

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO ELEMENTO BÁSICO DE LA EXISTENCIA DE NUMEROSOS HUMEDALES

Emilio Custodio

Dept. Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña
Gran Capità s/n, Edif. D2, 08034 Barcelona
emilio.custodio@upc.edu

Resumen: Una importante proporción de humedales dependen del aporte de agua subterránea, tanto más cuanto más árido es el clima. Las posibles situaciones varían entre a) aquellas que responden a afloramientos del nivel freático o a situaciones de donde el nivel freático es somero pero asequible a las plantas freatofitas –criptohumedales–, con fluctuaciones entre estacionales claras a casi permanentes, y b) aquellas en que dependen de descargas profundas de acuíferos y que son de poco fluctuantes a casi sin cambios a lo largo del tiempo. En las características no sólo tiene importancia el caudal de agua subterránea aportado sino su composición química y la forma en que la parte de agua no evaporada y la totalidad de las sales contribuidas pueden ser descargadas para así mantener una salinidad constante o moderadamente fluctuante, o bien llegar a situaciones de acumulación y finalmente a la formación de salares. Las extracciones de agua de los acuíferos asociados a los humedales puede suponer cambios notables en su extensión, en la biología y en la salinidad y composición del agua. El agua necesaria para la conservación de los humedales para preservar sus valores naturales y los servicios que proporcionan a la sociedad procede del mismo recurso hídrico subterráneo que el que proporciona el agua que se extrae para usos humanos; por lo tanto se interfieren. Así se requiere una gestión hídrica y territorial a fin de lograr un compromiso y buscar una complementariedad dentro de un acuerdo social, en parte de arriba abajo y en parte y necesariamente de abajo arriba por intervención de los usuarios y la sociedad civil. Todo ello requiere conocimiento, estudios, investigación, observación y normativa.

INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES

Los humedales son rasgos del territorio que se caracterizan por la presencia permanente o temporal de una lámina de agua somera o un nivel freático a poca profundidad que sea accesible por lo menos a parte de la vegetación. Se encuentran en casi todas las regiones del mundo, con superficies desde menos de una hectárea a muchos km². Reciben diversos nombres tales como áreas palustres, pantanos lagunas, tablas, ibones, “aiguamolls”, bofedales (en los altos andinos), ... según sus características y designaciones locales (González–Bernáldez, 1992a). Marisma hace referencia a los humedales costeros. Son lagos si la profundidad es notable y se llega a formar una estratificación del agua, si bien en sus márgenes pueden existir frecuentemente humedales propiamente dichos. Los humedales son más frecuentes en áreas llanas –con un gran desarrollo en las pampas sudamericanas–, en áreas costeras planas y en depresiones del terreno. Son más frecuentes en zonas lluviosas, más si el terreno es de baja permeabilidad, pero también existen en zonas áridas, donde resultan de gran interés e importancia

ecológica y paisajística (García Vera, 1994), depresiones y llanos periféricos, así como también en altiplanos, entre los que son de notoria importancia los existentes en ambientes áridos andinos (Acosta y Custodio, 2008).

Los humedales son en general áreas de gran productividad vegetal y ricos en fauna, con elevada diversidad de especies. Los fondos planos y ligeramente inclinados, fluctuantes entre seco y húmedo, forman playas. Lo más común es que el agua de los humedales sea dulce, pero se puede encontrar agua salina, tanto en áreas costeras como continentales, pudiendo llegar a ser salmueras y con precipitación y depósito de sales en los salares.

Se pueden desarrollar humedales a lo largo de valles fluviales, en las zonas más bajas de cuencas geológicas, en deltas interiores o costeros, allí donde los abanicos aluviales se convierten en llanuras de baja permeabilidad, y en muchas otras situaciones (Cowardin *et al.*, 1979; González–Bernáldez, 1988; Brinson, 1993, ...). Los humedales pueden pasar a lagos y ríos, pueden ser permanentes o fluctuantes, estacional o interanualmente. La fluctuación es una importante carac-

terística ecológica de muchos humedales, incluidos los en relación con las aguas subterráneas, en especial cuando la vegetación ribereña asociada tiene un consumo de agua con notorias variaciones estacionales.

Históricamente los humedales han sido considerados como terrenos baldíos e insalubres –y en ocasiones aún se les considera así– asociados a malaria y otras enfermedades hídricas, resultando una molestia y peligro para el hombre, el que además ha deseado ocuparlas –“sanearlas”– para establecer cultivos y criar ganado, olvidando su importante papel ecológico y como generador de servicios útiles a la sociedad y beneficios económicos, a veces muy notables. El resultado ha sido que desde la antigüedad se los ha ido destruyendo, rellenándolos o drenándolos, con frecuencia con apoyos e incentivos gubernamentales (García Novo *et al.*, 2009). La escasa aceptación social hasta épocas recientes se deriva en parte de antiguas leyendas y mitos, que aún se reflejan en la literatura actual. En muchos países se ha llegado a destruir hasta el 80 % de la superficie primitiva de humedales y en otras se va en este camino, como en áreas tropicales donde se busca además una riqueza maderera que en buena parte es no renovable y que lleva a una seria degradación del territorio.

Muchos humedales son el resultado de procesos geológicos activos de evolución relativamente rápida, y por lo tanto se modifican hacia otros rasgos del territorio a lo largo de siglos y aún de sólo decenios, mientras se crean otros. Influyen notablemente los cambios climáticos, como el máximo glacial hace 18000 años, el paso a un interglacial hace 10000 años –con elevación de 130 m del nivel del mar hasta la posición actual– y los cambios posteriores, como la reciente “pequeña era glacial” desde el siglo XVII a principios del XIX, lo que parece un calentamiento actual, y el posible calentamiento futuro por el aumento antrópico de los gases de efecto invernadero. La evolución en Doñana atribuible al cambio climático histórico ha sido estudiada por Sousa y García Murillo (2005) y Sousa *et al.* (2006; 2009).

La consideración de los humedales ha mejorado notablemente en las últimas décadas, en especial en países desarrollados, como los Estados Unidos de Norteamérica (USA) y la Unión Europea (UE) en las últimas décadas, al irse reconociendo sus valores ecológicos, que en definitiva constituyen un valor económico y social a través de los servicios que proporcionan (Llamas *et al.*, 1992; Barbier *et al.*, 1997; Adams *et al.*, 1991). En España la protección de los humedales, entre otras

disposiciones legales, parte de la Ley de Aguas de 1985, que obliga a las Autoridades del Agua a tenerlos en cuenta y gestionarlos, y ahora es un requisito de la Directiva Marco del Agua europea (DMA, 2000), transpuesta a la legislación española en 2003. Además existen acuerdos internacionales a los que España se ha adherido.

Muchos humedales dependen de la lluvia local que cae sobre su superficie, con aportes acrecentados por la escorrentía de un área mayor alrededor, o se mantienen por crecidas periódicas de ríos que se extienden sobre la llanura aluvial o por las áreas llanas terminales, o por aportaciones de afluentes cuya descarga queda dificultada por la formación de diques laterales a lo largo de un río principal. Los humedales costeros pueden estar asociados a la marea marina, y pueden tener una mayor o menor influencia de aportes hídricos continentales, a veces dominantes en determinadas áreas, como en las actuales marismas de Doñana.

Otros muchos humedales dependen total o parcialmente de la descarga de aguas subterráneas, aunque esta característica no ha sido suficientemente reconocida hasta épocas relativamente recientes. Presentan una gran variedad de formas, circunstancias, salinidades y valores ecológicos. En general son más estables que las que dependen del agua superficial, a veces muy estables, tanto en lo que se refiere a la presencia de agua como a su composición química. En muchas ocasiones son el reducto permanente de vegetación y el refugio de la fauna local en épocas secas, en que los otros humedales se secan. Entre los humedales que dependen del agua subterránea hay que incluir los criptohumedales, es decir áreas en que nunca o sólo ocasionalmente hay agua en superficie, pero en las que el nivel freático es somero y permite una vegetación que puede recibir agua por ascenso capilar o cuyas raíces llegan a esa zona capilar (plantas freatófitas); así complementan el aporte de agua de precipitación almacenada en el suelo con la extracción de agua subterránea en las épocas de déficit hídrico en el suelo. Las relaciones entre la vegetación y el agua en el humedal es en general complejo y hasta épocas recientes no se ha avanzado en su caracterización, tanto determinista como estocástica (Muñoz Reinoso, 2001; Laio *et al.*, 2009; Tamea *et al.*, 2009; Muneepseerakul *et al.*, 2008).

Una de las primeras publicaciones enfocada a los humedales que dependen del agua subterránea es la de Winter y Llamas (1993); el tema fue tratado en detalle en un seminario especializado en Harvard, Massachusetts, organizado por el MIT (Massachusetts Institute of Technology) y

la UCM (Universidad Complutense de Madrid). En lo que se refiere a España, Llamas (1987) publicó una síntesis hidrogeológica y después Montes *et al.* (1995) prepararon guías para la restauración, con un inventario reciente (Montes *et al.*, 2008). Otros inventarios pueden encontrarse en Alonso (1987; 1998) y DGOH (1991) y un reciente estado de la situación general de los humedales en España en García Novo *et al.* (2009).

CONDICIONES DE LOS HUMEDALES QUE DEPENDEN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los humedales que dependen del agua subterránea son áreas de descarga de la misma. En un sistema de flujo regional (Tóth, 1971, 2009; Custodio y Llamas, 1976/1983, González-Bernáldez, 1992) corresponden a flujos locales, intermedios y regionales, progresivamente más estables en caudal y composición química; en determinadas situaciones hidrogeológicas los flujos regionales pueden llegar a ser relativamente mineralizados o

incluso salinos. La Figura 1 es una representación esquemática de humedales de intersección del nivel freático con la superficie del terreno en un área de pendiente suave o grande. Estas áreas de descarga en general son sólo una pequeña parte de la extensión del acuífero y suelen tener forma alargada o localizada, continua o discontinua. Incluso en el fondo de las pequeñas o grandes depresiones, la mayor parte de la descarga de agua subterránea y su accesibilidad para las plantas es a lo largo de franjas ya que la parte central de la depresión suele estar ocupada y confinada frecuentemente por sedimentos de baja permeabilidad, que además pueden contener agua salobre o salina, y que en épocas secas se desecan si no hay suficiente flujo ascensional de agua subterránea para mantener la humedad; si parte de esta descarga se concentra en áreas determinadas aprovechando heterogeneidades del terreno se pueden formar áreas de humedad preferente, incluso descargas de agua identificables (ojos, “ullals”), a veces acompañadas de arenas movedizas.

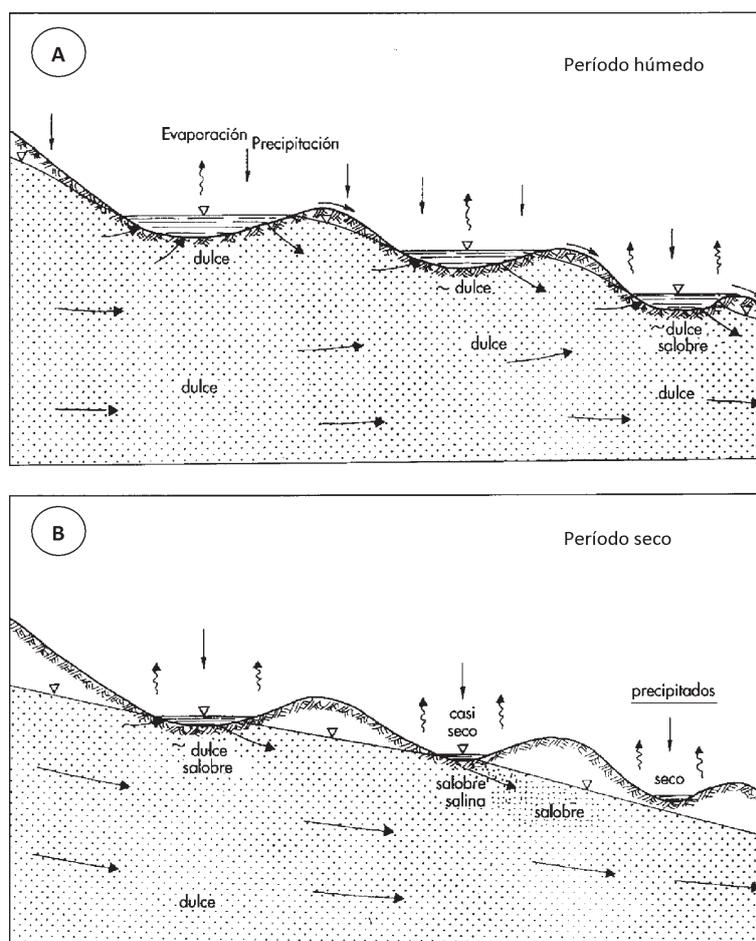


Figura 1. Dibujo esquemático que muestra la formación de una serie de humedales freáticos en terreno en pendiente con alternancia de altos y bajos, en un área que recibe flujo notable desde más arriba

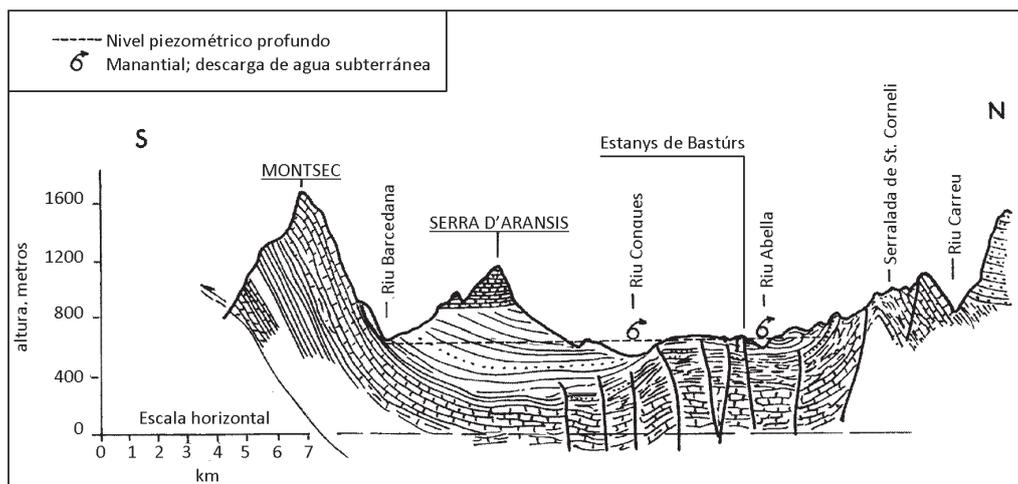


Figura 2. Formación de humedales intermedios. Caso de los Estanys (lagunas) de Basturs, Conca de Tremp, en el centro de Cataluña (Lleida), según Pascual (1992)

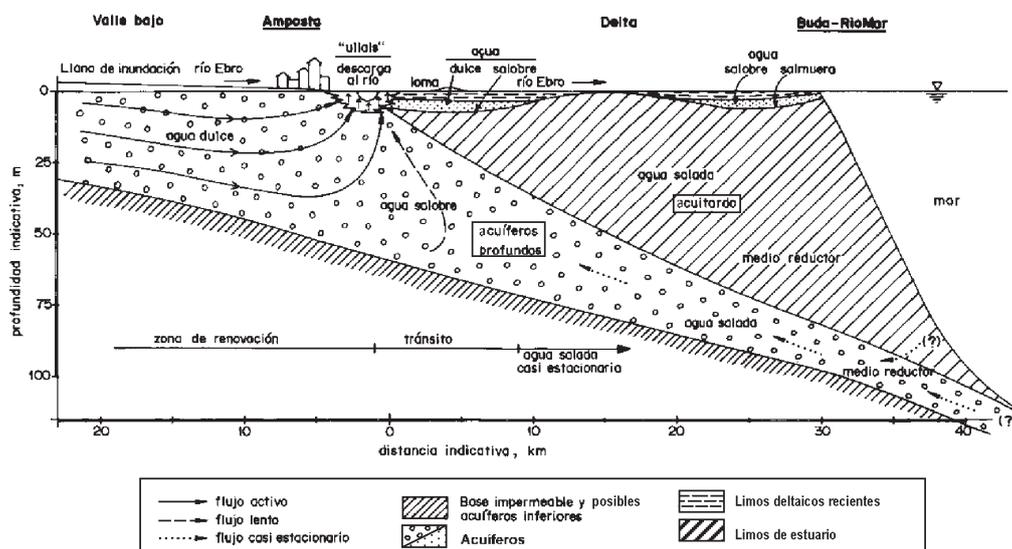


Figura 3. Representación simplificada del flujo del agua subterránea en el bajo Ebro y delta, sur de Cataluña, según Bayó *et al.* (1996)

Si las circunstancias hidrogeológicas son favorables pueden aparecer humedales que dependen del agua subterránea en áreas de interfluvio, ya sea por intersección con el nivel freático en materiales poco o moderadamente permeables, o en lugares en que los acuíferos profundos afloran o pueden descargar por fallas no selladas. Ejemplos son los de Fuentedepiedra, Málaga (ITGE, 1999) y Basturs, cerca de Tremp, Lleida (Pascual, 1992), como muestra la Figura 2. Numerosos humedales se forman donde áreas extensas de acuífero libre pasan lateralmente a cautivo, pues allí se fuerza una descarga continuada, tanto continentalmente (tal es el caso de la periferia del gran acuífero

Guaraní, en Sudamérica) como por la existencia de sedimentos litorales recientes de baja permeabilidad, como esquematiza la Figura 3.

Los humedales alimentados por agua subterránea que dependen de niveles freáticos situados en zonas altas, de cabecera o de llanuras son más fluctuantes que los de zonas bajas. La fluctuación también se aumenta cuando la vegetación del área capaz de utilizar el agua subterránea extrae en unas estaciones un caudal importante de agua (verano), mientras no lo hace en otras (invierno). Este efecto es notorio en el caudal circulante por el Arroyo de La Rocina, en Doñana (Trick, 1998; Custodio *et al.*, 2009).

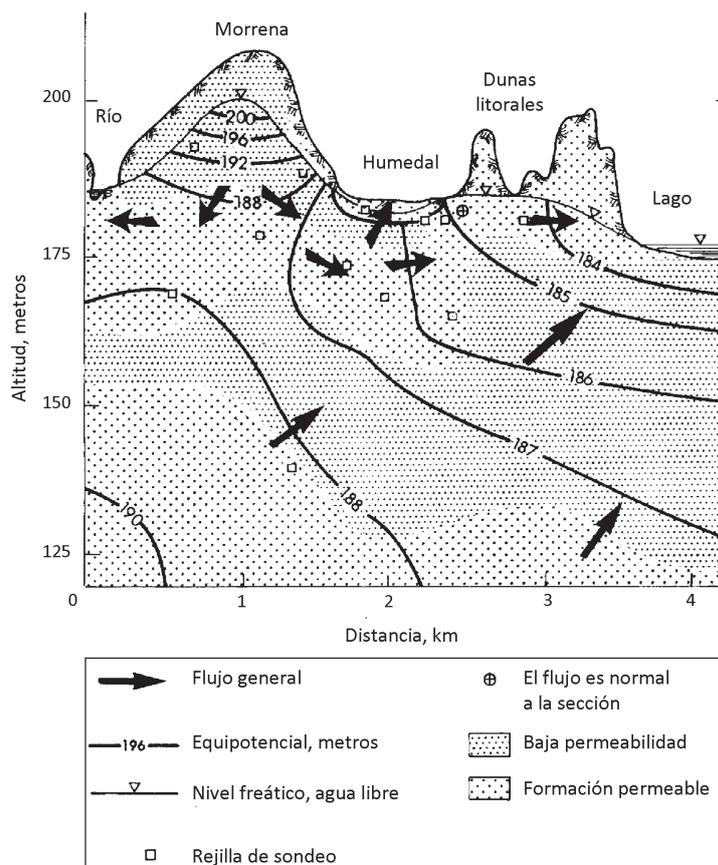


Figura 4. Flujo tridimensional del agua subterránea hacia el lago Michigan por un medio geológico de permeabilidad desde moderada (arenas dunares, depósitos glaciares y basamento) a pequeña (till glacial) (Shedlock *et al.*, 1993)

Las condiciones hidrogeológicas de los humedales que dependen del agua subterránea cambian enormemente de un lugar a otro según el área de recarga y su tasa, caudal de descarga, distribución de la permeabilidad regional y local, tamaño del acuífero, topografía, rasgos sedimentarios locales en el entorno del área de descarga, ... con especial relevancia de las relaciones con las aguas superficiales (Sophocleous, 2002). En todos los casos tiene relevancia –en ocasiones es determinante– el carácter tridimensional, tanto de la permeabilidad, como del flujo del agua subterránea, que determinan junto con la recarga la piezometría (Figura 4); y de las variaciones químicas. Sin su debida consideración es difícil llegar a formar un modelo conceptual, explicar lo que se observa, interpretar los efectos antrópicos y hacer previsiones de evolución que no diverjan en exceso de la realidad. Sin embargo, en la práctica común esto se olvida o se ignora frecuentemente y no se realiza antes un análisis sobre si planteamiento bidimensional en horizontal es suficientemente representativo, no sólo del comportamiento regional sino de los detalles que son necesarios para interpretar la

existencia y dinámica de los humedales. La existencia de formaciones permeables en profundidad puede dominar el flujo, como sucede en el área de El Abalarío, Doñana (Custodio *et al.*, 2009; Manzano y Custodio, 2008). Estas consideraciones resultan aún más necesarias cuando se trata de considerar e interpretar la composición química e isotópica del agua, tanto a nivel regional como en el área próxima al humedal. En este último caso, los depósitos de fondo de laguna y la acumulación de materia orgánica pueden tener efectos hidráulicos y geoquímicos importantes (Álvarez, 2002). No es raro que parezca que los datos químicos e isotópicos ambientales son caóticos, tanto en su distribución espacial como temporal, si no es posible poner en claro los cambios verticales junto a las secuencias de fluctuaciones freáticas que permiten el paso del anegamiento (anaerobismo) a la entrada de aire (aerobismo) en los sedimentos.

Muchos de estos aspectos han sido considerados con cierto detalle en Doñana (Custodio y Palancar, 1995; Iglesias, 1999; de Haro *et al.*, 2000; Llamas 1990; Trick, 1998; Trick y Custodio, 2004), han ido modelados (Castro, 1999;

UPC, 1999) y han sido el objeto de diversos inventarios (Bernués, 1990; Coletto, 2003; Manzano, 2001; Manzano *et al.*, 2002), con consideración del valor ecológico (Manzano y Custodio, 2008). Véanse algunos aspectos en la Figura 5.

La salinidad de los humedales depende de la salinidad del aporte de agua subterránea, además de la de las aguas superficiales que afluyen, con un posible importante efecto de evaporación y de transpiración por la vegetación (se evapora agua pero se quedan las sales), y de cómo las sales aportadas pueden ser evacuadas del humedal (Figura 6). Este último aspecto es importante para el balance salino. Esta evacuación se puede hacer:

- a) como salida de agua superficial, permanente u ocasional en épocas húmedas ordinarias o extraordinarias;
- b) como salida de agua subterránea, permanente o estacional, según la posición relativa del agua del humedal y del nivel freático (Sacks *et al.*, 1992; Novitzki, 1982; Coletto, 2003; Lozano, 2004). Su observación y cuantificación requiere una red de observación bien diseñada, posiblemente 3-D, y correctamente medida, además de estudios de infiltración en la propia laguna (Lee, 1977; Lewis, 1987);
- c) como precipitación o coprecipitación de ciertos solutos del agua al aumentar la salinidad o cambiar las circunstancias de pH y potencial redox. Parte de los precipitados pueden redisolverse después en época húmeda –no se evacuan– pero otros quedan separados del ciclo al ser atrapados en los sedimentos o en la materia orgánica. También se puede producir una evacuación a la atmósfera por volatilización, como es el escape de CO₂, o de N₂ ó de NH₃ procedente de la reducción del NO₃⁻, pero sólo supone un pequeño cambio en la salinidad;
- d) por deflación eólica, que puede ser importante en humedales de zonas áridas (playas, sebhas, salares). Estas sales pueden ser llevadas a áreas lejanas, pero buena parte suele quedar sobre el terreno en áreas más o menos próximas, en cuyo caso serán retomadas por la precipitación e incorporadas a la escorrentía superficial y/o a la recarga. El que vuelvan o no al humedal depende del destino de esos flujos.

Incluso en los casos en que el terreno no contribuya sales solubles, la salinidad del agua subterránea suele ser mayor que la de la escorrentía

superficial local debido a la concentración por evaporación del agua de lluvia infiltrada en el suelo, al aporte de solutos por hidrólisis de minerales (carbonatos, silicatos, ...) por el CO₂ disuelto en el suelo –de origen profundo en ciertas áreas volcánicas– y la capacidad oxidante que aporta el O₂ atmosférico disponible en el agua (oxidación de materia orgánica, sulfuros, ...).

En ciertas áreas la disolución de carbonatos (calizas principalmente y dolomias), y también de yesos, puede producir hundimientos del terreno que pueden llegar a dejar aflorante el nivel freático, produciendo así humedales y áreas lacustres, típicas de muchas áreas (por ejemplo en Yucatan, Florida, entorno de Jaiba en Minas Gerais (Brasil), Ebro central, cuenca media del Ter, ...). En humedales y lagos alimentados por aguas subterráneas que pierden CO₂ (inicialmente incorporado en el suelo al estar éste a mayor presión parcial que la atmosférica) pueden precipitar calcita que forma travertinos; en ocasiones pueden tender a obstruir la descarga del humedal o lago, haciendo que su nivel se eleve, como sucede en las Lagunas de Ruidera, en el alto Guadiana. Es una situación diferente de la que se produce por efectos tectónicos o por depósitos volcánicos o de deslizamientos de ladera, que por obstrucción de valles pueden dar origen, al menos durante cierto tiempo, a humedales y áreas lacustres.

EFFECTOS DE LA EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS SOBRE LOS HUMEDALES

La explotación de los acuíferos supone una modificación de su funcionamiento, en especial si es intensiva, y por tanto hay un efecto sobre los humedales asociados, aunque éste puede aparecer diferido en el tiempo y con una evolución lenta, dependiendo de las circunstancias hidrogeológicas y de la proximidad de las extracciones de agua subterránea a los humedales (Figura 7). El efecto es primariamente en la cantidad del agua –la extensión de humedales disminuye y puede llegar a desaparecer, incluso como criptohumedales, y su variabilidad cambia– pero también en la composición química del agua aportada. Esto ha sido tratado de forma cualitativa (Custodio y Cardoso da Silva, 2008) y también cuantitativamente mediante balances de agua y por modelación numérica. La situación en Doñana se ha tratado con cierto detalle (Manzano *et al.*, 2005; Suso y Llamas; 1990; 1971, 1993; Serrano y Serrano, 1996; Serrano *et al.*, 2008), además de en los trabajos citados anteriormente (Figura 8).

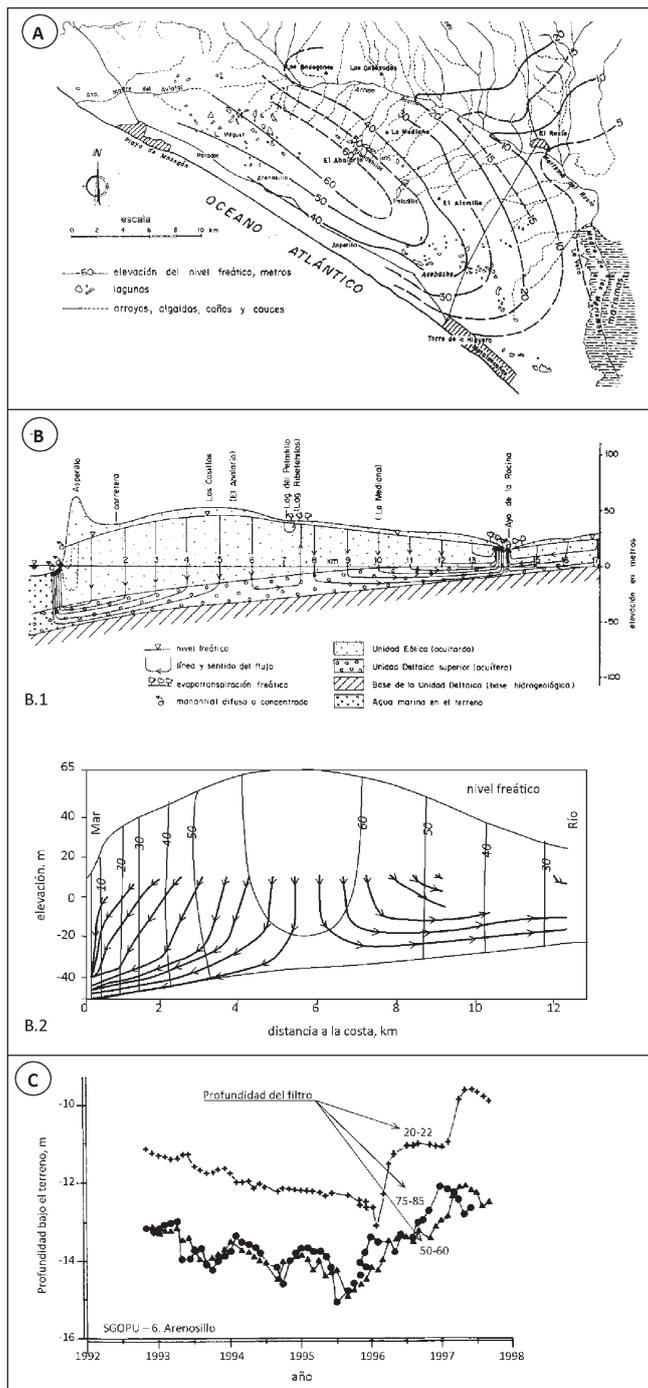


Figura 5. Superficie freática (A) del sector oeste del área de Doñana, que es el área principal de recarga, según datos de campo de principios de la década de 1990, en que ya había influencia de la explotación de agua subterránea de la formación profunda en el entorno de El Rocío y de Mazagón (Moguer) desde diez años antes. El acuífero es un grueso paquete de arenas fluvio-marinas de moderada permeabilidad, con una cubierta eólica que facilita la recarga y una formación profunda más permeable en la que están las rejillas de los pozos. La superficie freática aflora en los bajos interdunares formando un muy numeroso conjunto de lagunas, algunas permanentes y la mayoría temporales. Parte de esas lagunas están actualmente reducidas o desecadas por el efecto que la explotación tiene en el nivel freático. El funcionamiento esquemático se muestra en la sección (B.1) entre el mar y el arroyo de La Rocina, por El Abalarío, que refleja el carácter tridimensional del flujo (datos del autor, reproducidos de Custodio y Palancar, 1995). La modelación numérica (B.2) permite comprobar el esquema (Trick, 1998; Trick y Custodio, 2004). En la figura (C) se muestra esa tridimensionalidad en el comportamiento de un conjunto de piezómetros con filtros a diferentes profundidades

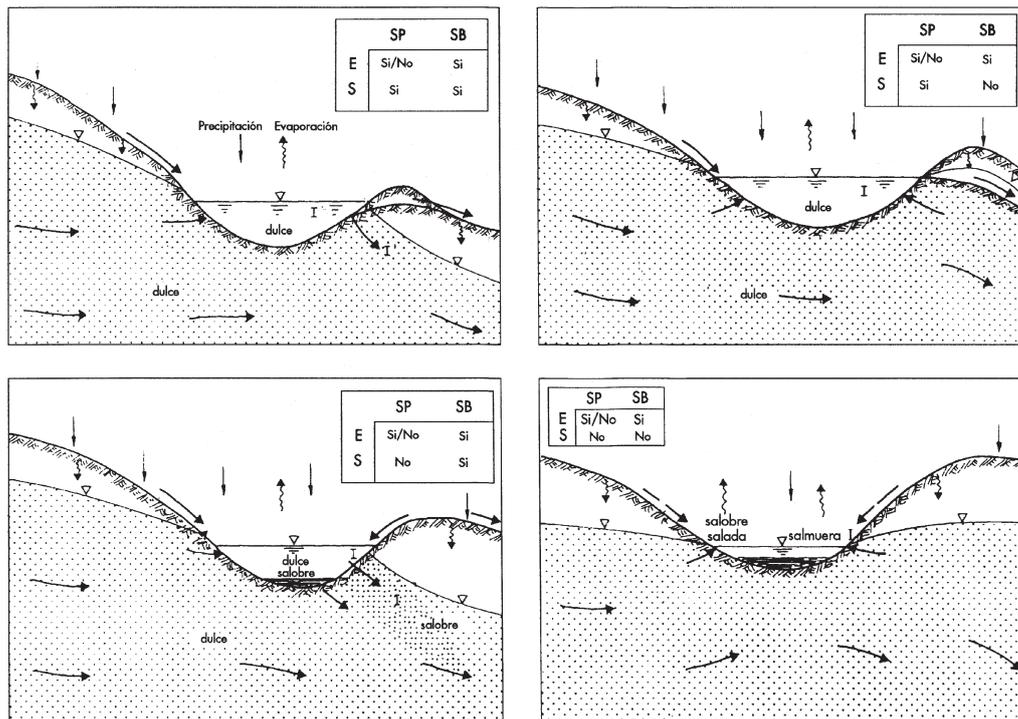


Figura 6. Dibujos esquemáticos que muestran la entrada (E) y descarga (S, salida) de agua superficial (SP) y agua subterránea (SB) en un humedal

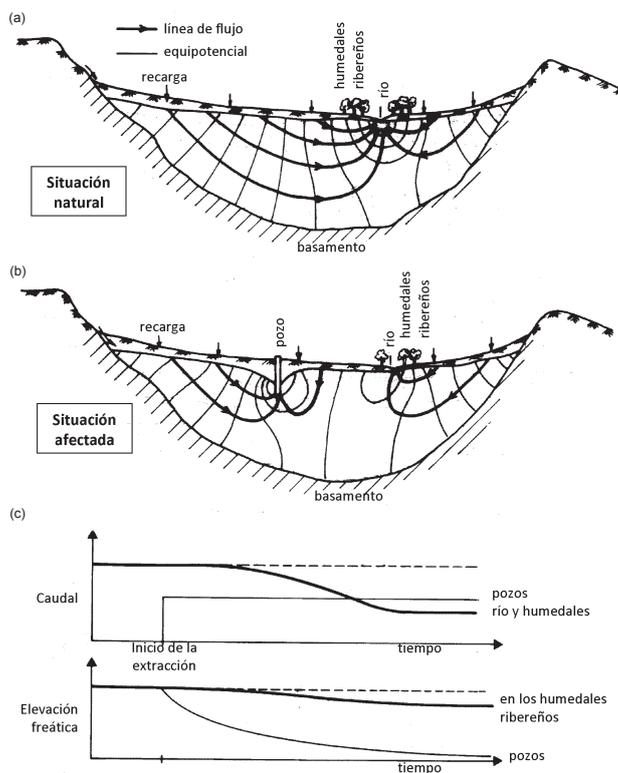


Figura 7. Representación esquemática del efecto de la explotación de agua subterránea en un acuífero que rellena una depresión que descarga en un río con vegetación ribereña que depende del acuífero. (a) Situación natural. (b) Efecto de una extracción de agua subterránea suficientemente intensa para modificar la forma del flujo. (c) Evolución de caudales del río y de extracción, así como de la piezometría

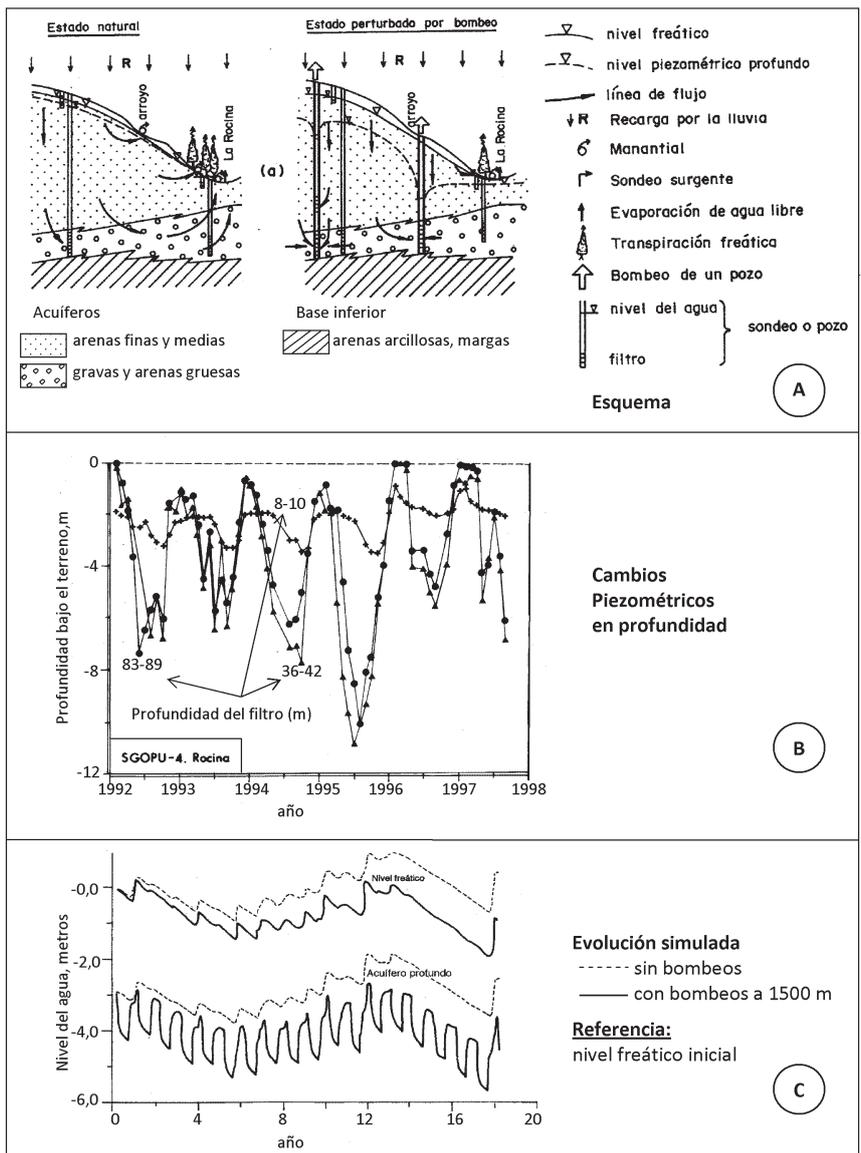


Figura 8. Efecto de la extracción de agua subterránea de la formación profunda más permeable del acuífero en arenas del oeste de Doñana. (a) Representación esquemática. (b) Evolución de niveles en un enjambre de tres piezómetros. (c) Evolución generada por cálculo numérico del nivel freático y de los niveles piezométricos profundos

El impacto de las extracciones en las Tablas de Daimiel (Ciudad Real), en La Mancha, ha llevado a un continuo descenso de niveles, de muy difícil reversibilidad, y a un cese de los aportes de agua subterránea (Figura 9), que ha sido objeto de numerosos estudios (Llamas, 1992) y de muchas actuaciones estatales ya que es un importante humedal del Convenio Ramsar.

El efecto negativo de las extracciones de agua subterránea sobre los humedales es parte de lo que se suele considerar como sobreexplotación, aunque es un concepto hidrológicamente poco definido (Custodio, 1992; 2000). La existencia de los humedales es una fuente de servicios a la socie-

dad, pero también lo es el agua puesta a disposición por explotación de los acuíferos. De ahí que se plantee una competencia, cuya gestión requiere una negociación y acuerdo entre las partes, moderada y puesta en contexto por la Administración del Agua y la Sociedad Civil, y que respete las legislaciones y convenios existentes. No hay soluciones únicas. Así mismo, lo aceptable en un momento puede no serlo en otro, según las valoraciones relativas que se hagan, de cómo se entiendan y consideren los efectos diferidos, y de cómo se valore el futuro (Custodio, 2010), y de la posibilidad de añadir medidas correctoras de muy diversa índole. Existe actualmente una conflicti-

vidad (Llamas, 1988), en parte por no conocerse ni considerarse adecuadamente el sistema acuífero en cada situación a tener en cuenta y sus restricciones (Llamas, 1989). La gestión debería tender a convertir la competencia en una complementariedad, involucrando en la negociación a todas las partes afectadas y dándoles corresponsabilidad.

Además de los efectos de la explotación sobre los humedales en cuanto a la cantidad y la calidad hay que considerar los posibles efectos sobre el terreno, tales como subsidencia o colapsos. La subsidencia es un descenso de la elevación del terreno como resultado de producir o acelerar la compactación de sedimentos al disminuir la presión intersticial del agua. Como va acompañado en general de un descenso freático, no favorece a los humedales que dependen del agua subterránea, pero sí favorece la mayor presencia de humedales de agua superficial al ser más frecuente el encharcamiento general o local (que puede ser más

acentuado en caso de subsidencia diferencial) si no procede a incrementar artificialmente el drenaje del área. Este efecto es muy notorio en muchos lugares, como en el Valle Central de California, en varias áreas de México (Ciudad de México, Guanajuato, Kansas) en cuanto a áreas continentales, y Venecia, Tokio y Bangkok en cuanto a áreas costeras. Hay pocos ejemplos de áreas españolas (Ciudad de Murcia, delta del Llobregat), sin que haya claro efecto sobre humedales dada la fuerte ocupación humana de esas áreas. El aumento de la frecuencia de colapsos del terreno, por similares razones, puede crear nuevos humedales o lagos si el derrumbamiento llega al nivel freático, tal como sucede con los colapsos naturales. Este podría ser el caso del valle central del Ebro, pero la génesis es poco clara ya que a los efectos piezométricos se une el aumento de disolución de sedimentos yesosos por regadío en superficie.

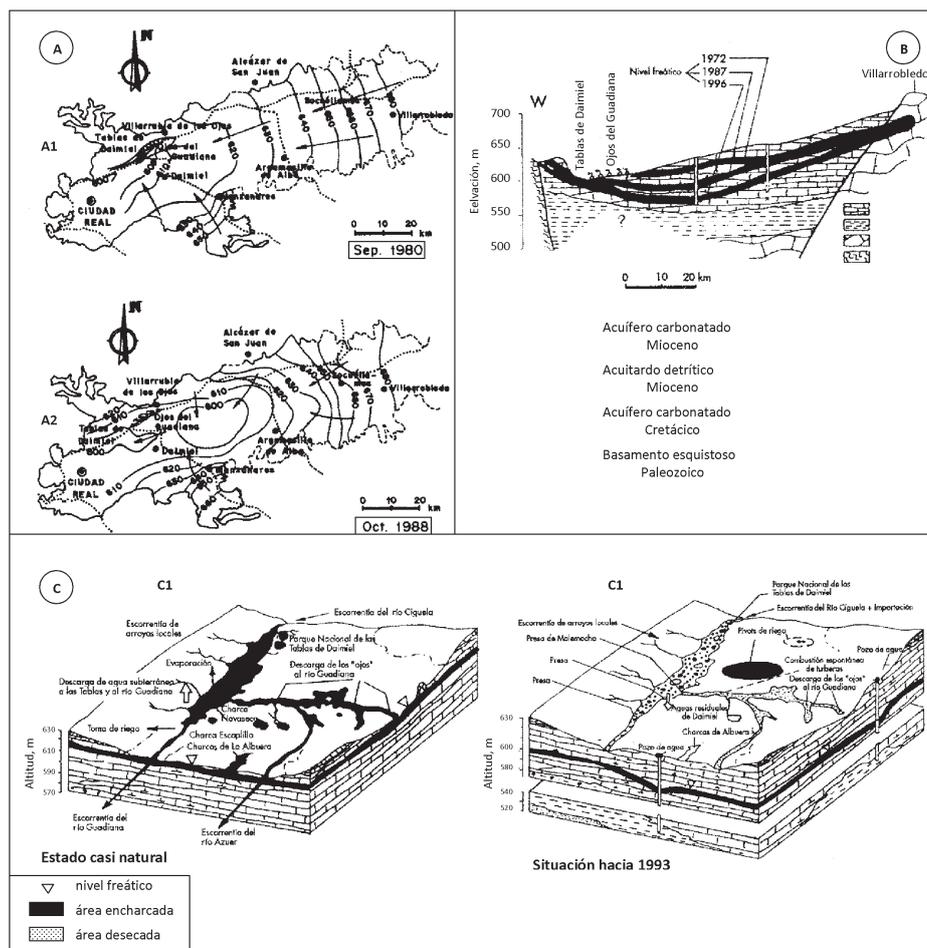


Figura 9. Descenso del aporte de agua subterránea a los humedales de Las Tablas de Daimiel (Ciudad Real) como consecuencia de un explotación intensiva del agua subterránea de los acuíferos subyacentes para riego. Modificado de Llamas (1988)

La escala de tiempo de los cambios tras una perturbación del régimen de un acuífero, y por lo tanto de los efectos sobre los humedales, viene dada para un medio homogéneo por $\tau = L^2S/T$, en la que L es el tamaño del acuífero, S el coeficiente de almacenamiento de agua y T la transmisividad hidráulica. No puede aplicarse a un sistema complejo aunque puede orientar sobre el comportamiento de los sistemas de flujo si se consideran las características globales apropiadas. El valor de τ puede variar desde algunos años hasta milenios.

Desde el punto de vista del humedal, los cambios de calidad son tanto o más importantes que los de cantidad. En general esos cambios de la calidad aparecen incluso más lentamente, a veces mucho más lentamente, que los hidráulicos, en especial cuando suponen desplazamiento de frentes. Algunos de esos cambios son:

1. Modificación de los balances de salinidad y solutos al cambiar la entrada de agua y el área de evaporación y transpiración freática, y también la descarga. En general el agua del humedal evoluciona hacia más salina, pero puede suceder lo contrario.
2. Mineralización de sedimentos de las áreas desecadas por oxidación química o bioquímica al penetrar oxígeno desde la atmósfera por difusión natural, o favorecida si los terrenos están labrados. Esta mineralización puede suponer aumento de la lixiviación de nitratos derivados de la materia orgánica y sulfatos de oxidación de los sulfuros depositados (Higuera *et al.*, 2004; Coleto, 2003), y un aumento de la dureza del agua y de la salinidad si había sales depositadas incluidas en niveles de baja permeabilidad cuando se oxidan se vuelven más permeables.
3. Incorporación de contaminantes antrópicos procedentes de actividades en el entorno (agricultura, ganadería, urbanización) y de agua superficial contaminada. El comportamiento en el humedal de muchos de esos contaminantes o de sus productos de degradación, tales como nitratos, fosfatos, otros nutrientes, plaguicidas, organohalogenados, productos farmacéuticos y cosméticos, . . . , es en general pobremente conocida tanto en su estabilidad como en su transporte y fijación por absorción, precipitación o coprecipitación. Los efectos pueden manifestarse con gran retraso.

En zonas semiáridas con vegetación natural, que en general es muy efectiva en captar casi la totalidad de la precipitación, la muy escasa recarga puede tener una elevada salinidad, de modo que cuando la zona vadosa (medio no saturado) es potente se convierte en un almacén de agua salina, con lenta descargas a posibles acuíferos profundos en los que se diluye si buena parte del flujo procede de otras áreas, como piedemontes y abanicos aluviales razonablemente recargados. La descarga de esos acuíferos profundos puede originar notables humedales, a veces salares. La tala de la vegetación natural para cultivo o pastoreo aumenta notablemente la recarga, que acelera la transferencia de agua salina a los acuíferos inferiores, salinizándolos durante un muy dilatado periodo de tiempo, que pueden ser de siglos, y por lo tanto acabando por afectar a los humedales relacionados. Esta es una situación bien estudiada en la cuenca del río Murray en el Sur de Australia (Barnett, 1984; Simpson y Herczeg, 1991) donde la transformación territorial es de mediados del siglo XX. Posiblemente algo similar sucedió en Monegros hace por lo menos dos o tres siglos, y por eso no hay datos concretos.

Los cambios químicos en un humedal pueden tener efectos significativos sobre la vegetación y la fauna, en especial en cuanto al aumento de nutrientes, por lo menos a corto plazo, aunque pueden llegar con mucho retraso respecto al de penetración en el terreno. El nitrato es poco alterado (Portnoy *et al.*, 1998), salvo que haya condiciones de disminución del potencial redox que permitan su transformación a N_2 , que es gaseoso y poco reactivo. El potasio es diferido por intercambio iónico, y el fósforo puede ser coprecipitado y fuertemente retenido en el suelo, aunque sus circunstancias reales no son bien conocidas. Cuando el nitrato es el único nutriente que llega al humedal o lago, no necesariamente favorece los crecimientos de algas típicas de lagos eutróficos. Así en las Lagunas de Ruidera (Alto Guadiana), a pesar del relativamente alto contenido en nitratos hay escasez de fosfatos por fijación en el terreno, y a eso cabe atribuir la transparencia del agua.

La respuesta de las plantas a la decreciente disponibilidad de agua puede retrasarse en climas semiáridos a causa de su resistencia a las sequías naturales de duración moderada, pero con el descenso freático la duración de los periodos de estrés aumenta y la vegetación acaba por sufrir las consecuencias, pasando a dominar especies más xerofíticas. Tal es el caso en Doñana con la sustitución del "monte negro", que requiere humedad en profundidad, a "monte blanco", adaptado a la va-

riable humedad del suelo que depende sólo de la lluvia local. El descenso freático puede ser seguido por las especies de freatófitas sólo hasta cierta profundidad y si se produce a una velocidad compatible con su capacidad de extender las raíces hacia abajo.

MÉTODOS DE ESTUDIO Y OBSERVACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y HUMEDALES

El estudio y observación de la relación entre las aguas subterráneas y los humedales añaden a los métodos normales las especificidades asociadas al ser el humedal un rasgo localizado dentro del acuífero, en general muy relacionado con el nivel freático y con la superficie. Las variaciones piezométricas y de las características físico-químicas en la vertical pueden ser muy importantes para entender lo que sucede si se busca conocer bien el funcionamiento y las relaciones con las aguas superficiales. Eso exige un aumento de la densidad y tridimensionalidad de la red de observación y muestreo, que pocas veces está disponible y que en general resulta costosa. Por eso en general sólo están disponibles en casos especiales que son objeto de investigaciones o de interés muy particular. Algunas particularidades a considerar son:

1. Las condiciones locales pueden tener un papel dominante sobre los sedimentos en y alrededor del humedal.
2. El intercambio de agua suele hacerse a través de áreas restringidas – en general la periferia– y no la de todo el humedal.
3. El área de recarga del acuífero y las zonas de recarga y descarga del humedal pueden cambiar con las variaciones piezométricas y con la forma y situación de la explotación del agua subterránea.
4. El transporte de solutos puede estar controlado por las heterogeneidades locales.
5. Por lo menos cerca del humedal, el potencial hidráulico y la composición química han de conocerse tanto en el nivel freático como en profundidad.
6. Las redes de observación para niveles y toma de muestras han de diseñarse considerando las características tridimensionales del flujo del agua subterránea, teniendo además en cuenta cómo y dónde se realiza el intercambio de agua entre el acuífero y el humedal.

7. Se requiere conocer adecuadamente la posición del nivel freático y de la franja capilar en el humedal y sus alrededores.
8. Para conocer el transporte de masa hay que determinar los parámetros de transporte, tales como capacidades de adsorción y de intercambio iónico, y evaluar la dispersividad hidrodinámica.
9. Para poder prever y predecir la recarga y posibles problemas de contaminación pueden requerirse áreas piloto para observación y estudio, bien instrumentadas, incluso considerando el efecto de la repelencia de las arenas secas sobre la precipitación, lo que afecta a los mecanismos de recarga.

El conocimiento físico del terreno en el área del humedal generalmente requiere perforaciones y su testificación geofísica, y el apoyo de reconocimientos geofísicos de superficie de forma adecuada para caracterizar el intercambio de agua y de las modificaciones de su composición. Eso requiere penetrar suficientemente en el terreno. Como se trata de actuaciones caras se requiere un buen planteamiento y flexibilidad para introducir modificaciones a medida que progresa el conocimiento.

Como los aspectos químicos son importantes, las perforaciones deben hacerse con el diseño adecuado, en general con varios tubos de filtro corto, bien aislados entre sí y sellados en el espacio anular. Para no alterar el muestreo se puede requerir perforar sin agua y/o sin aditivos, si es posible, pues de otro modo la limpieza puede ser luego larga y difícil, o la perturbación introducida puede persistir mucho tiempo, como muestra la experiencia en Doñana (Custodio y Palancar, 1985; Iglesias, 1999; Lozano, 2004). Los registros de conductividad eléctrica y temperatura de los sondeos de observación pueden ayudar a conocer si las muestras son suficientemente representativas (Custodio, 1995b; 1999).

El detalle requerido en los estudios generalmente requiere combinar técnicas hidrodinámicas con las hidrogeoquímicas e isotópicas ambientales, aplicando los métodos usuales en hidrogeología. El hecho de que el humedal sea un área de evaporación va asociado a modificaciones isotópicas del agua (se hace más pesada y se desvía de la recta del agua meteórica media), las que pueden ser útiles para interpretar los intercambios de agua entre el humedal y el terreno.

La modelación numérica es una poderosa herramienta de estudio, incluso con modelos muy simplificados, pero en este caso los resultados pueden que no deban ser considerados más que como orientativos. El acople de modelos regionales con modelos de detalle en el entorno del humedal no es una tarea sencilla y puede involucrar no linealidades de tratamiento complicado o engorroso. Hay aún poca experiencia de detalle. Muchos trabajos existentes se han hecho en secciones verticales para incluir más fácilmente la tridimensionalidad, pero se requiere un flujo paralelo –en ocasiones radial–, sin componente transversal, que en muchos casos no es lo que sucede realmente. Actualmente se pueden extender estos modelos para considerar transporte de masa (de solutos), incluso solutos reactivos, pero la experiencia es aún limitada. Un uso importante de los modelos es para predecir evoluciones futuras ante cambios en la explotación, como consecuencia de contaminaciones puntuales o distribuidas, y por modificaciones del uso del territorio o climáticas. Sin embargo los modelos calibrados y validados con datos históricos deben irse recalibrando y revalidando, además de afinando, a medida que se tenga nueva información. Pero las previsiones a mayor plazo que el de calibración y validación pueden desviarse en exceso, en cuyo caso sólo se pueden usar cualitativamente, a título indicativo.

En muchos casos la observación de los cambios que se producen no es clara pues está difuminada por las fluctuaciones naturales y las de la propia explotación del acuífero y las modificaciones de uso el territorio. Las tendencias pueden cambiar como consecuencia de la llegada de un año muy húmedo o muy seco, o modificaciones locales. Así, en el caso de Doñana parte de los estudios iniciales se hicieron al final de un periodo predominantemente húmedo, y luego se ampliaron durante un periodo predominantemente seco, con lo que parte de los conceptos iniciales debieron evolucionar. Además los estudios empezaron coincidiendo con el inicio del desarrollo de una explotación intensiva de agua subterránea, sin que hubiera una red de observación suficiente de todas las variables de interés y de la propia explotación, y durante los estudios se decidió erradicar grandes áreas de eucaliptales –una freatófita– dejando el terreno con poca vegetación a la espera de la lenta recuperación de las especies nativas. En este ámbito cambiante los resultados deben modificarse periódicamente y readaptarse, lo que deja una cierta incertidumbre, aunque hay que explicitarla y trabajar con la misma (Custodio *et al.*, 2009).

BREVES CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN

El agua subterránea –y su profundidad y características físico-químicas y químicas– que se requiere para el funcionamiento y para la conservación de los humedales es también un recurso de agua dulce para la demanda humana, y ambos destinos entran en competencia, de modo que se afectan mutuamente, hasta ahora en claro detrimento de los humedales. Una política de conservación y restauración de humedales a ultranza puede llevar a serios problemas con los usos humanos establecidos, y eso requiere gestión (Custodio *et al.*, 2008; 2009), en la que se debe determinar el balance a alcanzar de acuerdo con las prioridades del momento, los derechos razonables existentes y de cómo hay que evolucionar según se modifiquen estas prioridades en un contexto social cambiante. Todo ello ha de hacerse teniendo en cuenta que las aguas subterráneas responden lenta y diferidamente a los cambios en las excitaciones exteriores. Esta es una situación que no se encuadra fácilmente dentro de las consideraciones normales del devenir humano y de la vida política. La gestión debe buscar la complementariedad y el consenso social, para lo cual se requieren actuaciones de arriba abajo, desde las Administraciones del Agua y del Territorio, combinadas con actuaciones de abajo arriba desde los usuarios del agua, los conservacionistas y las instituciones de la sociedad civil. Es algo en lo que aún hay poca experiencia ya que a la legislación, economía y sociología hay que unir la representatividad democrática –en el contexto y forma más adecuada a cada lugar–, la corresponsabilidad y el sentimiento de que se gestiona un patrimonio común. Todo ello requiere un soporte adecuado de conocimiento, estudio, investigación, observación y normativa, no solo referida al agua, sino al ambiente, el territorio y el contexto socio-político, además de una visión ética del problema.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GE) la confianza depositada al encargar esta comunicación general y su exposición como conferencia invitada.

REFERENCIAS

- Acosta, O. y Custodio, E., (2008). Impactos de las extracciones de agua en el Salar del Huasco (norte de Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 119(1), 33–50.

- Adams, P.R. et al., (1981). Wetland evaluation technique: Vol. 1: Literature review and evaluation rationale. U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., (WES TR WRP-DE-2. Oct. 1991).
- Alonso, M., (1987). Clasificación de los complejos palustres españoles. Bases Científicas para la Protección de los Humedales de España. Real Academia de Ciencias, pp 65–78, Madrid.
- Alonso, M., (1998). Las lagunas de la España Peninsular. *Limnética*, 15, 1–176.
- Álvarez, S., (2002). Descomposición de materia orgánica en lagunas someras del Manto Eólico Litoral de Doñana. Tesis doctoral, pp 1–518, Fac. Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid.
- Barbier, E.B., Acreman, M. y Knowler, D., (1997). Economic evaluation of wetlands: a guide for policy makers and planners. Ramsar Convention Bureau, pp1–27, Gland, CH.
- Barnett, S.R., (1984). The management of groundwater induced river salinity due to land clearing in the Murray Basin, southeastern Australia. *Groundwater Management: Quantity and Quality*. Intern. Assoc. Hydrological Sciences, Publ. 199, 101–109.
- Barón, A., Calahorra, P., Custodio, E., Fayas, J.A. y González, C., (1997). Saltwater conditions in Sa Pobla area and S'Albufera Natural Park, NE Mallorca Island, Spain. Proc. XII Salt Water Intrusion Meeting, 1994, pp 243–257, University of Cagliari.
- Bayó, A., Custodio, E. y Loaso, C., (1996). Las aguas subterráneas en el Delta del Ebro. *Revista de Obras Públicas*, 3368, 47–65, Madrid.
- Bernués, M., (1990). Limnología de los sistemas acuáticos del Parque Nacional de Doñana. Tesis doctoral, pp 1–242 + Ap, Fac. Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid.
- Brisson, M.M., (1993). A hydromorphic classification of wetlands. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, Rep WRP-DE-4.
- Castro, A., (1999). Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte-Marismas y su entorno. Tesis de Máster en Hidrología Subterránea, pp 1–134 + Ap, UPC-FCIHS.
- Coletto, M.C., (2003). Funciones hidrológicas y biogeoquímicas de las formaciones palustres hidrogénicas de los mantos eólicos de El Abalario-Doñana (Huelva). Tesis doctoral, Dep. Interuniversitario de Ecología, Universidad Autónoma de Madrid, Canto Blanco, Madrid.
- Cowardin, L.M., Carter, V., Golet, F.C. y La Roe, E.T., (1979). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. U.S. Fish and Wildlife Science, Washington D.C., Publ. FWS/OBS-79/31.
- Custodio, E., (1992). Hydrogeological and hydrochemical aspects of aquifer overexploitation. Selected Papers on Aquifer Overexploitation, International Association of Hydrogeologists, 3, 3–27, Heise, Hannover.
- Custodio, E., (1995). The impact of vertical water flow in boreholes: influence on monitoring operations. *Hydrogéologie*, 3, 3–12 Orléans.
- Custodio, E., (1999). Alteraciones en los registros térmicos por flujo vertical de agua a lo largo de perforaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 110(4), 371–390.
- Custodio, E., (2000). Groundwater-dependent wetlands. *Acta Geologica Hungarica*, 43(2), 173–202.
- Custodio, E., (2001). Aguas subterráneas y humedales. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, Asociación Española de Hidrología Subterránea, XXIV: 3–30, Madrid.
- Custodio, E., (2007). Acuíferos detríticos costeros del litoral mediterráneo peninsular: valle bajo y delta del Llobregat. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. Revista de la Asociación Española de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 15(3), 295–304, Madrid.
- Custodio, E., (2009). Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeology Journal*, DOI: 10.1007/s/10040-009-0496-1.
- Custodio, E., (2010). Aspectos éticos de la denominada crisis del agua. *Implicaciones Éticas en Algunos Debates Científicos*, Instituto de España, pp 91–119, Madrid.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (Eds.), (1976/1983). *Hidrología Subterránea*. 2 Vols. 1–2350, Ediciones Omega, Barcelona.
- Custodio, E. y Palancar, M. (1995). Las aguas subterráneas en Doñana. *Revista de Obras Públicas*, 142 (3340), 31–53, Madrid.
- Custodio, E. y Cardoso, G., (2008). Conceptos básicos sobre o papel ambiental das águas

- subterrâneas e os efeitos da sua exploração. *Boletín Geológico y Minero*, 119(1), 93–106.
- Custodio, E., Manzano, M. y Montes, C., (2008). Perspectiva general del papel y gestión de las aguas subterráneas en el área de Doñana, Sudoeste de España. *Boletín Geológico y Minero*, 119(1), 81–92.
- Custodio, E., Manzano, M. y Montes, C., (2009). Las aguas subterráneas en Doñana: aspectos ecológicos y sociales. Agencia Andaluza del Agua, pp 1–249, Sevilla.
- de Haro, J.M., Giráldez, J.V., Ordóñez, R., Custodio, E., Iglesias, M., Manzano, M. y López, J.J., (2000). Variación temporal de la recarga al acuífero freático del Parque Natural de Doñana, Huelva. *Boletín Geológico y Minero*, 111(1), 77–88.
- Delgado, F., Lozano, E., Manzano, M. y Custodio, E., (2001). Use of environmental isotopes and chemical tracers to characterise the relationships between phreatic and saline freshwater lakes and the aquifer (Doñana, SW Spain). *Proceedings 3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk* (ed. L. Ribeiro), pp 535–547, Lisboa.
- DGOH, (1991). Estudio de las zonas húmedas continentales de España. Informe de INITEC para la Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Madrid.
- DMA, (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas [Diario Oficial L 327 de 22.12.2000].
- García Novo, F., Toja Santillana, J. y Granado-Lorencio, C. (2009). The state of water ecosystems. *Water Policy in Spain*, A. Garrido y M.R. Llamas (Eds.), CRC Press, pp 21–28, London.
- García-Vera, M.A., (1994). Hidrogeología de zonas endorreicas en climas semiáridos: aplicación a los Monegros, Zaragoza. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- González-Bernáldez, F., (1988). Typology of wetlands and evaluation of the resources they represent. *Hydrology of Wetlands in Semiarid and Arid Regions*, Agencia del Medio Ambiente, pp7–36, Sevilla.
- González-Bernáldez, F., (1992a). Los paisajes del agua: terminología popular de los humedales. J.M. Reyero (Ed.), Madrid.
- González-Bernáldez, F., (1992b). Ecological aspects of wetland/groundwater relationships in Spain. *Limnética*, 8, 11–26, Madrid.
- Higuera, H., Manzano, M., Soler, A. y Custodio, E., (2008). Origen y evolución del sulfato en las aguas subterráneas del sector occidental del acuífero de Doñana (SO España). 6a. Asamblea Luso-Española de Geodesia y Geofísica, Instituto Politécnico de Tomar, pp 45–46, Portugal, (en CD).
- Hunt, R.J., Krabbenhoft, D.P. y Anderson, M.P., (1996). Groundwater inflow measurements in wetlands systems. *Water Resources Research*, 32/3, 495–507.
- Iglesias, M., (1999). Caracterización hidrogeológica del flujo del agua subterránea en El Abalario, Doñana, Huelva. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- ITGE, (1988). Hidrogeología de la reserva natural de la Laguna de Fuente de Piedra, Málaga. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- Lee, D.R., (1977). A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnology-Oceanography*, 22, 40–147.
- Laio, F., Tamea, S., Ridolfi, L., D’Odorico, P. y Rodríguez-Iturbe, I., (2009). Ecohydrology of groundwater-dependent ecosystems: 1. Stochastic water table dynamics. *Water Resources Research*, 45, W05419, 1–13.
- Lewis, J.B., (1987). Measurements of groundwater seepage flux onto a coral reef: spatial and temporal variations. *Limnology-Oceanography*, 32, 1165–1169.
- Llamas, M.R., (1987). Bases científicas para la protección de los humedales en España. Real Academia de Ciencias, pp 1–360, Madrid.
- Llamas, M.R., (1988). Conflicts between wetland conservation and groundwater exploitation: two case histories in Spain. *Environmental Geology*, 11/3, 241–251.
- Llamas, M.R., (1989). Groundwater and wetlands: new constraints in groundwater management. *Groundwater Management: Quantity and Quality*. International Association of Hydrological Sciences, 188, 295–304.

- Llamas, M.R., (1990). Geohydrology of the eolian sands of the Doñana National Park (Spain). *Catena Supplement*, 18, 145–154.
- Llamas, M.R., (1992). Wetlands: an important issue in hydrogeology. *Selected Papers on Aquifer Overexploitation. International Association of Hydrogeologists*, 3, 69–86, Heise, Hannover.
- Lozano, E., (2004). Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Lozano, E., Coletto, C., Manzano, M. y Custodio, E., (2002). Saline waters in the coastal area of the National Park of Doñana (SW Spain) in absence of saline water intrusion. *Proceedings 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft University of Technology*, 238–249.
- Manzano, M., (2001). Clasificación de los humedales de Doñana atendiendo a su funcionamiento hidrológico. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XXIV: 57–75, Madrid.
- 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. y Custodio, E., (2005). El acuífero de Doñana y su relación con el medio natural. Doñana. Agua y Biosfera, R. García Novo y C. Marín Cabrera (Eds.), Doñana 2005/Confederación Hidrográfica del Guadalquivir/Ministerio de Medio Ambiente, pp 133–142, Madrid.
- Manzano, M., Custodio, E., Mediavilla, C. y Montes, C. (2005). Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands (SW Spain). *Groundwater Intensive Use*, A. Sahuquillo, J. Capilla, L. Martínez-Cortina y X. Sánchez-Vila (Eds.), *International Association of Hydrogeologists, Selected Papers 7*, pp 209–219, Balkema, Leiden.
- Manzano, M. y Custodio, E. (2008). Las aguas subterráneas en Doñana y su valor ecológico. *Las Aguas Subterráneas. Revista Asociación Española de Enseñanza de Ciencias de la Tierra*, 15(3), 305–316, Madrid.
- Marques da Silva, M., Bayó, A. y Custodio, E., (1989). Perspectivas de la explotación del sistema multiacuífero cretácico de Aveiro (Portugal). *La Sobreexplotación de Acuíferos, Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español/Asociación Española de Hidrología Subterránea*, pp 259–275.
- Montes, C., Oliver, F., Medina, F. y Cobos, J., (1995). Bases ecológicas para la restauración de los humedales en la cuenca mediterránea. *Agencia Andaluza del Medio Ambiente*, pp 1–348, Sevilla.
- Montes, C., Borja, F., Manzano, M. et al., (2008). Inventario y tipificación de los humedales del Manto Eólico Litoral de Doñana. *Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía*.
- Muneepeerakul, Ch.P., Miralles-Wilhelm, F., Temea, S., Rinaldo, A. y Rodríguez-Iturbe, I., (2008). Coupled hydrologic and vegetation dynamics in wetlands ecosystems. *Water Resources Research*, 44, W07421, 1–15.
- Muñoz Reinoso, J.C., (2001). Vegetation changes and groundwater abstraction in SW Doñana, Spain. *Journal of Hydrology*, 242(2001), 197–209.
- Novitzki, R.P., (1982). Hydrology of Wisconsin wetlands. *U.S. Geological Survey/University of Wisconsin, Madison, Info Circular*, 40, 1–22.
- Pascual, M., (1992). Hidrogeología básica de las sierras marginales prepirenaicas de la Provincia de Lleida. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 15, 115–129, Madrid.
- Portnoy, J.W., Nowizki, B.L., Roman, C.T. y Urish, D.W., (1988). The discharge of nitrate-contaminated groundwater from developed shoreline to marsh-fringed estuary. *Water Resources Research*, 34(11), 3095–3104.
- Sacks, L.A., Herman, H.S., Konikow, L.F. y Vela, A., (1992). Seasonal dynamics of groundwater-lake interactions at Doñana National Park, Spain. *Journal of Hydrology*, 136, 123–154.
- Serrano, L. y Serrano, L., (1996). Influence of groundwater exploitation for urban water supply on temporary ponds from Doñana National Parks (SW Spain). *Journal of Environmental Management*, 46, 229–238.
- Serrano, L., Reina, M., Martín, G., Reyes, I., Arechederra, A., León, D., Toja y J. (2006). The aquatic systems of Doñana (SW Spain) watersheds and frontiers. *Limnetica*, 25(1-2), 11–32.

- Simpson, H.J. y Herczeg, A.L., (1991). Salinity and evaporation in the River Murray Basin, Australia. *Journal of Hydrology*, 124, 1–27.
- Shedlock, R.J., Wilcox, D.A., Thompson, T.A. y Cohen, D.A., (1993). Interaction between groundwater and wetlands, southern shore of Lake Michigan, USA. *Journal of Hydrology*, 141(1-4), 127–155.
- Sophocleous, M., (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 52–67.
- Sousa, A. y García Murillo, P., (2005). Historia ecológica y evolución de las lagunas peridunales del Parque Nacional de Doñana. Ministerio de Medio Ambiente, Serie Técnica, pp 1–169.
- Sousa, A., García-Barrón, L., Morales, J. y García Murillo, P., (2006). Post-little Ice Age warming and desiccation of the continental wetlands of the aeolian sheet in the Huelva region (SW Spain). *Limnetica*, 25(1-2), 57–70.
- Sousa, A., García Murillo, P. y García-Barrón, L., (2009). Anthropogenic and natural effects on the coastal lagoons in the southwest of Spain (Doñana National Park). *ICES Journal of Marine Science*, 66, 1508–1514.
- Suso, J.M. y Llamas, M.R., (1990). El impacto de la extracción de aguas subterráneas en el Parque Nacional de Doñana. *Estudios Geológicos*, 46, 317–345.
- Suso, J.M. y Llamas, M.R., (1991). Estudio hidrogeológico de la influencia de los bombeos en la zona de El Rocío. *Estudios Geológicos*, 46, 317–345.
- Suso, J.M. y Llamas, M.R. (1993). Influence of groundwater development of the Doñana National Park ecosystems (Spain). *Journal of Hydrology*, 141(1-4), 239–270.
- Tamea, S., Laio, F., Ridolfi, L., D’Odorico, P. y Rodríguez-Iturbe, I., (2009). Ecohydrology of groundwater - dependent ecosystems: 2. Stochastic soil moisture dynamics. *Water Resources Research*, 45, W05420, 1–13.
- Tóth, J., (1971). Groundwater discharge: a common generator of diverse geologic and morphologic phenomena. *Bulletin International Association of Scientific Hydrology*, 16, 7–24.
- Tóth, J., (2009). Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization. Cambridge University Press, Cambridge, pp 1–297.
- 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, Universitat Politècnica de Catalunya, pp 1–277 + Ap.
- Trick, Th. 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 Geomínero de España, Madrid, pp 114 + Ap., Informe inédito.
- Winter, T.C. y Llamas, M.R. (Eds.) (1993). Hydrogeology of wetlands. *Journal of Hydrology*, 141(1-4), 1–271.