponde a una secuencia de tendencia media pero con notables cambios interanuales. Se trata de una rápida alternancia de años secos y húmedos muy marcados, con periodicidad de 6-7 años, y una intercalación seca entre 1976 y 1983.

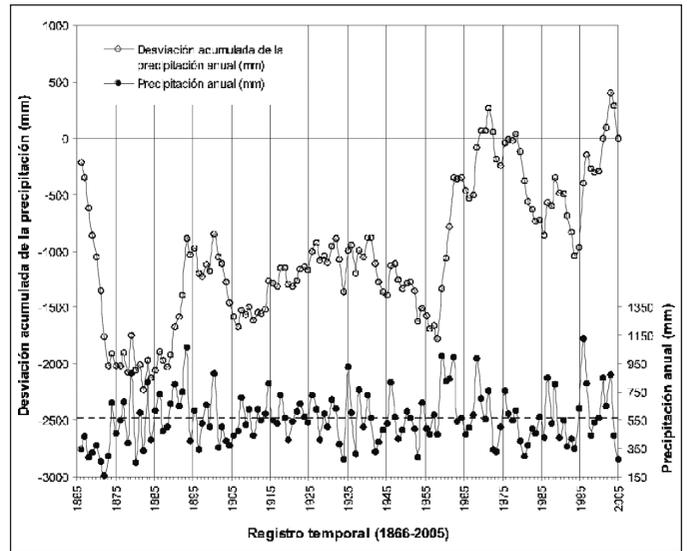


Figura 4. Desviación acumulada de la precipitación registrada en la estación Sevilla-Tablada (precipitación media = 555,4 mm/año)
 Figure 4. Cumulative deviation of precipitation in the Sevilla-Tablada station (mean value: 555.4 mm/year)

El agua subterránea en Doñana como recurso humano

Pocas actividades humanas pueden concebirse sin que en ellas se use y se consuma agua. Desde la remota antigüedad el agua ha sido una base atractiva para asentamientos humanos, actividades agrícolas y establecimientos industriales. Sólo cuando las dificultades naturales creadas por la presencia y variabilidad del agua no se han podido vencer, el ser humano se ha visto separado de ese agua que desea. Tal ha sucedido en Doñana, bien sea en la Marisma, por las largas épocas de inundación, la insalubridad de los terrenos encharcados y la rapidez de las fluctuaciones -anegaciones rápidas y con grandes caudales- bien sea en las arenas, por la falta de suelo productivo con sólo la lluvia local, y la falta de caudales de aguas superficiales susceptibles de ser aportados, por su lejanía y la necesidad de bombeos importantes. Así Doñana se mantuvo durante siglos como terreno indómito y de grandes latifundios de caza, con sólo poblaciones en la periferia, ocasionales rebaños y una escasa ocupación humana que aprovechaba la vegetación natural y sus escasos frutos. Los aprovechamientos de agua se limitaban a las irregulares aportaciones de ríos fluyentes a la periferia del Área de Doñana, a unos pocos pozos manuales de subsistencia y al uso del agua de las lagunas para abrevar ganado.

La situación cambió drásticamente a partir del primer tercio del siglo XX con las grandes obras hidráulicas para el aislamiento y drenaje de parte de la Marisma, principalmente para el cultivo extensivo del arroz. También desde mediados del siglo XX se hicieron actuaciones para forestación maderable -principalmente eucaliptos, pero también pinos- en áreas con niveles freáticos someros de los que se había retirado la vegetación arbustiva y arbórea natural. Finalmente en la década de 1970 se lanzaron los trabajos para asentar grandes superficies de regadío de iniciativa privada y sobre todo pública -el llamado Plan de Transformación Agraria Almonte-Marismas- con moderna tecnología para extraer importantes caudales de los acuíferos a fin de convertir las arenas en productivas agrícola mediante riegos frecuentes y aportes artificiales de nutrientes y de plaguicidas. Se trataba así de introducir una agricultura tecnificada intensiva y agresiva. Al mismo tiempo, la presión del turismo masivo de sol y playa puso sus puntos de mira en la extensa playa virgen entre Huelva y la desembocadura del Guadalquivir. Así aparecieron los complejos residenciales y hoteleros de Matalascañas y Mazagón, aunque se frenaron otras iniciativas surgidas a finales de la década de 1990, dejando una buena parte de la costa poco afectada. También creció el poblado de El Rocío al hacerse popular su atractivo religioso y turístico, y ser de fácil acceso por carretera. También han crecido las otras poblaciones periféricas.

Todo ello tiene un claro acicate en la disponibilidad de agua y también conlleva un profundo impacto territorial que se manifiesta en la destrucción o degradación de ecosistemas y en la modificación de forma importante del ciclo hidrológico local, tanto en la cantidad como en la calidad. A cambio aparece un desarrollo humano importante en un territorio hasta entonces muy poco ocupado y socialmente pobre, con importantes extracciones de agua subterránea. Véase la Fig. 5. Cabe hacerse la pregunta de si este modelo de crecimiento económico que supone una merma del capital natural de la zona conceptualizado como ecosistemas y biodiversidad que generan un flujo de servicios que contribuyen al bienestar humano de la población local, puede mantenerse a lo largo del tiempo. La respuesta es difícil y compleja, sometida a distintos puntos de vista y cambiante con el tiempo y el progreso científico, tecnológico y social, pero la generación actual debe encontrar la respuesta y actuar en consecuencia.

Los balances del agua subterránea, realizados según el esquema de la Fig. 6, permiten conocer la importancia de los diferentes componentes y como ha cambiado su valor medio en las diversas sucesivas

circunstancias. La Fig. 7 es un esquema sintético de los resultados.

El agua subterránea en Doñana en el momento actual

El ciclo del agua subterránea actual en Doñana es la suma de los efectos de las situaciones antes descri-

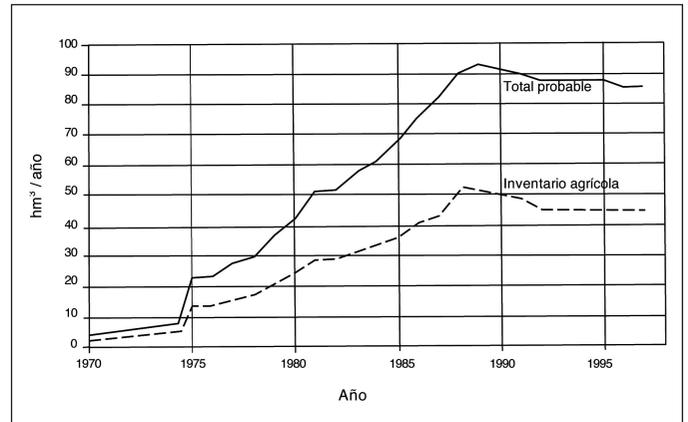


Figura 5. Estimaciones de las extracciones de agua subterránea en la Comarca de Doñana según las informaciones agrícolas disponibles y su ampliación para incluir otros bombeos. La incertidumbre en los valores anuales puede ser del 15 al 30% (según UPC, 1999 y otras fuentes)

Figure 5. Groundwater abstraction estimation in the Doñana region after available agriculture data and its extension to include other abstractions. Yearly values uncertainty is 15 to 30%. (after UPC, 1999 and other sources)

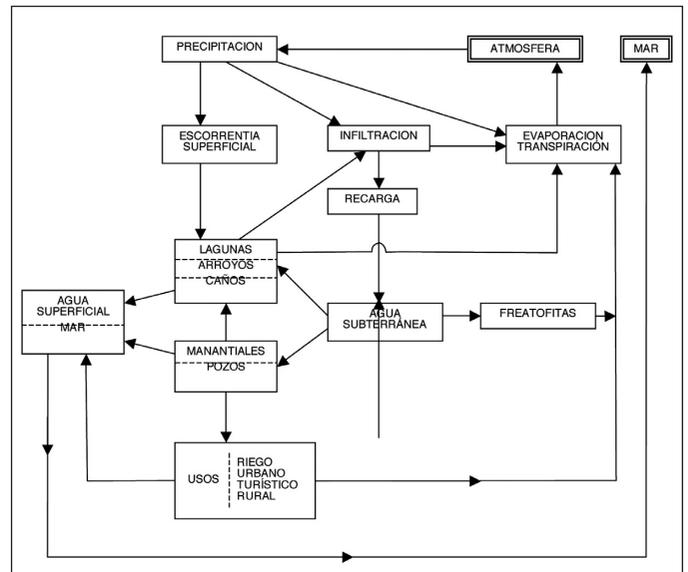


Figura 6. Diagrama esquemático de los elementos del balance de agua en Doñana

Figure 6. Sketch of the water balance components in Doñana

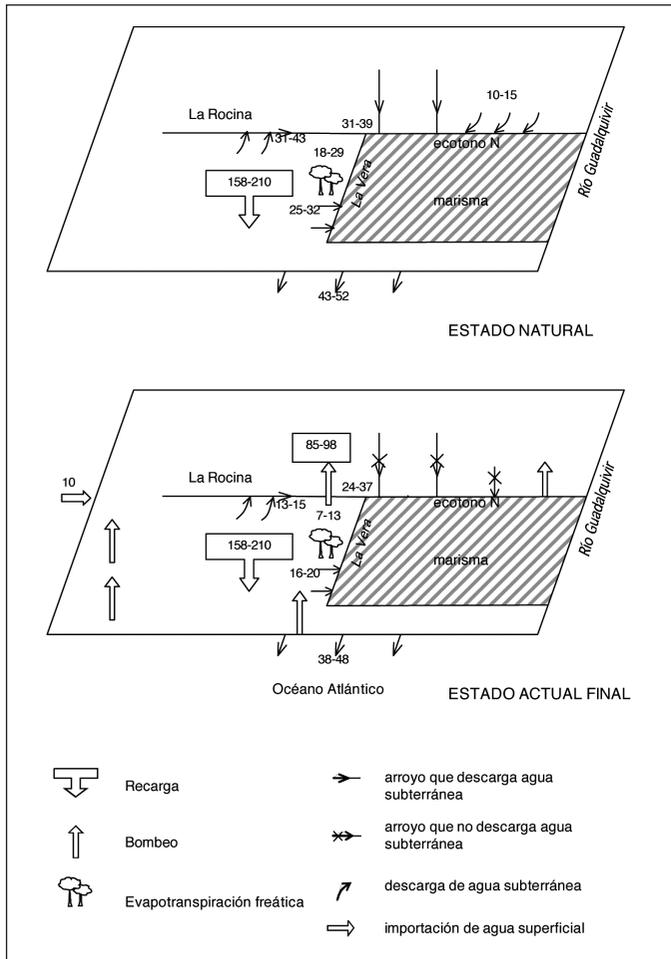


Figura 7. Resultados sintéticos estimativos de los balances hídricos medios de los acuíferos de la Comarca de Doñana, en hm³/año, en estado natural (figura superior) y con el actual estado de bombeos (figura inferior) cuando se alcance el nuevo estado de equilibrio. En el año 2006 aún se está en la evolución transitoria en que se toma agua del almacenamiento subterráneo para mantener parte de las descargas. La importación de 10 hm³/año es lo previsto desde las cuencas al oeste para regadíos en el lado oeste del Área de Doñana *Figure 7. Estimative synthetic result of average water balances of Doñana region aquifers, in million m³ (hm³)/year, in natural situation (upper figure) and with current development when a new steady state will be attained (lower figure). In year 2006 there is still a transient situation in which water is taken from the underground storage in order to sustain discharges. The transfer of about 10·10⁶ m³/year of water from the western is what it was considered for the Doñana area*

tas, las cuales además, en parte, compiten antagónicamente entre si. Las modificaciones de funcionamiento de las aguas subterráneas son importantes y de efectos severos a largo plazo ya que existe una íntima relación entre nivel freático, descarga y conservación de humedales (Fig. 8). Las extracciones

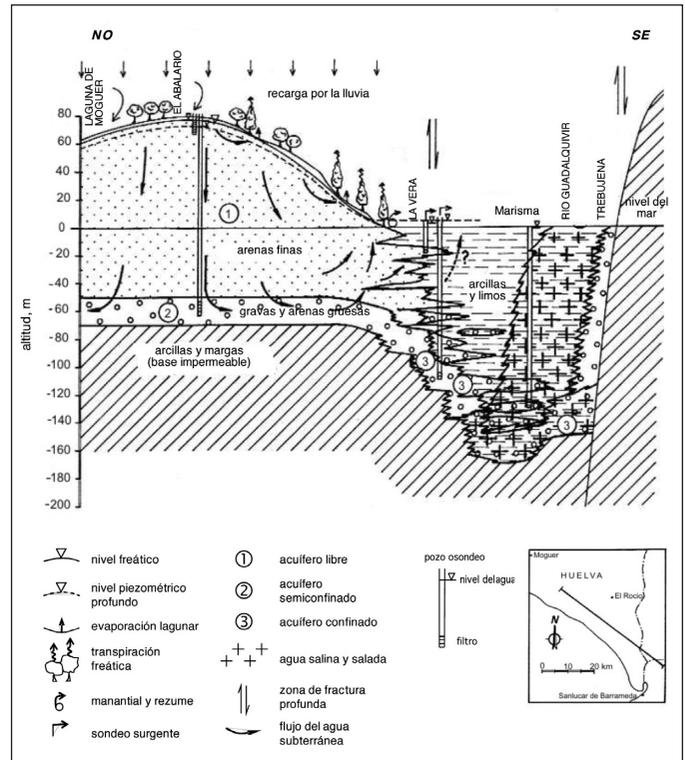


Figura 8. Esquematación del flujo del agua subterránea entre el sector Oeste de las arenas de El Abalarío hasta la Marisma, indicando las descargas naturales (Custodio, 1993)

Figure 8. Cartoon showing groundwater flow in the sandy western sector of El Abalarío up to the Marsh. The natural discharges are indicated (Custodio, 1993)

agrícolas para regadío han provocado un descenso general de los niveles freáticos y piezométricos, que es además muy acusado en áreas determinadas (Fig. 9). El resultado es un progresivo descenso de los caudales de descarga a arroyos y caños, en especial al arroyo de La Rocina (Fig. 10) y dilatados tramos del ecotono Norte y de La Vera, así como una reducción de las áreas de vegetación freatofítica (Manzano et al., 2005a; 2005b; Suso y Llamas, 1990). Se trata de una evolución temporal y espacial progresiva, insuficientemente conocida, a medida que el sistema se va adaptando a las nuevas condiciones, con un tiempo de respuesta de varias décadas y que está notablemente perturbado por las fluctuaciones estacionales e interanuales, lo que se añade a la incertidumbre en las apreciaciones. Es importante destacar que el proceso continúa y continuará aún si se mantienen las condiciones actuales, es decir, sin nuevos cambios.

En la figura 11 se muestra la altitud del nivel freático ajustado por modelación numérica en que se aprecia la gran depresión creada en el ecotono nor-

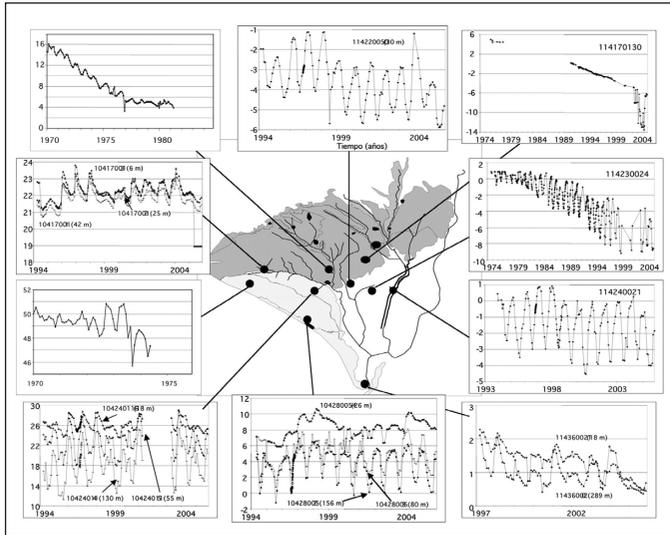


Figura 9. Hidrogramas de niveles freáticos y piezométricos en distintos lugares del acuífero tras el inicio de las extracciones intensivas de agua subterránea. Valores en metros sobre el nivel medio del mar

Figure 9. Water-table and piezometric head hydrographs in different places of the aquifer after intensive groundwater abstraction started. Values in m above mean sea level

oeste (área de los Hatos) por las extracciones intensivas de agua subterránea, las cuales también se producen, de forma menos acentuada, en el entorno de El Rocío.

Cambios ambientales debidos a la extracción de agua subterránea

La modificación del ciclo del agua en Doñana tiene consecuencias notables en la conservación de sus ecosistemas y la biodiversidad que albergan, aunque el seguimiento y la medición de esas consecuencias son con frecuencia pobres debido a la lentitud con que se producen los cambios, su carácter progresivo a lo largo de muchas décadas y la incertidumbre que se deriva de observaciones temporales en un ambiente notablemente fluctuante, tanto estacional como interanualmente. Parte de esa información se podría tratar de recuperar de la serie de imágenes satelitales archivadas a lo largo de los últimos 25 años.

Los cambios en el flujo natural del agua en el acuífero, derivados de los bombeos intensivos en ciertas áreas, han producido una clara merma en las descargas naturales de agua subterránea que se manifiesta en la reducción del caudal de base del Arroyo de La Rocina, aún en evolución, que está poco

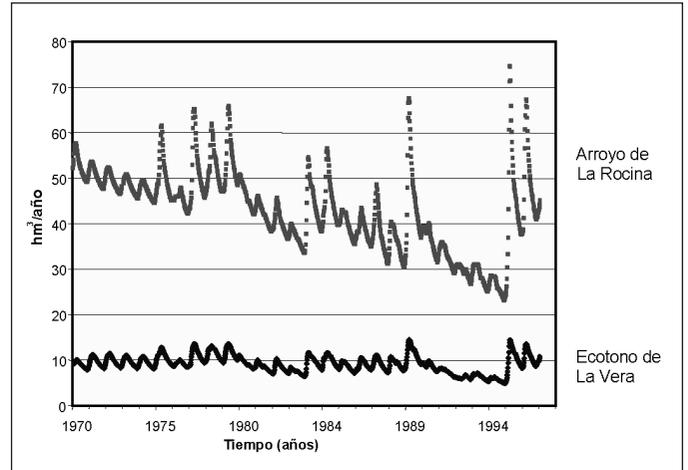


Figura 10. Evolución simulada de las posibles descargas de agua subterránea entre 1970 y 1999 al Arroyo de La Rocina y al Ecotono de La Vera, según el modelo de la UPC (1999). Se muestra el progresivo descenso de caudales

Figure 10. Simulated evolution of the possible groundwater discharges between 1970 and 1999 to the La Rocina ravine and to the La Vera ecotone, after the UPC (1999) model. There is a progressive flow decrease

documentado. Tampoco hay estudios de detalle sobre la esperable progresiva reducción de áreas de vegetación freatófítica. Allí donde el descenso es mayor -riego con agua subterránea de los arrozales del área de los Hatos y en los campos agrícolas de los alrededores de El Rocío- los arroyos permanecen secos y parte de la población de alcornos se han quedado sin alimentación freática y han ido muriendo progresivamente.

En las áreas lagunares el descenso del nivel freático y piezométrico profundo se traduce en cambios progresivos, dentro de las notables fluctuaciones estacionales e interanuales cuando esas lagunas están en áreas de recarga, tales como:

- disminución del área encharcada y de vegetación freatófítica, y mayores salinidades al final de la época estival, como sucede en el sistema lagunar de Santa Olalla,
- paso de laguna permanente o semipermanente a temporal e inicio de la mineralización de los sedimentos de fondo de laguna, como sucede en la laguna del Charco del Toro,
- transformación de lagunas freáticas a lagunas temporales alimentadas por la lluvia y flujos hipodérmicos, al quedar el nivel freático por debajo de los sedimentos semipermeables de fondo (Laguna de Río Oro, Laguna de Moguer) y proceso de degradación progresiva de dichos sedimentos.

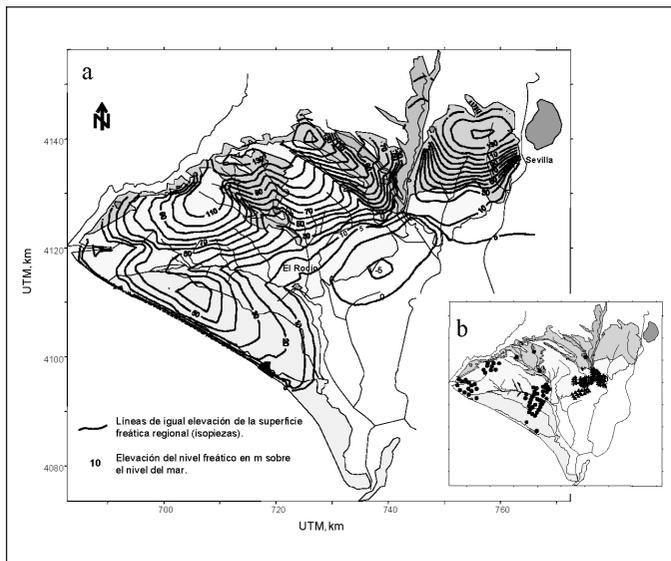


Figura 11. Altura del nivel piezométrico/superficie freática de la situación de las aguas subterráneas en la Comarca de Doñana y áreas próximas en 1999, ajustada a las observaciones existentes según el modelo de simulación numérica de la UPC (1999). En el cono de depresión desarrollado en el entorno del ecotono Norte se alcanzan descensos que llegan a 15-20 metros bajo el nivel del mar. La situación de los principales puntos de extracción está en el mapa b

Figure 11. Piezometric head/water-table elevation of groundwater in the Doñana region and nearby areas, in 1999, after the UPC (1999) numerical model. In the drawdown cone that develops around the Northern ecotone piezometric values are 15 to 20 metres below sea level. The situation of the main abstraction points are in map b

Dada la ubicación espacial de buena parte de esas lagunas las extracciones de abastecimiento a Matalascañas y a Mazagón tienen cierto impacto sobre ellas, que se suma al que producen las áreas agrícolas próximas.

También las decisiones sobre el cambio de la vegetación natural de los mantos eólicos han afectado al ciclo del agua subterránea. Tal sucedió con la introducción de bosque maderable -principalmente eucaliptos- capaz de transpirar anualmente más agua freática que la vegetación natural. Ello dio lugar a un descenso de niveles y de las descargas superficiales, como es el caso de la cuenca del Arroyo de La Rocina, aunque la información es muy escasa y debe deducirse por cálculo. Un buen conjunto de los arroyos secundarios dejaron de ser funcionales, aunque el hecho no está suficientemente documentado. La erradicación de esos eucaliptos en el área protegida en la década de 1990, y la lenta recuperación de la vegetación nativa, ha hecho dis-

minuir la transpiración y aumentar la recarga, con lo que el ascenso de niveles freáticos puede haber reactivado los antiguos arroyos. Sin embargo no hay datos observacionales confiables ya que no existe una red de observación suficiente y además se superpone el efecto de descenso freático general por extracciones de agua subterránea, y la fluctuación estacional e interanual.

La recarga por la lluvia apenas se ha alterado, salvo en su composición química. Todo apunta a una mayor contaminación ambiental atribuible al área industrial de Huelva está produciendo un cierto aumento de la salinidad, y en especial del sulfato y quizás también de la acidez. No parece que sea un impacto severo para las aguas subterráneas, pero lo podría ser para la vegetación. Sí es importante el efecto de la aplicación de productos agroquímicos en los espacios regados, que se manifiesta en un notable incremento del contenido en nitratos en algunos pozos, y está camino de producirse en otros lugares en que el contaminante ya está en el subsuelo. Ya hay afecciones a aguas usadas para abastecimiento. Las afecciones a los ecosistemas y la biodiversidad son aún poco conocidas puesto que la descarga de agua subterránea se hace con retraso de décadas y la actividad agrícola empezó intensivamente a finales de la década de 1980. Esas aguas son similares a las de los drenajes agrícolas del Sur de El Rocío (por ejemplo del área de Los Mimbrales), pero aún no se tienen estudios de detalle, aunque están en curso. El aporte de nitrógeno asimilable es capaz de producir cambios ecológicos, pero no se sabe si va acompañado del transporte de cantidades suficientes de fósforo, el otro nutriente esencial.

En el borde norte de la marisma, donde existe el tránsito entre las aguas subterráneas dulces, que en su inmensa mayoría descargan en el ecotono, y las aguas salinas antiguas de la zona confinada, cabe esperar un cierto avance del agua salina hacia el ecotono invadiendo terrenos ya lavados en tiempos pasados. Parece que así sucede a tenor de los cambios iónicos observados, pero los datos son pocos. La zona afectada es un área en que los pozos que se construyeron hace tres décadas están hoy en su mayoría abandonados.

En el ecotono oeste, a lo largo de la Vera y área de El Rocío, había algunos pozos surgentes de agua dulce construidos en la década de 1960 que se utilizaban para abreviar ganado. Salvo uno de ellos, que apenas mana agua, los otros están hoy sin surgencia y a veces con niveles profundos. Constituyen una de las indicaciones claras de que se han producido cambios en el ciclo del agua.

Acciones para controlar los cambios en los acuíferos

La premisa necesaria para actuar correctamente en relación con los cambios del ciclo hidrológico en Doñana es un buen conocimiento hidrológico. Este conocimiento se consigue mediante estudios específicos, de los que se dispone de un buen conjunto, que en buena parte son tesis doctorales. No obstante aún se está lejos de un nivel de estudio suficiente por parte de Universidades, Organismos Públicos de Investigación y entidades públicas y privadas, en parte por la relativa escasez de medios económicos asignados.

Un primer gran avance en el conocimiento se produjo entre finales de la década de 1960 y principios de la de 1970 con el estudio pionero, y muy bien realizado, sobre la hidrogeología del Bajo Guadalquivir, que llevaron a cabo el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) a través de FAO, y el Gobierno de España (CEDEX-IGME). Este trabajo sirvió luego de base a los estudios y trabajos del Plan de Transformación Agraria Almonte-Marismas, llevado a cabo por el IRYDA. Buena parte de los trabajos hidrológicos e hidrogeológicos posteriores fueron realizados por el IGME y por Grupos Universitarios de investigación (Universidades Complutense y Autónoma de Madrid, Universidad Politécnica de Cataluña) que con la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el apoyo del Servicio Geológico de Obras Públicas, y algunos proyectos financiados por la CICYT, avanzaron notablemente el conocimiento.

En 1991 se designó la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992), que en un año emitió su dictamen sobre las circunstancias socio-económicas, que incluía el agua como elemento esencial, y que ha sido la base de muchas de las actuaciones político-administrativas posteriores.

El conocimiento adquirido se plasma en modelos conceptuales del funcionamiento de las aguas subterráneas, que permiten establecer modos de cálculo y modelos numéricos que simulan el comportamiento real. Las herramientas disponibles no son completas pero hay modelos que simulan el comportamiento de los acuíferos de forma razonable, por lo menos en amplios sectores de la Comarca de Doñana. Sin embargo, aún no se tiene una herramienta satisfactoria pues hay áreas poco conocidas y mal calibradas. Además, un modelo es un instrumento dinámico que debe mejorarse y adaptarse progresivamente al ir avanzando en el conocimiento y a medida que se recopilan y estudian las nuevas observaciones experimentales y rutinarias.

Con el conocimiento disponible es posible diseñar actuaciones para tratar de controlar los cambios

hídricos que se producen en Doñana. Es lo que ha inspirado el Proyecto Doñana 2005, con diferentes grados de maduración, aunque orientado con preferencia hacia la hidrología de superficie.

Las actuaciones tendentes al restablecimiento de las condiciones naturales en lo que respecta a las aguas subterráneas son:

- reducción de las extracciones y alejamiento de las mismas de los ecotonos y lagunas, con especial énfasis en el ecotono Norte
- restricción del uso de fertilizantes agrícolas y de ciertos plaguicidas resistentes a la degradación
- redistribución espacial de las extracciones de abastecimiento urbano para minimizar el impacto concentrado, pero sin renunciar a su utilización, sobre todo en sequías, cuando otras fuentes de agua dulce dejan de estar disponibles.

Todas estas acciones son costosas y los resultados reales pueden ser inciertos. Por ello se requiere un alto nivel de estudio y un diseño cuidadoso en función de lo que se pretende conseguir, evitando cualquier actuación dura e irreversible. Lo mismo cabe decir de las posibles importaciones de agua desde las cuencas vecinas. Son actuaciones arriesgadas que han de ser sometidas a un cuidadoso análisis de cantidad y calidad para no añadir una nueva situación inconveniente y poco reversible a las ya existentes.

Medición de los cambios hídricos de las aguas subterráneas

La base de unas correctas actuaciones de conservación y de restauración medioambientales, y de un buen conocimiento y entendimiento de lo que hay que hacer, es disponer series de medidas de las variables hidrológicas de interés, en una red suficiente de puntos de observación, además de observaciones generales. Se trata de una tarea metódica, necesaria y en ocasiones poco agradecida, pero cuya buena realización puede marcar el límite entre una sociedad desarrollada y eficaz en la conservación de su capital natural y los servicios que genera, y una situación en precario, poco sustentable y depredadora de los sistemas naturales.

La situación actual en Doñana en cuanto a las redes de observación es razonablemente buena, pero es incompleta, de características variables, dispersa en una variedad de organismos que están a veces poco vinculados entre sí, sin que exista un órgano que recolecte la información, y a veces con datos de acceso difícil o que suponen gastos importantes de adquisición. Todo ello puede ser una limitación importante a los trabajos a realizar y a que converjan

y fructifiquen en Doñana suficientes esfuerzos científicos y de estudio.

Existe una proporcionalidad entre la importancia de un asunto y el nivel de mediciones que hay que realizar para facilitar unas actuaciones bien fundamentadas. En Doñana, en unos casos hay proporcionalidad, y en otros hay un claro déficit. En unos casos se trata de datos sofisticados y de adquisición compleja, pero en otros faltan algunos de los más elementales y sencillos.

Con carácter de resumen muy sintético, la situación en Doñana es la siguiente:

- a) Precipitación. Aceptable conocimiento de la cantidad diaria. Muy escaso conocimiento de la calidad.
- b) Aguas subterráneas. Red de observación de niveles freáticos y piezométricos buena y moderna, en buena parte instrumentada, aunque aún necesita algunos complementos. Sólo ocasionales medidas de salinidad y de calidad del agua, con una red de pozos de control muy escasa y orientada al abastecimiento público. Escasas mediciones de caudales extraídos, con aún una cierta proporción importante no controlada o ilegal.
- c) Descarga de agua subterránea. No hay mediciones específicas.
- d) Recarga de agua subterránea. No hay instalaciones permanentes ni medidas sistemáticas.
- e) Vegetación freatofítica. No hay medidas sistemáticas de la transpiración ni de las superficies que ocupan.
- f) Formaciones palustres. Controles de nivel y calidad en escasos lugares y ocasionales.

Las bases de datos habrían de permitir operar y recalibrar regularmente los modelos de agua subterránea, por ejemplo cada dos años, y usarlos como herramienta de gestión. Aún se está lejos de esta situación ideal. Cada nuevo intento de modelación supone un notable esfuerzo de recopilación y síntesis, y con un excesivo grado de interpretación y valoración personal, lo que frena el uso de la herramienta.

La gestión del agua subterránea en Doñana

La actual gestión del agua en la Comarca de Doñana tiene varios responsables, y se han producido cambios recientemente. En su mayor parte la Comarca de Doñana está en la Cuenca del Guadalquivir, y por lo tanto el organismo legalmente responsable es la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, dependiente del Ministerio de Medio Ambiente (Administración General del Estado Español). En las

pequeñas cuencas que vierten al río Tinto la autoridad actual -antes era de la Confederación Hidrográfica del Guadiana- es la Dirección General de las Cuencas Atlánticas, dependiente de la Agencia Andaluza del Agua (Junta de Andalucía), que tiene también competencias territoriales de gestión hídrica en la Comarca de Doñana. La evolución ha ido hacia una simplificación de organismos actuantes, aunque aún subsiste una diversidad orgánica notable a pesar de una mayor unidad en las cabezas. Eso complica y dificulta una unidad de acción en lo que se refiere al ciclo hidrológico en Doñana. Esta gestión ha de estar integrada en la gestión territorial. Por esta razón sigue siendo válida la propuesta de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana, de 1992, de crear un Consejo Gestor del Agua de Doñana, sin necesidad de que tenga autoridad propia, pero sí encomendada a partir de los diferentes órganos legalmente responsables. Ha de tener suficiente peso moral, capacidad de gestión y medios de actuación para poder abordar la compleja problemática, de forma integrada y en el marco de una visión general del territorio, de su valor natural y su riqueza social, y con independencia de los cambios políticos y de las autoridades territoriales.

Este Consejo Gestor, con capacidad ejecutiva, debe estar además participado eficazmente por todos los interesados en la gestión del agua de la Comarca, que incluye no sólo a los usuarios directos de las aguas superficiales y subterráneas, sino a los que tienen responsabilidad o interés en la protección de la Naturaleza. Esa participación eficaz debe entenderse como una representación suficiente -con capacidad decisoria- en los órganos de gobierno y una corresponsabilidad en las tareas de gestión, en especial las que atañen a la vigilancia y observación territorial, con sus medios o con la colaboración de organismos especializados de la Administración y con el apoyo científico y técnico de los grupos universitarios más capacitados y experimentados.

La gestión del agua supone mantener bases de datos, realizar observaciones, establecer normas, operar elementos de simulación numérica y tomar decisiones en cuanto a usos del agua, extracciones, depuración, vertidos y actividades agrícolas, ganaderas y urbanas que afecten al dominio público hídrico, y también ejercitar su autoridad en materias que afecten al agua del territorio ante otros órganos de gestión o ante los tribunales. Para ello debe ser una entidad con personalidad jurídica, con capacidad de autogestión y el debido apoyo financiero.

Lo que se dice no es una entelequia ya que existe el ejemplo precedente de los acuíferos del Baix Llobregat, en Barcelona (Codina, 2004; Galofré, 2000)

aunque con unas circunstancias muy distintas. En España hay otros ejemplos con las aguas superficiales, y se empieza a caminar con las aguas subterráneas (Hernández-Mora y Llamas, 2000), y la Ley de Aguas y la Directiva Marco de Agua Europea aportan elementos para hacerlo posible si hay voluntad por parte de los diferentes estamentos implicados.

Agua, Ciencia, Economía y Sociedad

Doñana no es sólo un área de valor natural extraordinario sino un laboratorio en el que aprender a conjugar el uso racional de los servicios que generan sus ecosistemas y la biodiversidad, con el desarrollo y progreso social de sus habitantes, así como con el disfrute e instrucción de sus visitantes, buscando una coexistencia Ser Humano/Naturaleza. A pesar de la complejidad territorial y administrativa, las condiciones son adecuadas, posiblemente mejores que en otras áreas europeas, para buscar esa armonía con una base científica, en un marco sustentable y bajo principios éticos, considerando los valores económicos involucrados. Esto supone considerar los beneficios y costes directos, y las externalidades, en un contexto flexible y adaptable.

Por esa razón Doñana ha de continuar siendo -se ha de potenciar- un lugar de encuentro y ejercitación de la ciencia del agua en aras de tender puentes y romper barreras entre las distintas visiones de gestionar las relaciones entre los sistemas naturales y humanos. En este contexto adquiere una gran importancia la Ecohidrología, una disciplina científica compartida por la Hidrología y la Ecología, que investiga el efecto de los procesos hidrológicos en la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas acuáticos y terrestres así como sus efectos en los procesos socioeconómicos implicados en los distintos componentes del ciclo del agua (Falkenmark y Rockstrom, 2005).

Desde la Ecohidrología se intenta poner de manifiesto que existe un estrecho vínculo entre la conservación de los ecosistemas y el bienestar humano regulado por el ciclo del agua. De una forma simple, los servicios que generan los ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos, son los beneficios que la sociedad obtiene de ellos. La idea básica es que los ecosistemas funcionales y en especial la biodiversidad que albergan, constituyen un capital natural que es necesario conservar, al menos en unos ciertos niveles, ya que generan toda una serie de servicios, tales como alimentos, madera, agua, pesca, secuestro de carbono para el control del sistema climático global, polinización para la producción de las cose-

chas, depuración del agua, formación de suelo, regulación de enfermedades, asimilación de nutrientes, etc. sin olvidar sus valores estéticos, educativos, recreacionales o espirituales. Estos servicios de los ecosistemas tienen consecuencias en la prosperidad de la sociedad humana y no sólo en su economía, sino también en la salud, las relaciones sociales, las libertades y la seguridad.

Por tanto hay que tener en cuenta que el agua juega un papel esencial para el desarrollo socioeconómico de la zona al satisfacer las demandas agrícolas y urbanas, pero también al mantener el funcionamiento y la autoorganización de los ecosistemas y su biodiversidad está contribuyendo al bienestar humano de la población local de Doñana a través del flujo de servicios que generan.

Desde la Ecohidrología no tiene sentido plantear la gestión del agua como un conflicto de competencias entre humanos y ecosistemas. La visión sistémica de la Ecohidrología reivindica la necesidad de gestionar de forma integrada e integradora las cuencas superficiales y los acuíferos en función de una interdependencia entre la precipitación, los flujos superficiales y subterráneos del agua, los servicios de los ecosistemas y el bienestar humano.

Para ello, el Consejo de Gestión del Agua, y el organismo superior territorial especializado en el que se pueda encuadrar, deben tener una vertiente científica bien establecida y delimitada, no condicionada por el resto de actividades, con un soporte intelectual independiente y dotación suficiente para generar y coordinar fondos de investigación, estudio y desarrollo, dentro de un marco con visión a largo plazo.

La Sociedad Civil juega aquí un papel importante a través de representantes que defiendan los intereses de los distintos grupos que se puedan formar. No se trata de brazos auxiliares de la Administración para facilitar la tarea de la misma, sino de órganos separados, encuadrados en la ley, que puedan responsabilizarse de ciertas actuaciones, asumir otras y oponerse a lo que sea conveniente y lícito hacerlo. La actual experiencia práctica en este campo es aún muy pequeña, pero se vislumbra como la mejor alternativa futura de gestión de los recursos hídricos, en especial cuando la modificación de la parte subterránea del ciclo hidrológico es importante y es debida a un número muy elevado de usuarios.

Referencias

- CIED (1992). *Dictamen sobre estrategias para el desarrollo socioeconómico sostenible del entorno de Doñana*. Comisión Internacional de Expertos sobre el Desarrollo

- del Entorno de Doñana. Junta de Andalucía. Sevilla: 1-123.
- Codina, J. (2004). *Las aguas subterráneas: una visión social*. El caso de la Comunidad del Delta del Llobregat. Rev. Real. Acad. Cienc. Exac. Fis. Nat. (Esp.). Madrid, 98(2): 323-329.
- Coleto, M.C. (2003). *Funciones hidrológicas y biogeoquímicas de las formaciones palustres hidrogénicas de los mantos eólicos de El Abalarío-Doñana (Huelva)*. Dep. Interuniversitario de Ecología. Universidad Autónoma de Madrid. Canto Blanco, Madrid. Tesis Doctoral.
- Custodio, E. (1993). *Preliminary outlook of saltwater intrusion conditions in the Doñana National Park (Southern Spain)*. En: 12 Saltwater Meeting Study and Modelling of Saltwater Intrusion into Aquifers. CIHS, CIMNE-UPC, Barcelona. 295-315.
- Custodio, E. (2000). Groundwater-dependent wetlands. *Acta Geologica Hungarica*, 43(2): 173-202.
- Custodio, E. y Palancar, M. (1995). Las aguas subterráneas en Doñana. *Revista de Obras Públicas*. 142 (3340): 31-53.
- Falkenmark, M. y Rockstrom, J. (2005). Balancing water for humans and nature. The new approach in Ecohydrology. Earthscan. London: 1-247.
- Galofré, A. (2000). *Las comunidades de usuarios de aguas subterráneas en la Catalunya del 2000: desarrollo histórico y realidad actual*. La Economía de Agua Subterránea y su Gestión Colectiva (Eds. N. Hernández-Mora y M.R. Llamas). Publ. Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi Prensa. Madrid.
- Hernández-Mora, N y Llamas, M.R. (eds.) (2000). *La economía del agua subterránea y su gestión colectiva*. Publ. Fund. Marcelino Botín. Ediciones Mundi Prensa, Madrid.
- Iglesias, M. (1999). *Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalarío, Doñana, Huelva*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Iglesias, M., Trick, T., Custodio, E., Manzano, M. y Giráldez, J.V. (1998). Estado actual de conocimiento de la recarga en el acuífero de Doñana. En: I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almería.
- IGME (1992). *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Colección Informes Aguas Subterráneas y Geotecnia. Ed. IGME. 64 pp + 2 mapas.
- Llamas, M.R. (1990). *La importancia de Doñana*. Cauce 2000, Rev. Col. Ing. Caminos. Madrid. 43 pp.
- Lozano, E. (2004). *Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas*. Tesis Doctoral. Dpto. de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Manzano, M. (1999). *Los humedales de Doñana y su relación con el agua subterránea*. Ponencia de la 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana (Doñana 2005). Huelva, octubre de 1999. MMA, Madrid.
- Manzano, M. (2001). Clasificación de los humedales de Doñana atendiendo a su funcionamiento hidrológico. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XXIV: 57-75.
- Manzano, M.; Borja, F. y Montes, C. (2002). Metodología de tipificación hidrológica de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional y a su gestión: Aplicación a los humedales de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (3): 313-330.
- Manzano, M., Custodio, E. y Colomines, M. (2005a). El fondo hidroquímico natural del acuífero de Doñana (SO España). En: V Congreso Ibérico de Geoquímica. IX Congreso de Geoquímica de España. Soria. 1-13.
- Manzano, M.; Custodio, E.; Mediavilla, C. y Montes, C. (2005b). *Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands / SW Spain*. En: Groundwater intensive use. A. Sahuquillo, J. Capilla, L. Martínez-Cortina y X. Sánchez Vila. International Association of Hydrogeologists, Selected Papers on Hydrogeology, 7. Balkema. ISBN: 0 415 36444 2; 209-219.
- Salvany, J.M y Custodio, E. (1995). Características sedimentológicas de los depósitos pliocuaternarios del Bajo Guadalquivir en el área de Doñana. *Rev. Soc. Geol. España*. 8(1-2): 21-31.
- Sousa Martín, A. (2004). *Evolución de la vegetación hidrofítica y de los humedales continentales asociados en el litoral onubense oriental*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. (2 Vols.).
- Suso, J.M. y Llamas, R. (1990). El impacto de la extracción de aguas subterráneas en el Parque Nacional de Doñana. *Estudios Geológicos*. 46: 317-345.
- Trick, Th. (1998). *Impacto de las extracciones de agua subterránea en Doñana: aplicación de un modelo numérico con consideración de la variabilidad de la recarga*. Tesis doctoral. ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Trick, T. y Custodio, E. (2004). Hydrodynamic characteristics of the western Doñana Region (area of El Abalarío), Huelva, Spain. *Hydrogeology Journal*, 12: 321-335.
- UPC (1999). *Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte-Marismas y su entorno*. Grupo de Hidrología Subterránea (UPC, Barcelona). Realizado para el Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid: 114 + anexos. Informe inédito.

Recibido: diciembre 2007

Aceptado: abril 2008