

Metodología de tipificación hidrológica de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional y a su gestión. Aplicación a los humedales de Doñana

M. Manzano⁽¹⁾, F. Borja⁽²⁾ y C. Montes⁽³⁾

(1) Universidad Politécnica de Cartagena, EUI Técnica Civil, Dpto. de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Pº de Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena, Murcia
E-mail: marisol.manzano@upct.es

(2) Universidad de Huelva, Fac. de Ciencias Experimentales, Dpto. de Geografía. Avda. de las Fuerzas Armadas s/n, 21007 Huelva

(3) Universidad Autónoma de Madrid, Fac. de Ciencias, Dpto. de Ecología. Campus de Cantoblanco, 28049 Madrid

RESUMEN

En los últimos quince años se ha ido perfilando una metodología de clasificación de humedales basada en la caracterización hidrogeomorfológica de los mismos como herramienta para la valoración de las funciones, los bienes y los servicios de estos ecosistemas. Entre otros pasos previos a esta clasificación es necesario establecer la tipificación hidrológica de los humedales. Se presenta aquí un método de tipificación hidrológica de los humedales españoles basado en los factores hidrológicos dominantes y una aplicación simplificada del mismo a los humedales del área de Doñana. Los factores hidrológicos esenciales de la tipificación son: el origen del agua, el modo de vaciado, el hidroperiodo y la tasa de renovación; de forma complementaria se usan la hidroquímica y la hidrodinámica. En Doñana, los humedales ubicados sobre áreas de recarga al acuífero se han tipificado como: 1) hipogénicos temporales estacionales, 2) hipogénicos permanentes fluctuantes, 3) epigénicos temporales estacionales o esporádicos y 4) mixtos temporales estacionales o esporádicos. Los humedales ubicados sobre zonas de descarga del acuífero son: 1) hipogénicos permanentes fluctuantes, 2) hipogénicos temporales estacionales y 3) epigénicos o mixtos temporales estacionales. Finalmente, los humedales de la marisma son: 1) epigénicos temporales estacionales, 2) epigénicos costeros mareales y 3) hipogénicos permanentes fluctuantes. Se indican también las facies hidroquímicas representativas de las aguas de cada grupo de humedales. Adicionalmente, se describen los principales tipos de afecciones que modifican actualmente el funcionamiento natural de estos humedales y se sugieren las prioridades de actuación para su posible restauración hídrica (cantidad y calidad).

Palabras clave: afecciones, clasificación funcional, epigénico, gestión, hidroperiodo, hipogénico, tipo hidrológico

A methodology for the hydrological classification of the Spanish wetlands as a basis for their functional evaluation and management. Application to the Doñana wetlands

ABSTRACT

Based on wetlands hydrogeomorphic characterisation a methodology to assess the functional evaluation of wetlands has been developed during the last fifteen years. It points to the main role of hydrological and geomorphic functions, services and values on wetland classification and management. Among others, a main previous step is the hydrological classification of wetlands. A methodology for the hydrological classification of Spanish wetlands based on the dominant hydrological factors is introduced, and an application to the Doñana wetlands is presented. The main hydrological factors to be used for this classification are the water source type, the way of water draining, the hydroperiod and the renovation rate. Complementarily water chemistry and hydrodynamics inside the wetland are also taken into account. Wetlands on the recharge area of the Doñana aquifer are of four hydrologic types: 1) hypogenic permanent fluctuant, 2) hypogenic temporal seasonal, 3) epigenic temporal seasonal or erratic, and 4) mixed temporal seasonal or erratic. Wetlands on the aquifer discharge area are either 1) hypogenic permanent fluctuant, 2) hypogenic temporal seasonal, 3) epigenic temporal seasonal or 4) mixed temporal seasonal. Finally, wetlands on the Doñana marshes are either 1) hypogenic permanent fluctuant, 2) epigenic coastal tidal or 3) epigenic temporal seasonal. The main threats affecting these wetlands are described, and priorities related to an eventual hydrological restoration programme are suggested.

Key words: epigenic, hydrological type, hypogenic, hydroperiod, impacts, management, functional classification

Introducción

En el pasado, incluso reciente, los humedales se consideraban terrenos baldíos e insalubres, fuente de innumerables enfermedades y por tanto algo a eliminar y reconvertir para su aprovechamiento, generalmente para la agricultura o la expansión urbana. En la actualidad la preocupación medioambiental, especialmente en los países de Norteamérica y Europa, ha llevado a reconocer el valor tanto intrínseco (las llamadas "funciones") como añadido (los llamados "bienes" y "servicios") que los humedales aportan a la sociedad y a desear protegerlos como un medio de salvaguardar la salud de la propia naturaleza, la cual condiciona directamente la calidad de vida del ser humano.

Durante los últimos quince años el estudio de los humedales con vistas a su mejor gestión y conservación tiende a centrarse en el análisis del origen, la estructura y el funcionamiento de los mismos. El objetivo es conseguir un buen conocimiento acerca de la génesis y de las funciones (geomorfológicas, hidrológicas y ecológicas) de estos ecosistemas, así como del dominio relativo de unos aspectos sobre otros en cada caso (Carter *et al.*, 1979; Novitzki, 1979 y 1989; Zoltai y Pollent, 1983). De entre todos los factores a considerar, los hidrológicos son los que definen las líneas generales del carácter y el funcionamiento del humedal (Carter, 1996; Winter, 1999; Winter y Woo, 1988; Novitzki, 1989; Gosselink y Turner, 1987; Llamas, 1988, 1992; Custodio, 1995, 2000).

La conceptualización y terminología propia del método de valoración funcional de humedales ha quedado definitivamente establecida en un par de trabajos recientes de la US EPA que recogen las ideas aparecidas en años anteriores en varios documentos parciales (Brinson, 1993; Smith y Wakeley, 2001). Siguiendo estos trabajos, las funciones son los procesos bio-físicos que ocurren en los humedales, tales como ser hábitat de flora y fauna, ser trampas de nutrientes, reciclar el carbono, almacenar agua, etc., mientras que los servicios son los beneficios que para la sociedad se derivan de esas funciones, por ejemplo depurar el agua, favorecer la abundancia de caza y pesca, atemperar el clima, generar reservas hídricas, actuar de banco genético, generar ingresos para las poblaciones del entorno y de aguas abajo (turismo, explotación controlada de recursos), etc. Por último, los valores corresponden a la valoración, mediante índices o sistemas de puntuación más o menos complejos, de los servicios que los humedales ofrecen gratuitamente a la sociedad (muchos de los cuales habría que pagar por obtener de no existir los hume-

dales). Los servicios que ofrece cada humedal en estudio se evalúan por comparación con humedales tipo o de referencia (deben ser humedales reales de la zona/país en estudio) elegidos previamente para cada tipo genético-funcional de humedal.

Las políticas medioambientales actuales de países de América del Norte y de la Unión Europea tienden cada vez más a proteger los humedales para poder seguir disfrutando de estos beneficios.

Necesidad de clasificar los humedales

Hoy en día se entiende que para proteger y/o gestionar eficazmente un humedal es necesario estudiar su origen y su comportamiento, así como relacionar ambos aspectos con los de otros humedales. Esto implica necesariamente una ordenación sistemática de los mismos, es decir una clasificación. Los métodos de clasificación de humedales han ido diversificándose con el paso del tiempo, y actualmente existen propuestas que van desde las basadas fundamentalmente en la estricta ubicación geográfica del humedal (costeros, de montaña, ribereños, fluviales...), hasta las que se centran en los aspectos genético-funcionales de los mismos.

Las clasificaciones genético-funcionales de los humedales requieren necesariamente su conceptualización como ecosistemas, para lo cual es necesario considerar tanto las características y relaciones de dependencia existentes entre sus componentes ("estructura") como los rasgos y las magnitudes de su dinámica y su evolución ("funcionamiento"). Esto supone una aproximación ecosistémica (Montes *et al.*, 1998) o integral al análisis de la variedad de humedales según su origen y su comportamiento. Este tipo de clasificación es de los más usados actualmente en varios países de América del Norte y Europa.

Entre los métodos de clasificación de carácter genético-funcional destacan aquellos que se basan en la combinación de las características hidrológicas (modo de alimentación y de vaciado, patrones de inundación...) y geomorfológicas (sistema morfogenético, procesos morfodinámicos, modelado y medidas de la cubeta, formaciones superficiales asociadas...) del humedal, incluyendo sus relaciones con las cuencas superficiales y los acuíferos de referencia (flujos superficiales y subterráneos, cantidad y calidad de las aguas...). Cuando esta clasificación, llamada hidrogeomorfológica, se combina con un análisis de las funciones hidrológicas, geomorfológicas, etc., de cada humedal y de la estructura jerárquica de las mismas, así como de sus posibles afecciones, se

obtiene una herramienta muy valiosa de apoyo en la gestión del mismo.

Utilizando esta metodología, en 1995-96, y en el marco de un estudio técnico realizado para el Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente a través de la empresa INIMA (MOPTMA, 1996), se realizó una propuesta de clasificación genético-funcional de los humedales españoles. Este estudio fue continuación y actualización del primer inventario nacional de humedales de la España peninsular (INITEC, 1990), en el cual se introdujeron ya los fundamentos de la tipificación de humedales antes mencionada. Estos documentos sentaron las bases para la clasificación genético-funcional de humedales que está siendo utilizada en los planes estratégicos de humedales que actualmente preparan varias comunidades autónomas de nuestro país.

Para establecer una clasificación genético-funcional de carácter hidro-geomorfológico de los humedales se requiere una primera tipificación de los mismos tanto desde el punto de vista geomorfológico como hidrológico. En lo que respecta a la tipificación geomorfológica, para Andalucía y para el litoral de Huelva se han llevado a cabo ya algunas propuestas (Borja *et al.*, 1997; Borja *et al.*, 2000; Borja y Borja, 2002). En cuanto a la tipificación hidrológica, hay antecedentes para los humedales del área de Doñana (Manzano, 1999, 2001 y 2002) y, más recientemente, para los de toda Andalucía (CMAJA, 2002).

Los pasos a seguir para la tipificación hidrológica (aplicables también a la geomorfológica) útil para la gestión son: 1) estudiar la hidrología del humedal, 2) tipificarlo, 3) elegir humedales de referencia para cada tipo hidrológico y establecer sus funciones y valores (hidrológicos) característicos, 4) evaluar las funciones y valores de todos los humedales con relación a sus respectivos humedales de referencia y 5) establecer prioridades para la gestión, la conservación y/o la restauración.

Metodología de tipificación hidrológica de humedales

La integración de las funciones hidrológicas permite clasificar cada humedal atendiendo a cuáles son los procesos dominantes y cuál es la variabilidad temporal y espacial de los mismos. Dicha tipificación es un intento de sistematizar e integrar observaciones realizadas a menudo en el pasado de forma inconexa e independiente, y de las cuales habitualmente no se extraía ninguna información relevante para la gestión del humedal en cuestión (Llamas, 1987, 1988; Montes *et al.*, 1992; Winter y Llamas, 1993).

Con base en esta filosofía, el método de clasificación hidrológica de los humedales españoles (recientemente revisado y utilizado para la confección del Plan Andaluz de Humedales; CMAJA, 2002) consiste en describir la hidrología del humedal mediante cuatro factores principales (origen del agua, modo de vaciado, hidroperiodo y tasa de renovación) y dos factores complementarios (hidroquímica e hidrodinámica). En función de la variabilidad existente de los cuatro factores principales se tienen los siguientes tipos hidrológicos de humedales:

1- Origen del agua: si el origen dominante es superficial (lluvia local; escorrentía de la precipitación que cae en una superficie mayor a la de la cubeta; flujos vadosos locales; ríos, arroyos, desbordamiento de cauces durante crecidas; nieve, hielo, niebla,..) los humedales se llaman epigénicos. Si el origen dominante del agua es subterráneo los humedales se llaman hipogénicos; si ambos orígenes contribuyen de forma significativa, aún en distinta proporción, los humedales se llaman mixtos.

2- Modo de vaciado: puede ser por escorrentía superficial, infiltración o evaporación. Si el modo de vaciado dominante es el flujo de agua (ya sea como escorrentía superficial o como infiltración al acuífero) éste se denomina abierto. Si el modo dominante de vaciado es la evaporación y/o la evapotranspiración éste se denomina cerrado. En aquellos humedales en los que ninguno de los dos modos de vaciado domina claramente este se denomina mixto.

3- Hidroperiodo: se refiere a la frecuencia y permanencia de la inundación o de la saturación del suelo (para el caso de los criptohumedales). Se proponen cinco clases de humedales: permanentes no fluctuantes (son los manejados antrópicamente o influenciados), permanentes fluctuantes, temporales estacionales, temporales erráticos y mareales.

4- Tasa de renovación de agua y sales en la cubeta: se establecen tres clases, alta, media o baja. La tasa de renovación de cada humedal se define usando criterios cuantitativos y por comparación con los valores de referencia característicos de cada una de las tres clases establecidas. Estos valores están aún por establecer definitivamente en los documentos antes mencionados, pero probablemente consistirán en porcentajes de renovación respecto al volumen anual medio de agua y masa de sales contenidos en la cubeta. Establecer la tasa de renovación de un humedal requiere la cuantificación de los distintos componentes del balance de agua y sales del mismo, tarea laborio-

sa que suele requerir varios ciclos anuales de observación.

Los dos factores hidrológicos complementarios se definen así:

5- Composición química del agua: consiste en establecer la salinidad y el tipo hidroquímico característico y su variabilidad temporal y espacial en la cubeta.

6- Hidrodinámica: consiste en establecer la configuración de los flujos dominantes en el seno de la cubeta -horizontales, verticales- y entre ésta y el terreno -flujos verticales y horizontales hacia la cubeta desde terreno o viceversa-. La hidrodinámica es responsable de muchas características ecológicas del humedal.

La tipificación hidrológica propuesta consiste en describir, como mínimo, el modo de ocurrencia de los cuatro factores principales en cada humedal. Además cuando se disponga de información acerca de los dos factores complementarios ésta se incluirá también en la descripción del tipo hidrológico. Esta descripción puede realizarse con distintos niveles de detalle en función del conocimiento disponible o del nivel deseado, y puede irse completando en el tiempo -sin variar el tipo hidrológico básico del humedal- conforme se vaya disponiendo de más información hidrológica. En la tabla 1 puede verse una descripción esquemática del método de tipificación y en la tabla 2 un ejemplo de tipificación de dos humedales distintos y con dos niveles de detalle.

Tipificación hidrológica de los humedales de Doñana

A continuación se aplica esta metodología de tipificación hidrológica a los humedales del área de Doñana. Lo que se presenta aquí combina únicamente información relativa a los factores principales Origen del agua e Hidroperíodo y al factor complementario Hidroquímica. Ello está condicionado por el conocimiento disponible de la zona a escala regional. Actualmente se llevan a cabo estudios de detalle de varios humedales concretos con el fin de completar su conocimiento y tipología.

Marco hidrogeológico

El sistema acuífero de Doñana (Fig. 1), también llamado acuífero Almonte-Marismas, está formado por sedimentos detríticos plio-cuaternarios depositados sobre un potente nivel (>2000 m) de margas azules del Mioceno. En términos generales el conjunto detri-

tico se compone sucesivamente de (IGME, 1983 y 1992; Salvany y Custodio, 1995):

- limos y arenas del Plioceno; de ambiente deltaico y espesores desde pocos metros -sector O, El Abalarío- hasta un centenar -sector N, Villamanrique-
- arenas y gravas cuaternarias; de ambiente fluvial y espesores entre unas decenas y un centenar de metros; aparecen únicamente bajo la marisma
- arcillas cuaternarias de estuario y marisma; aparecen sólo en el sector SE del acuífero, con espesores entre unos pocos y 60-70 metros y
- arenas eólicas; aparecen en toda la franja litoral y en el sector occidental o de El Abalarío y se extienden hasta el arroyo de La Rocina, con espesores de hasta 30-40 metros.

En el caso de Doñana no se puede hablar de un acuífero sino de un sistema acuífero, ya que las arcillas de estuario y marisma, de edad entre pleistocena y holocena (Zazo *et al.*, 1999), forman parte del conjunto. Las arcillas de Doñana contienen agua salina y salada en los poros y, desde el momento de su formación hasta la actualidad, ese agua se ha desplazado fundamentalmente mediante flujos verticales ascendentes hacia la superficie de la marisma (Rodríguez-Arévalo, 1988; Konikow y Rodríguez-Arévalo, 1993).

El sistema acuífero se recarga por el agua de lluvia allí donde afloran las arenas y limos arenosos, es decir en toda la superficie no cubierta por la marisma.

La parte superior de las arenas y limos arenosos aflorantes contiene el nivel freático, aunque a mayor profundidad -claramente, al menos, en el área de El Abalarío- aparecen niveles semiconfinados que tienen distintos niveles piezométricos. Los limos arenosos, arenas y gravas situados bajo las arcillas de marisma están confinados por éstas (Custodio y Palancar, 1995; Trick, 1998; Manzano *et al.*, 2001). La piezometría regional del sistema acuífero de Doñana se adapta con bastante fidelidad a la topografía del terreno, destacando el característico domo de El Abalarío, al O de la marisma.

La descarga del sistema acuífero tiene lugar de forma natural hacia el mar a lo largo de toda la franja costera, hacia arroyos como La Rocina, El Partido, Cañada Mayor, Río Loro (o Río Oro), ríos como Guadiamar (en su tramo bajo) y Tinto y también a lo largo de los contornos N y O de la marisma, mediante flujos verticales ascendentes y mediante la evapotranspiración de la vegetación. Hoy en día una buena parte de la descarga tiene lugar en forma de bombeos (Fig. 2).

Nivel de clasificación		1	2	3
A) ORIGEN DEL AGUA	* Epigénicos (domina origen superficial)		* Agua meteórica (lluvia, nieve/hielo, niebla); escorrentía y flujos vadosos; agua de mar; mixto	
	* Hipogénicos (domina origen si)		* De acuífero libre * De acuífero confinado * Mixto	* Flujos locales; flujos regionales * Flujos regionales; subregionales; mezcla * Indicar flujos dominantes
	* Mixtos (sin dominio claro de uno u otro)		* Aportes superficiales y subterráneos	* Indicar proceso dominante * Indicar longitud flujos
B) MODOS DE DRENAJE	* Abierto		* Escorrentía superficial * Infiltración	* Río, arroyo, manantial, recarga de acuífero libre,...
	* Cerrado	—————>		* Domina: evaporación / evapotranspiración
	* Mixto (sin dominio claro de uno u otro)	—————>		* Indicar procesos
	* Aprovechamiento humano	—————>		* Indicar modo: bombeo, drenaje, cultivo,...
C) HIDROPERIODO (duración y frecuencia de la inundación)	* Permanentes no fluctuantes * Permanentes fluctuantes		* Intervenido: indicar tipo de intervención * Indicar causa de fluctuación	* Indicar rango de fluctuación
	* Temporales estacionales * Temporales erráticos		* Indicar periodicidad * Indicar periodicidad	* Indicar rango de fluctuación * Indicar rango de fluctuación
	* Mareales	—————>	* Micromareales * Mesomareales * Macromareales	* Indicar detalles adicionales * Indicar detalles adicionales * Indicar detalles adicionales
	D) TASA DE RENOVACIÓN (balance de agua y sales)	* Alta * Media * Baja	—————>	
Información complementaria a añadir (si está disponible):				
E) COMPOSICIÓN QUÍMICA DOMINANTE DEL AGUA (y su variabilidad espacial/temporal)				
F) HIDRODINÁMICA (configuración de los flujos en la cubeta y entre ésta y el terreno)				

Tabla 1. Esquema simplificado de la metodología de tipificación hidrológica de humedales. El tipo hidrológico de un humedal se obtiene combinando las características descriptivas de los factores A, B, C y D con el nivel de detalle deseado (1, 2 ó 3) o de conocimiento disponible, y añadiendo la información disponible sobre los factores E y F (modificado de CMAJA, 2002)

Table 1. Simplified scheme of the proposed methodology for the hydrological classification of wetlands. A wetland hydrological type is obtained by combining the descriptive characteristics of factors A, B, C and D, with the different levels of detail 1, 2 or 3 (as desired), and then adding the information available about factors E and F (after CMAJA, 2002, modified)

<p>a) Ejemplo de clasificación básica (nivel 1) para dos humedales distintos:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Turbera de montaña: <ul style="list-style-type: none"> - Epigénico de drenaje cerrado, temporal estacional con tasa de renovación muy baja * Laguna litoral (con régimen natural): <ul style="list-style-type: none"> - Mixto de drenaje abierto, permanente no fluctuante con tasa de renovación alta <p>b) Ejemplo de clasificación más avanzada (nivel 3) para los mismos humedales:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Turbera de montaña: <ul style="list-style-type: none"> - A) Epigénico mixto: agua meteórica + escorrentía local y regional Drenaje cerrado: domina evapotranspiración - B) Temporal estacional con rango de fluctuación centimétrico Tasa de renovación baja: renovación anual ≤ 10 % - C) Agua de tipo HCO₃-Ca - D) Flujos internos escasos y horizontales; sin intercambio de agua con el terreno * Laguna litoral (con régimen natural): <ul style="list-style-type: none"> - A) Mixto: escorrentía superficial + agua subterránea (acuífero regional) + agua de mar Drenaje abierto en superficie: salida al mar; muy eventualmente (aguas altas) recarga acuífero circundante - B) Permanente muy fluctuante con influencia micromareal Tasa de renovación alta: renovación anual ≥ 50% - C) Agua tipo Cl-Na con variación espacial de salinidad entre 25 y 80 % - D) Dominan flujos horizontales pero también hay verticales

Tabla 2. Ejemplo del uso del método de tipificación hidrológica con dos niveles distintos de detalle para una turbera de montaña y una laguna litoral (modificado de CMAJA, 2002)

Table 2. Example of application of the proposed methodology to two different wetlands, a peat-swamp and a coastal lagoon, with two different levels of detail (level 1 is the simplest one, level 3 is the richest one) (after CMAJA, 2002, modified)

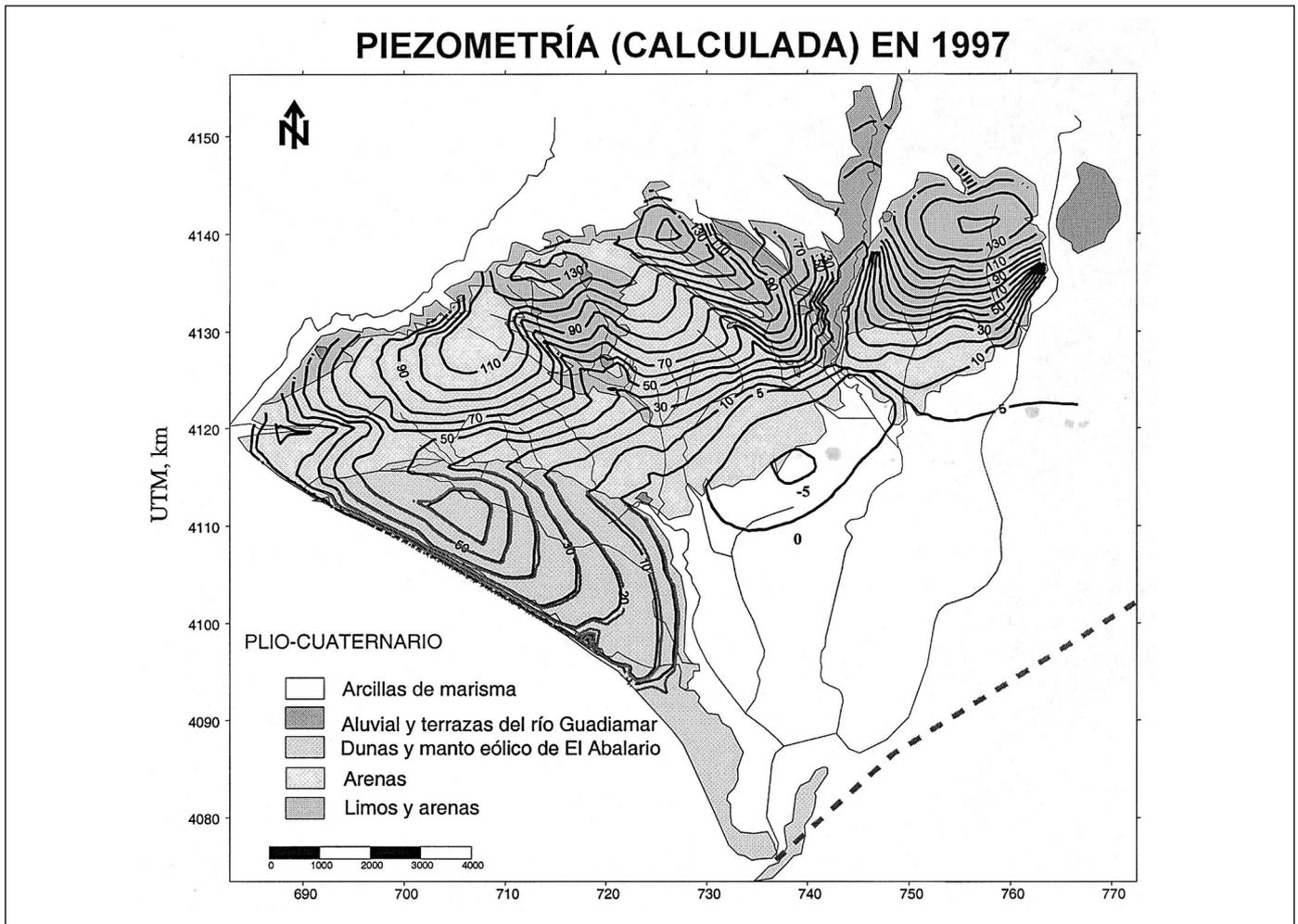


Fig. 1. Geología simplificada del acuífero y configuración de la piezometría regional. Se observa como ésta reproduce la topografía en la mayor parte del acuífero, salvo en las áreas de explotación intensiva de agua subterránea (modificado de UPC, 1999)
 Fig.1. Regional geology and water table configuration. Note that the water table morphology reproduces the landscape in most of the aquifer surface, except in a few localised places where intensive groundwater exploitation occurs (after UPC, 1999, modified)

Una parte del agua subterránea que llega al borde de la marisma no descarga a través del contacto arenas-arcillas sino que continúa fluyendo hacia el sur y sureste por el sector de acuífero confinado bajo la marisma. Buena parte de este agua descarga hacia la superficie de la marisma por flujos ascendentes a través de las arcillas (goteo). El goteo viene teniendo lugar probablemente desde que la configuración básica del sistema acuífero en esta zona es la actual (alrededor de 2000 años; Zazo *et al.*, 1996 y 1999; Manzano *et al.*, 2001; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 1996 y 1997). Sin embargo, esta situación se ha modificado en los últimos 15-20 años en el sector NE de la marisma, debido a las fuertes extracciones de agua subterránea para regadío, las cuales han disminuido e

incluso invertido localmente el gradiente hidráulico y por tanto también los flujos (Susó y Llamas, 1990; UPC, 1999; Manzano *et al.*, 2001).

Tipos hidrológicos de humedales en Doñana

Las características particulares tanto de los cuatro factores hidrológicos principales mencionados como de la hidrogeoquímica de un humedal dependen, en gran medida, de la ubicación del mismo respecto a la red de flujo del agua subterránea en el acuífero (Tóth, 1999; Winter, 1999; Custodio, 2000). Por tanto, una aproximación razonable para tipificar hidrológicamente los humedales relacionados con un acuífero

regional consiste en describirlos según su ubicación en el mismo.

Desde el punto de vista de su relación con el acuífero los humedales existentes en Doñana se pueden dividir en tres grupos: humedales ubicados en zona de recarga del acuífero, humedales ubicados en zona de descarga del acuífero y humedales situados en marisma (Manzano, 1999, 2001 y 2002). Atendiendo al origen del agua, el hidroperiodo y la hidroquímica, cada uno de estos grupos se divide en los siguientes tipos hidrológicos de humedales (tabla 3):

- Humedales de marisma. Son de tres tipos:

1- Epigénicos temporales estacionales. Es el caso de la propia marisma inundable, tanto dulce como salobre.

2- Costeros mesomareales, de origen marino. Debido al manejo antrópico de la hidrología de la marisma, están representados hoy en día sólo por una pequeña formación palustre situada en la orilla derecha del Guadalquivir, cerca de los Llanos de La Plancha.

3- Hipogénicos permanentes fluctuantes. También este tipo de humedales es poco frecuente hoy en día en la marisma, pero lo fue más en el pasado. Estaban originados por los flujos ascendentes de agua subterránea a través de las arcillas antes mencionados. Testimonio actual de la existencia de estos flujos son los "ojos" de marisma, y probablemente en el pasado era también el caso de algunos lucios

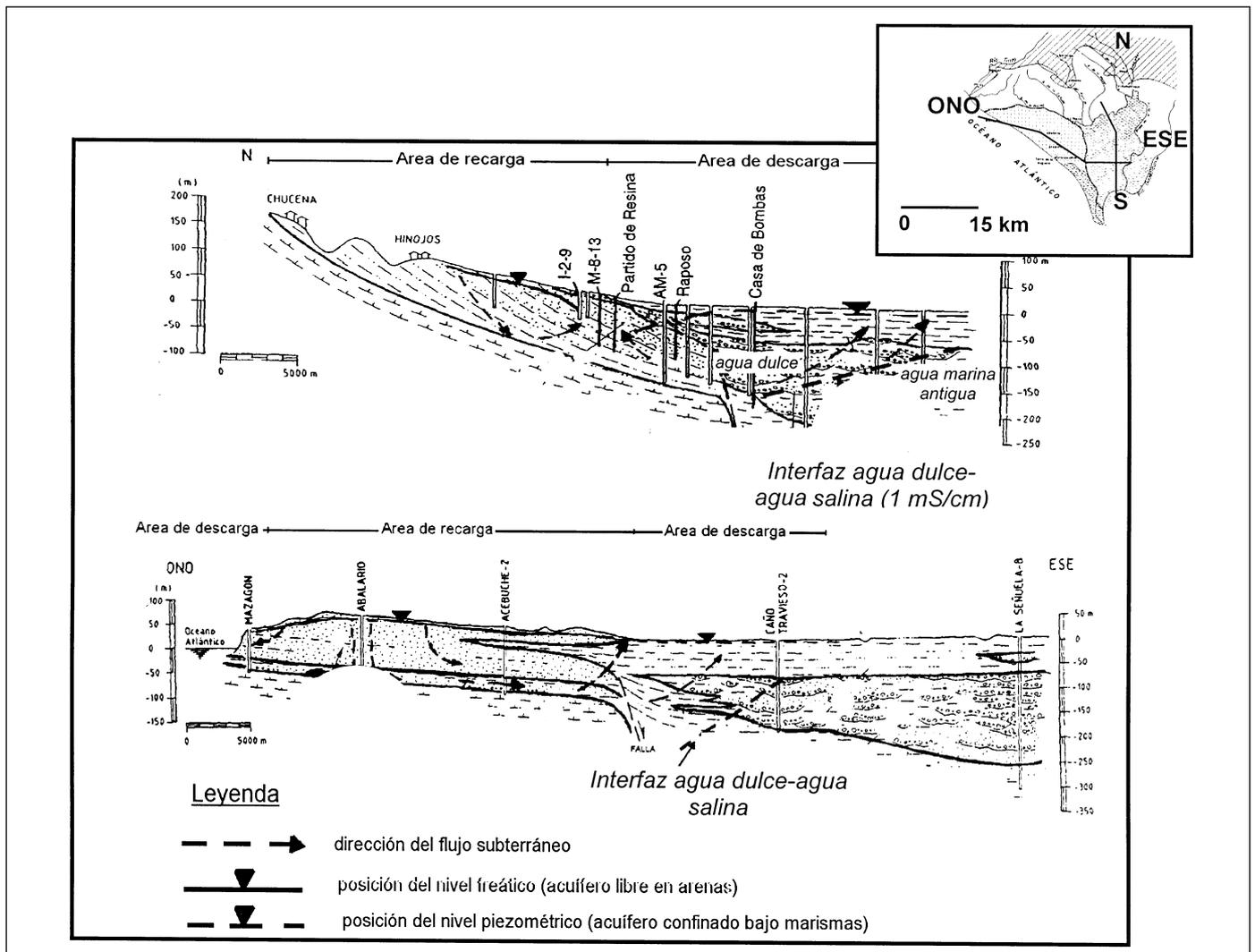


Fig. 2. Dirección y sentido del flujo de agua subterránea en el sistema acuífero de Doñana (modificado de Manzano y Ayora, 1998)
 Fig. 2. Simplified scheme of groundwater flow along two cross sections (ap. N to S and W to E) in the aquifer (after Manzano and Ayora, 1998, modified)

(del Lobo, de Mari López...) cuando éstos funcionaban según un sistema de flujo natural, no manejados antrópicamente como ocurre hoy en día.

Atendiendo a la química del agua, los humedales sobre marisma tienen grados de mineralización variable tanto espacial como temporalmente, aunque en general son de carácter clorurado sódico. Ello es debido tanto al aporte de sal del terreno de marisma como al aporte ocasional de agua salobre superficial y también al efecto de la concentración salina por evaporación en los cuerpos de agua superficiales de escasa renovación.

- Humedales situados en área de recarga del acuífero. Se distinguen cuatro tipos:

1- Hipogénicos temporales estacionales. Es el caso de la mayoría de humedales no permanentes ubicados sobre arenas (manto eólico litoral, flecha litoral, arenas de Coto del Rey, de Hinojos, etc.). Algunos ejemplos emblemáti-

cos son las lagunas de Ribatehilos, Peladillo, Ánsares, etc. en la zona de El Abalarío (Fig. 3), algunas de las lagunas peridunares de la Reserva Biológica de Doñana (Charco del Toro, Zahillo, Taraje, Hermanillos) y los navazos de la flecha litoral en el área de Marismillas. Estos humedales únicamente tienen agua en época de niveles freáticos altos (en los navazos se trata del nivel freático de la flecha litoral, en el resto de zonas se trata del nivel freático regional). En época seca y de niveles freáticos bajos no se ve agua en superficie, pero existe una vegetación cuyas raíces llegan hasta el nivel freático y que mantiene el humedal activo.

2- Hipogénicos permanentes fluctuantes. Es el caso de un número restringido de humedales en zona de recarga en Doñana y, aunque hoy en día esa permanencia es en general mantenida de forma artificial, en el pasado era natural. Es el caso de la laguna de Los Pájaros en El Acebuche (hoy alimentada con agua subterrá-

UBICACIÓN	TIPIFICACIÓN HIDROLÓGICA
<p>MARISMA (agua salobre; tipo Na-Cl)</p> <p>AREA DE RECARGA DEL ACUÍFERO (poco mineralizadas; tipo Na-Cl o NaCa-CIHCO₃)</p> <p>AREA DE DESCARGA DEL ACUÍFERO (mineralización media; tipo CaNa-HCO₃Cl)</p>	<p>1) Epigénicos temporales estacionales (marisma)</p> <p>2) Epigénicos costeros mareales de origen marino (Llanos La Plancha)</p> <p>3) Hipogénicos permanentes fluctuantes (ojos, lucios -antes-)</p> <p>1) Hipogénicos temporales estacionales (Ribatehilos, Ansares, Peladillo,...)</p> <p>2) Hipogénicos permanentes fluctuantes (Alamillo, Rincón,...)</p> <p>3) Epigénicos estacionales o esporádicos (Río Oro, Jiménez,...)</p> <p>4) Mixtos (Sancho Mingo,...)</p> <p>1) Hipogénicos temporales estacionales (Mogea, Sopedón, Ojillo, caños de La Vera, algaidas Rocina,...)</p> <p>2) Hipogénicos permanentes fluctuantes (Santa Olalla, Juan Sardina, Anguila, Cañada Mayor, La Rocina, arroyo de Río Loro...)</p> <p>3) Epigénicos o mixtos temporales estacionales (Madre de las Marismas)</p>

Tabla 3. Tipos hidrológicos de humedales existentes en Doñana en función de su posición sobre el acuífero regional (modificado de Manzano, 2001)

Table 3. Hydrological types of the wetlands in Doñana depending on their position related to the groundwater flow network (after Manzano, 2001, modified)

nea mediante bombeo), o de las del entorno del poblado de El Alamillo (hoy en día persiste alguna por haber sido excavado su fondo, ya sea como sacatierras o como zacallón). También es el caso de lagunas tales como la de La Anguila, El Rincón, etc., que son de las pocas que persisten en la zona de recarga del acuífero situada al norte de la marisma, pues la mayor parte de ellas ha desaparecido por el cambio de usos del suelo, la roturación, reforestación etc. y también por el descenso del nivel freático debido a los bombeos.

La presencia de humedales permanentes de alimentación subterránea situados en zona de recarga de acuíferos se debe a la existencia de flujos de agua subterránea de corto y medio recorrido.

3- Un tercer grupo de humedales es de tipo Epigénico temporal estacional o esporádico. Es el caso de las lagunas de Río Loro (o Río Oro), Jiménez, Ana, N de la Vaca, etc., en la zona de El Abalarío. En estos el nivel freático nunca intercepta la superficie del terreno, y sin embargo recogen agua en época húmeda y pueden mantenerla durante meses debido a la generación de flujos vadosos o hipodérmicos en la zona no saturada a escasa profundidad tras las lluvias, los cuales descargan a las cubetas (Custodio *et al.*, 1995; Borja y Díaz del Olmo, en prensa). Estos flujos se generan por la presencia de horizontes hidromorfos y de acumulación de materia orgánica en el entorno y bajo las cubetas, los cuales tienen una menor permeabilidad vertical con relación a las arenas

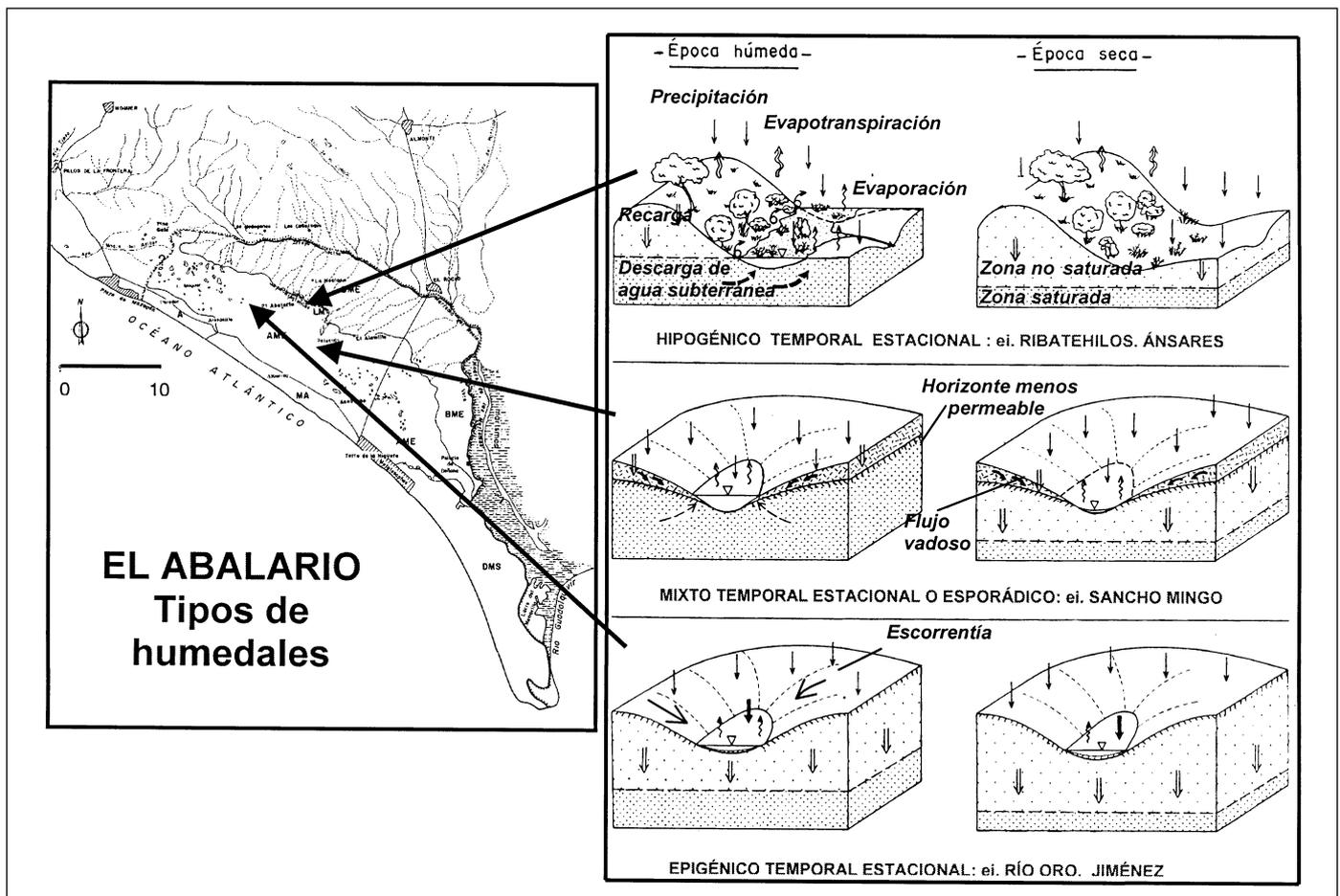


Fig. 3. Algunos ejemplos de humedales pertenecientes a distintos tipos hidrológicos. Las flechas en trazo más grueso representan el componente principal de llenado de las lagunas en cada caso (tomado de Manzano, 2001)

Fig. 3. Some wetlands with different hydrological types. Bold arrows identify the major water-feeding mechanism in each case. (After Manzano, 2001)

circundantes. Estas capas son más o menos horizontales, generalmente delgadas y de continuidad lateral muy restringida, por lo que suelen generar flujos de recorrido métrico a decamétrico, es decir de ámbito restringido. La compactación que produce el tránsito frecuente de ganado por la cubeta cuando no hay agua y la acumulación de materia orgánica en el fondo de la misma favorecen la retención del agua.

A este grupo pertenecen también dos humedales situados sobre limos aluviales en la margen derecha del Guadalquivir cerca de Marismillas (Llanos de Velázquez), únicos representantes de este tipo en cuanto al origen fluvial de las cubetas.

- 4- Mixtos temporales estacionales o esporádicos. Este es el caso de bastantes humedales de la zona de recarga occidental del acuífero. A este grupo pertenecen algunos de los humedales más orientales de la alineación de Ribatehilos, los cuales reciben agua antes quizá por escorrentía superficial (procedente de los humedales adyacentes situados al oeste) que por aporte subterráneo. Otro ejemplo es la laguna de Sancho Mingo, en el carril de El Abalarío a El Acebuche. En muy raras ocasiones tiene agua debido a la intersección del nivel freático con el terreno, generalmente tiene el agua que le viene por escorrentía superficial y por el tipo de flujos hipodérmicos antes mencionados (Custodio *et al.*, 1995; Borja y Díaz del Olmo, 1995).

Desde el punto de vista hidroquímico la característica fundamental de los humedales en la zona de recarga al oeste de la marisma es que tienen aguas muy poco mineralizadas y de composición muy estable. El potente paquete de arenas eólicas donde se encuentra el nivel freático no tiene prácticamente minerales hidrolizables, pues está formado fundamentalmente por sílice con algunos feldespatos y pocas arcillas y prácticamente sin carbonatos. El agua de lluvia se infiltra en el suelo disolviendo únicamente CO₂, por lo que el agua freática que alimenta esos humedales tiene las mismas características químicas que la lluvia local, que es ligeramente clorurada sódica y poco mineralizada. En la zona de recarga al norte de la marisma sí hay carbonatos en el terreno, por lo que el agua freática y también la de los humedales es bicarbonatada-clorurada-sódica-cálcica como resultado de la disolución del carbonato cálcico del terreno por el agua de lluvia

cuando ésta se infiltra (Manzano *et al.*, 1991; Iglesias, 1999; Iglesias *et al.*, 1996). Eventualmente estas aguas pueden ser algo más concentradas por efecto de la evaporación.

- Humedales situados en zona de descarga. Son de dos tipos fundamentales:

- 1- Hipogénicos permanentes fluctuantes. Es el caso de los humedales asociados a los caños y cañadas que rodean la marisma por el norte y el este. Salvo en la época de lluvias, en la cual reciben principalmente escorrentía superficial procedente del conjunto de sus cuencas, en época seca los caños y cañadas no son más que drenes del acuífero en su tramo más cercano a la marisma. Debido a la alimentación por agua subterránea estas zonas constituyen, en muchos casos, el único tramo de dichos arroyos que mantiene agua todo el año. Esta es también la causa de su aspecto habitual densamente vegetado (llamado localmente algaidas). Ejemplo de ello son la Cañada Mayor, el arroyo de La Rocina, el del Río Loro (o Río Oro) y algún otro de menor entidad en el acantilado de El Asperillo y, hasta no hace muchos años, los caños de Soto Chico, Soto Grande y otros en La Vera.
- 2- Hipogénicos temporales estacionales. Ésta es en realidad la situación actual de los humedales asociados al tramo final de Soto Chico, Soto Grande y otros caños de La Vera, así como la de las algaidas y cañadas que desembocan en La Rocina mayoritariamente por su orilla sur. Aunque estos caños y cañadas ya no mantienen agua en superficie en época seca debido principalmente al descenso de los niveles freáticos en el entorno del Rocío en los últimos 10-15 años, sí mantienen una densa vegetación cuyas raíces llegan al nivel freático. También es el caso de muchas zonas de rezume y de surgencias en el acantilado de El Asperillo, los cuales generan zonas encharcadas de extensión métrica a decamétrica con abundante vegetación higrofítica durante la época húmeda.
- 3- Epigénicos o mixtos permanentes o temporales estacionales. Es el caso de la Madre de las Marismas en su tramo más cercano a El Rocío. El origen del agua aquí se considera mixto porque, aunque la mayor parte es de origen subterráneo (afloramiento del nivel freático en caños, cañadas, algaidas y La Rocina), otra parte procede de la escorrentía superficial y epidérmica que se genera especialmente en las zonas regables del entorno de El Rocío.

Desde el punto de vista químico las aguas de los humedales situados en la zona de descarga del acuífero son algo más mineralizadas que las de la zona de recarga porque reciben agua subterránea que ha tenido un mayor tiempo de contacto con los minerales del terreno. Sin embargo, salvo excepciones, la mineralización total es en general moderada y las aguas oscilan entre bicarbonatadas-cálcicas y cloruradas-sódicas. No obstante, algunos manantiales y arroyos ubicados en el acantilado de El Asperillo son bastante mineralizados y de carácter marcadamente clorurado-sódico debido a la incorporación local al agua subterránea de sales procedentes del aerosol marino.

Combinando la variabilidad hidrológica con la hidroquímica, los distintos tipos de humedales existentes en las tres zonas mencionadas son los responsables de buena parte de la biodiversidad existente en Doñana.

Principales afecciones al funcionamiento hidrológico de los humedales de Doñana

Como ya se ha dicho, en una propuesta integral de clasificación genético-funcional de humedales el diagnóstico de las afecciones a los mismos es una herramienta fundamental de apoyo a la gestión cuando se combina con una tipificación hidrológica como la anterior.

El funcionamiento natural de los humedales puede ser alterado por la actividad humana, y aunque la ocurrencia de cambios lentos en el medio natural suele ocasionar pequeños cambios en los humedales, la acumulación de estos puede alterar permanentemente su funcionamiento. La disminución de la frecuencia y persistencia de la inundación, la desecación parcial o total de ciertos humedales, los cambios de la salinidad del agua y la alteración de la distribución temporal de sus ciclos son resultado de actuaciones humanas muy diversas, tales como: modificación de la red de drenaje en el entorno del humedal; represado del mismo; explotación del acuífero subyacente; cambios de vegetación o de uso del suelo en la cuenca; contaminación del agua y los sedimentos a través del agua entrante o por vertido directo en la cubeta, etc.

En humedales que dependen del agua subterránea, con frecuencia las actividades responsables del impacto que observamos tienen lugar en zonas alejadas (a veces centenares de km) o, incluso, ocurrieron hace décadas o centenares de años. Para la gestión de estos humedales es necesario prever los posibles impactos negativos sobre la cantidad y/o la calidad del agua subterránea de las distintas actividades

humanas que se realicen o se vayan a realizar en el futuro sobre el acuífero o en la zona de influencia del mismo, con el objetivo de minimizarlos.

Desde el punto de vista de la gestión de estos espacios es muy importante conocer el significativo papel del agua subterránea como sustento de masas de vegetación y de la fauna, o como origen de manantiales y de cuerpos de agua superficiales que suelen favorecer una mayor biodiversidad que las masas de agua de origen superficial. También es necesario destacar que los humedales que dependen de agua subterránea suelen ser más estables en cuanto a la cantidad y calidad del agua que los que dependen de aguas superficiales.

En el caso de Doñana, las principales afecciones al funcionamiento natural de los humedales se deben a afecciones al funcionamiento del acuífero. Estas son de dos tipos: aquellas que afectan a la cantidad de agua y aquellas que afectan a su calidad. Las afecciones a la cantidad, por orden decreciente en cuanto a la relevancia del impacto que producen, son:

- 1- La extracción de aguas subterráneas: constituye una de las afecciones principales a los humedales de la zona de arenas, ya que ocasiona un descenso tanto de los niveles freáticos como de los niveles piezométricos más profundos. Esta segunda situación incrementa los gradientes hidráulicos entre las zonas superiores y las profundas del acuífero, induciendo al agua freática a fluir hacia posiciones más profundas en vez de descargar lateralmente a arroyos y depresiones de la superficie del terreno. En última instancia esto ocasiona también un descenso de los niveles freáticos, y el resultado final es doble: por un lado, el agua freática se aleja del alcance de las raíces de las plantas, disminuyendo así la densidad y persistencia de la vegetación en estado óptimo; por otro, disminuye la frecuencia de inundación de las cubetas y pequeñas irregularidades del terreno (Fig. 4).

Mirando un mapa de situación de los principales centros de bombeo de aguas subterráneas en el acuífero de Doñana se ve que éstos están concentrados preferentemente cerca del contacto entre las zonas de recarga y de descarga del acuífero (entorno de La Rocina y El Rocío, contacto arenas-marisma). Estas zonas coinciden con áreas donde hace algunas décadas había una gran concentración de humedales (lagunas, caños, algaidas) que han ido desapareciendo.

El efecto de las extracciones para uso agrícola, que comenzaron hacia los años de 1973-74, ha tenido distinta incidencia en toda la zona.

Observando la evolución temporal de la profundidad del agua en los pozos de control de las redes de observación del IARA, el IGME y la CHG desde esa fecha hasta hoy, se ve lo siguiente (Fig. 5):

a- En el sector NE del área de El Abalarío cercano a la zona cultivada, a pesar del patente descenso progresivo de los niveles freáticos

las afecciones que más llaman la atención a primera vista son las extracciones estacionales para riego. Estas se manifiestan como descensos y recuperaciones muy acusados, del orden de decenas de metros, del nivel del agua subterránea en los pozos. Pero además se observa cómo a lo largo de los años las recuperaciones tienden a ser cada vez

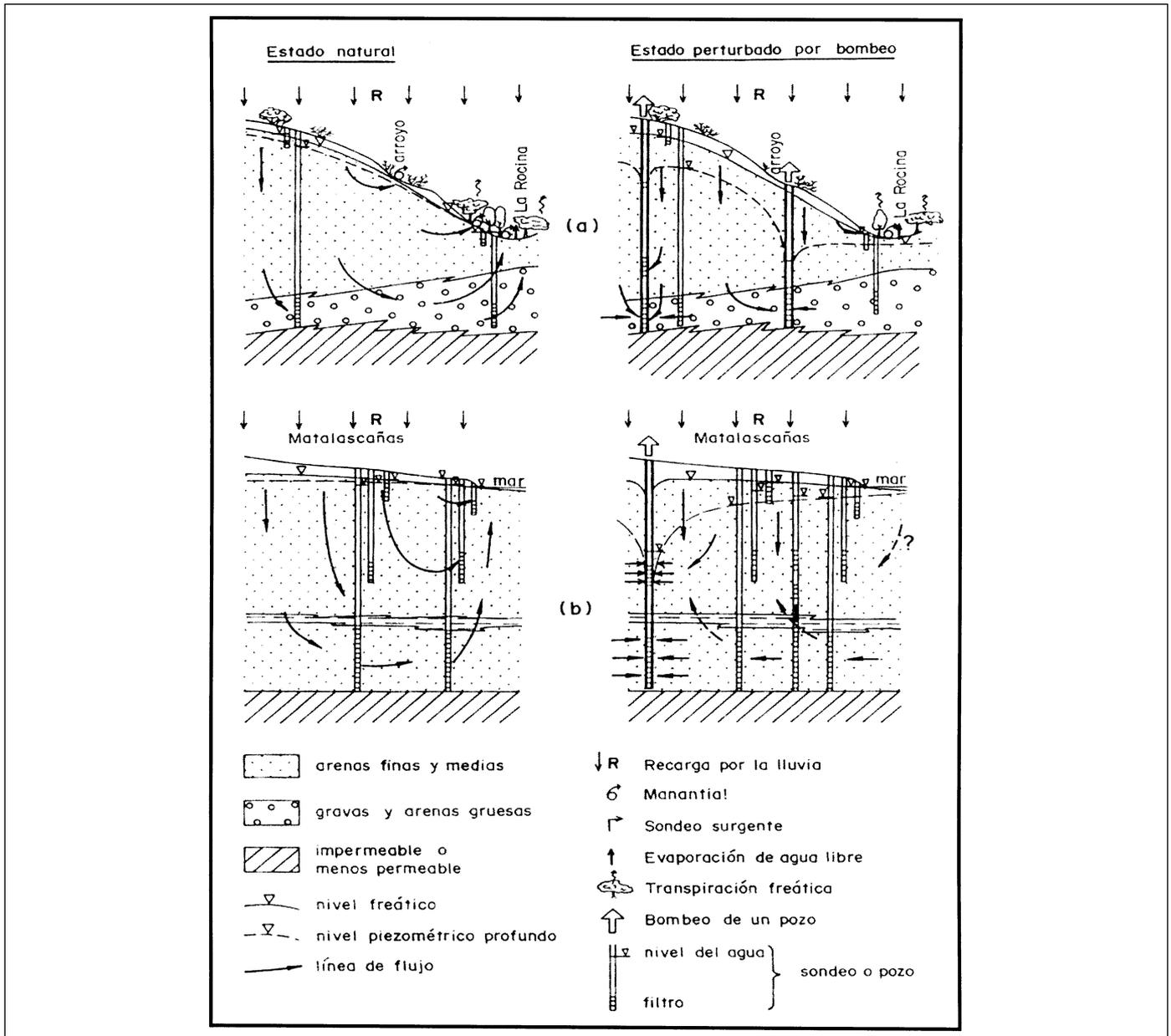


Fig. 4. Esquema ilustrativo de cómo se modifica el sentido de los flujos de agua subterránea, así como la posición del nivel freático y del nivel piezométrico profundo, debido a las extracciones. La figura (a) muestra el impacto sobre las descargas al ecotono y a lagunas freáticas (según Custodio et al., 1995)

Fig. 4. Conceptual scheme illustrating how deep groundwater abstractions in localised areas of Doñana modify both the position of the deep piezometric levels as well as that of the water table (after Custodio et al., 1995)

más incompletas debido al descenso inter-anual acumulado del nivel freático.

b- En áreas cercanas a la zona de descarga de los bordes E y N de la marisma se ve claramente el descenso neto de los niveles a causa de las extracciones. En el contorno N y en la zona regable de la marisma transformada (NE) los puntos de control disponibles muestran que el efecto de las extracciones ha sido aquí más significativo y drástico que en otras zonas. Comparando la superficie piezométrica del acuífero en esta zona en octubre de 1996 respecto a la de octubre de 1972 (ver Fig. 1) se ve que se ha generado un cono de depresión por bombeos que alcanza posiciones de entre 15 y 20 metros por debajo del nivel del mar. Una de las consecuencias es que muchas de las lagunas de

esta zona hoy en día sólo pueden ser observadas en documentos históricos, si bien el efecto de la deforestación (anterior al inicio de los bombeos) de las cuencas del Guadiamar, Cigüeña, etc. ya había comenzado a dejarse notar también.

c- La existencia de antiguas zonas húmedas en áreas donde no existen ya desde hace algunas décadas se hace patente en la toponimia local, a veces sólo recogida en documentación antigua o en aquella moderna que recopila la nomenclatura antigua (Castroviejo, 1993; CMAJA, 1998).

Los resultados de simular con modelos numéricos la evolución piezométrica de todo el acuífero de Doñana entre 1970 y la actualidad (período para el cual se dispone de datos medi-

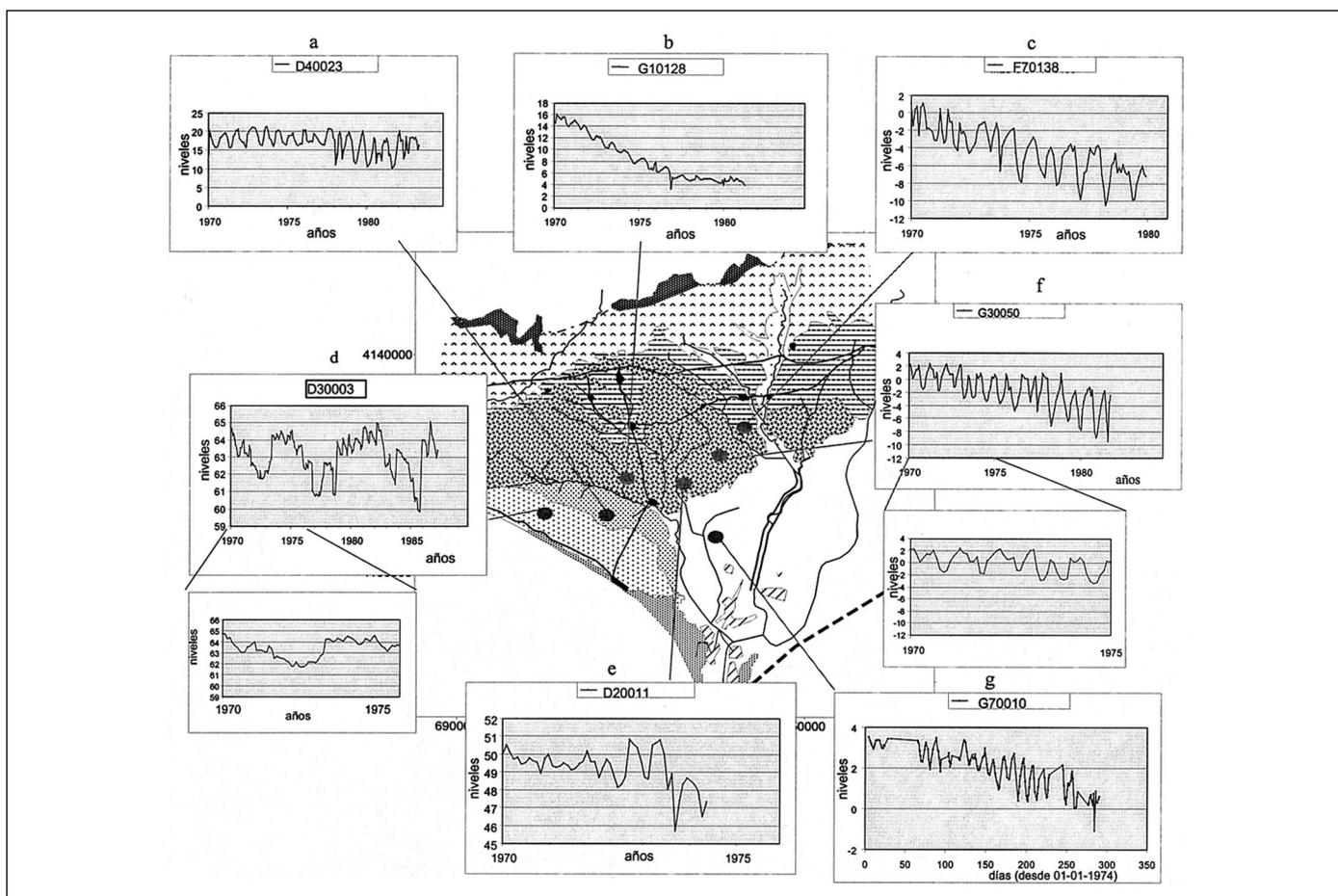


Fig. 5. Evolución temporal de los niveles freáticos y piezométricos en distintos puntos del acuífero. (Modificado de UPC, 1999)
 Fig. 5. Water level and piezometric level evolution in different parts of the aquifer since the starting of groundwater abstractions for irrigation (ca. 1983-74). (Modified after UPC, 1999)

dos en el acuífero) muestran claramente el efecto acumulado de los descensos freáticos y piezométricos debido a los bombeos y también la disminución de salidas naturales del acuífero tales como las descargas subterráneas al arroyo de La Rocina y al ecotono de La Vera (Martín Machuca y Virgós, 1995; UPC, 1999). Si a esto se le suma el efecto localizado en el tiempo de los períodos de sequía, se puede llegar a situaciones puntuales tales como la de 1994, año en el que las descargas a La Rocina y al ecotono de La Vera fueron un 50% menos de las ocurridas en 1970 (UPC, 1999). Se trata de una situación puntual debida al efecto combinado de una situación circunstancial (la sequía) y otra que es sostenida en el tiempo y creciente (descenso acumulado de los niveles). No obstante, sus efectos negativos sobre la vegetación de La Vera y La Rocina pueden mantenerse patentes durante muchos años e incluso ser en parte irreversibles.

- 2- Deforestación y reforestación con especies freatófitas alóctonas: modifican el funcionamiento natural del acuífero de distintas formas. La deforestación conlleva un gran movimiento de tierras y la consiguiente pérdida de cohesión del suelo, lo que ha ocasionado cambios en la topografía del terreno debido a procesos de erosión y sedimentación localizados. Estos cambios pueden haber sido de escala decimétrica, pero esto es suficiente para crear o hacer desaparecer depresiones del terreno capaces de interceptar el nivel freático en época húmeda o de almacenar agua de lluvia. Ejemplo característico de este efecto es el caso de algunas algaidas situadas tanto en la cuenca alta como en ambos márgenes de La Rocina.

Otra causa de desaparición de humedales es la introducción de especies alóctonas con mayores requerimientos hídricos y con mayor accesibilidad de sus raíces al agua freática que las autóctonas, como es el caso bien conocido del eucalipto. Desde el punto de vista hidrogeológico el resultado ha sido un descenso regional -de orden centimétrico- del nivel freático debido al incremento de la evapotranspiración (Trick, 1998). Es el caso del área Abalarío-Mediana-Rocina, donde buena parte de las antiguas descargas de agua subterránea a cubetas (lagunas de Ribatehilos o Línea de La Mediana) ha desaparecido a causa de la introducción de eucaliptos hace 30 años (Fig. 6).

Las principales afecciones a la calidad del agua subterránea, por orden de importancia, son:

- 1- Contaminación de origen agrícola (fertilizantes y plaguicidas). Hay estudios que revelan la presencia de fertilizantes y plaguicidas en el suelo y en los primeros metros de la zona saturada del acuífero en las zonas regables, principalmente sectores IV, I y III del Plan Regable Almonte-Marismas (Iglesias, 1999; Romero *et al.*, 2001). El hecho de que los pozos de bombeo tengan varios tramos de rejilla puede ocasionar la contaminación de niveles profundos del acuífero, a los que de forma natural esos contaminantes tardarían mucho más tiempo en llegar o no llegarían nunca.

Con un impacto más directo sobre los humedales, los excedentes de riego del Sector IV y su entorno aportan gran cantidad de agroquímicos a las algaidas vertientes a La Rocina y a este mismo arroyo, a los caños y sotos que discurren por la Vera y a la propia marisma. La situación de contaminación por agroquímicos en esta zona es poco conocida por no haberse realizado ningún estudio sistemático del problema.

- 2- Contaminación de origen industrial (alpechines, vinazas, purines, metales pesados, etc.). La fuente se localiza en el entorno de las poblaciones donde se realizan estas actividades (Almonte, Hinojos, Pilas,...) (COPTJA, 1989), pero, debido a la ausencia de estudios al respecto, se desconoce su impacto sobre la calidad del agua subterránea. Muchos de estos contaminantes llegan a la marisma a través de la red de flujo superficial de agua.
- 3- Contaminación de origen urbano (aguas negras no depuradas y vertidas a cauces y fosas sépticas). Afecta a las aguas freáticas de casi todos los núcleos urbanos de la zona, incluso de los más pequeños (caso del poblado forestal de El Abalarío). No obstante la puesta en funcionamiento de estaciones depuradoras de aguas residuales en las poblaciones mayores permitirá sin duda una mejora importante de la situación.

Conclusiones y recomendaciones

La actitud de los gestores y del público en general hacia los humedales ha cambiado en los últimos 15-20 años, dominando en la actualidad las tendencias conservacionistas en las políticas de gestión de los mismos. Esto supone una valoración antes desconocida de los bienes y servicios que ofrecen los humedales tanto por sí mismos como en relación con la actividad antrópica.

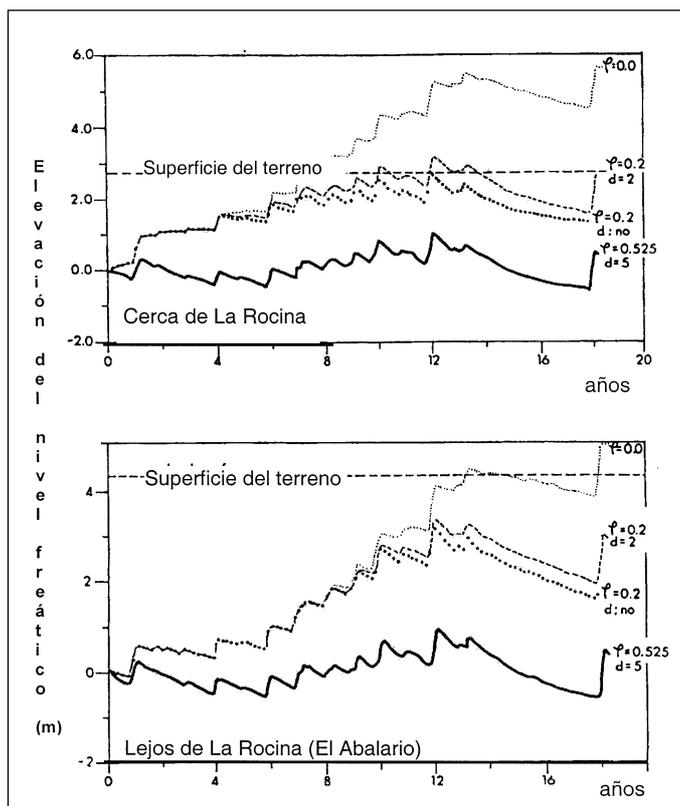


Fig. 6. Simulación del efecto sobre la posición del nivel freático de distintas alternativas de gestión de la vegetación en el área de El Abalarío, sin modificar la explotación actual del acuífero. (Modificado de Trick, 1988 en Custodio, 2000). ϕ es la evaporación freática máxima (m/año) y d es la profundidad máxima alcanzable por la evaporación freática (valor impuesto en m). $\phi = 0.525$ m/año y $d = 5$ m es el valor de la situación real calibrada (con eucaliptos); $\phi = 0.2$ m/año y $d = 2$ m es el valor representativo de sustituir los eucaliptos por la vegetación nativa original; $\phi = 0.2$ m/año y $d = \text{"no"}$ es el valor de sustituir los eucaliptos por la vegetación original dejando que ésta se adapte a cualquier profundidad del nivel freático; $\phi = 0.0$ m/año es el valor representativo de eliminar los eucaliptos sin sustituirlos por nueva vegetación. La figura sugiere que eliminar los eucaliptos sin reforestar la zona llevaría a un ascenso del nivel freático por encima de la superficie del terreno en sólo unos 15 años. Sustituir los eucaliptos por una vegetación nativa que sólo alcanzara el nivel freático cuando éste estuviera a menos de 2 m de profundidad produciría una elevación del nivel freático de unos 3 m; si la nueva vegetación tuviera siempre acceso al nivel freático independientemente de su profundidad, éste ascendería medio metro menos que en el caso anterior. Leyendo hacia atrás en el tiempo, se deduce que el impacto de la introducción de los eucaliptos sobre el descenso del nivel freático ha sido de orden decimétrico a métrico.

Fig. 6. Numerical simulation of the impact of different vegetation-management alternatives on the position of the water table in El Abalarío area. Groundwater abstraction is constant. (Modified after Trick, 1998 in Custodi, 2000). j is the maximum phreatic evaporation (m/year) and d is the maximum depth available for phreatic evaporation (imposed value, in m). $j = 0.525$ m/year and $d = 5$ m are the values of the calibrated actual situation (with eucalyptus); $j = 0.2$ m/year and $d = 2$ m identify the substitution of eucalyptus for the native original vegetation; $j = 0.2$ m/year and $d = \text{"no"}$ means the former action but allowing the native vegetation to reach the water table whichever its depth; $j = 0.0$ m/year means that eucalyptus are

eliminated without substituting them by other type of vegetation. The following results arise from the figure: the elimination of eucalyptus without substituting them will led to a water table rise above the land surface in some 15 years. The substitution of eucalyptus by native vegetation not able to reach water table deeper than 2 m will lead to a water table rise of some 3 m; if the native vegetation were able to reach the water table whichever its depth, the rise will be only 2.5 m. Extrapolating that backward in time, a regional water table drawdown of several dm to some m due to the introduction of eucalyptus can be deduced

Para plantear y llevar a la práctica planes de gestión adecuados a esta línea de pensamiento es necesario conocer con detalle la génesis y el funcionamiento de los humedales, y para ello debe utilizarse una aproximación integral o ecosistémica que suponga el estudio combinado de los aspectos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos de cada caso.

La restauración del funcionamiento hídrico (cantidad y calidad) de aquellos humedales de Doñana cuyo funcionamiento natural está afectado (generalmente a consecuencia de actividades antrópicas) requiere tener en cuenta la inestimable información que clasificaciones del tipo hidro-geomorfológico ofrecen. De manera breve y concisa informan, por una parte, acerca de la morfogénesis que da origen al humedal, de los procesos morfodinámicos que actúan en el presente sobre el mismo (contextualizando el origen y la posible evolución de su cubeta), acerca de su modelado y su morfometría (rasgos que condicionan en gran medida el comportamiento de los flujos hídricos y de masa de sales y las reacciones de los organismos), acerca de los suelos y depósitos asociados al humedal, etc. Por otra parte informan sobre el origen del agua que alimenta el humedal y el modo de vaciado del mismo, sobre la frecuencia y la permanencia de la inundación, sobre la hidroquímica y la calidad del agua, etc. Además, la utilidad de este tipo de clasificaciones como herramienta de apoyo a la gestión de humedales es extraordinaria cuando se combinan con un diagnóstico de las posibles afecciones a los humedales.

Por otro lado, cuando estas clasificaciones se utilizan para la gestión de humedales es muy recomendable usar como herramienta complementaria modelos de simulación. Estos modelos no tienen necesariamente que ser numéricos, aunque si existen o hay posibilidad de construirlos, el beneficio que reportará su uso será extraordinario. En cualquier caso, la principal utilidad de los modelos de simulación, sean analíticos o numéricos, no es conocer la respuesta detallada del medio ante una actuación

determinada, sino seleccionar a priori cuáles de entre el abanico posible de medidas propuestas van a ser más efectivas y cuáles se pueden descartar de antemano. Lo ideal sería utilizar este tipo de herramienta de forma continuada y habitual para la gestión del medio natural, pero para ello es necesario que la herramienta exista. Esta tarea es más fácil de realizar de lo que habitualmente se piensa: sólo requiere la integración, por parte de los técnicos y científicos especialistas, del conjunto de conocimientos históricos y actuales ya existentes sobre el funcionamiento de una zona en concreto y, en algunos casos, la obtención de información complementaria mediante estudios puntuales y específicos.

En el caso del Doñana, además de los modelos numéricos de simulación del funcionamiento del acuífero ya existentes (de zonas concretas y de todo el acuífero), en el marco del proyecto CICYT MADRE II (REN2001-1293-CO2-01/HID) se lleva a cabo en la actualidad un estudio específico para proponer modelos integrados de funcionamiento de algunos de los tipos más significativos y emblemáticos de los humedales existentes en la zona.

Agradecimientos

Los aspectos hidrogeológicos del presente trabajo son el resultado de varios años de trabajo continuado en Doñana del primer autor como miembro del Grupo de Hidrología Subterránea de la Universidad Politécnica de Cataluña y en el marco de varios proyectos de investigación tanto nacionales como europeos (CICYT-PB87-0842; CICYT-AMB-363; CICYT-AMB95-0372; PALAEAUX, ENV4-CT95-0156; BASELINE, EVK1-1999-0006), así como de varios convenios con el Instituto Geológico y Minero de España para trabajos de investigación hidrogeológica en Doñana. Los aspectos relativos a la clasificación de humedales son resultado de los convenios de investigación llevados a cabo por los autores con la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía para la restauración hídrica del complejo palustre de El Abalarío (1995) y para la elaboración del Mapa Ecológico de Doñana (1998); de los proyectos de investigación CICYT HYD97-0321-C02-01 y CICYT REN2001-1293-CO2-01/HID, así como de los trabajos realizados para el MOPTMA en el marco del Inventario Nacional de Humedales (1996) y, más recientemente, para la elaboración del Plan Andaluz de Humedales (CMAJA, 2002).

Aunque el trabajo que se presenta es inédito, parte de su contenido se ha presentado en otros foros (1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la

Restauración Hídrica de Doñana, Ministerio de Medio Ambiente, Huelva, 1999; VII Simposio de Hidrogeología, Murcia, 2001, y Seminario sobre La Conservación de los Humedales de Doñana en relación con la explotación de las Aguas Subterráneas, Fundación Botín, Sevilla, 2002).

Referencias

- Borja, F. y Díaz del Olmo, F. 1995. *Bases geomorfológicas y diagnóstico para la recuperación de los complejos húmedos de El Abalarío*. DGCN, AMA Junta de Andalucía. (Informe inédito), 1-125.
- Borja, F. 2000. *Aproximación a la clasificación genética de los Humedales de Andalucía*. DGP, CMA Junta de Andalucía. (Informe inédito). Sevilla, 1-13.
- Borja, F.; Montes, C.; Morón, M. C. y Barral, M. A. 1997. Humedales litorales de la provincia de Huelva. Aportación a su clasificación genética. *Dinámica Litoral-Interior. Actas del XV Congreso Nacional de Geógrafos Españoles*, AGE, Santiago de Compostela, 1: 45-54.
- Borja, C. y Borja, F. 2002. Contribución a la clasificación genética de humedales de Andalucía: tipos genéticos y complejos palustres. En: Pérez González, A., Vegas, J. y Machado, M.J. (Eds.): *Aportaciones de la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio*. SEG - IGME, Madrid, Serie Geología, 1: 25-30.
- Brinson, M.M. 1993. *A hydrogeomorphic classification for wetlands*. U.S. Army Corps of Engineers, Technical Report WRP-DE-4, 1-79.
- Carter, V. 1996. *Technical Aspects of Wetlands. Wetland Hydrology, Water Quality, and Associated Functions*. USGS Water Supply Paper 2425, 1-25.
- Carter, V.; Bedinger, M.S.; Novitzki, R.P. y Wilen, W.D. 1979. Water resources and wetlands. En: P.E. Greeson, J.R. Clark y J.E. Clark (Eds.): *Wetland functions and values: the stage of our understanding*. American Water Resour. Assoc., Minneapolis, Minn., 1-647.
- Castroviejo, J. 1993. *Mapa del Parque Nacional de Doñana*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Madrid, 1-133 + anejos y mapa desplegable.
- CMAJA, 1998. *Reconocimiento Biofísico de Espacios Naturales Protegidos. Doñana: Una Aproximación Ecosistémica*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, ISBN: 84-89650-22-5, Sevilla, 1-311.
- CMAJA, 2002. *Plan Andaluz de Humedales*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía (en prensa).
- Custodio, 1995. El papel de la hidrología en los programas de restauración de humedales en ambientes fluctuantes. En: C. Montes; J. Oliver; F. Molina y J. Cobos (Eds.): *Bases ecológicas para la restauración de los humedales en la cuenca mediterránea (Ecological basis for wetland restoration in the Mediterranean basin)*. Agencia de Medio ambiente de la Junta de Andalucía, Sevilla, 43-60.
- 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*, Madrid, 142 (3340), 31-53.
- Custodio, E.; Manzano, M.; Iglesias, M. y Giráldez, J.V. 1995. *Estudio hidrogeológico de El Abalarío (Huelva). Bases para la restauración de la zona húmeda*. DGCN, AMA, Junta de Andalucía. (Informe inédito). Sevilla, 1-50 + figuras.
- Gosselink, J.G. y Turner, R.E. 1978. The role of hydrology in freshwater wetland ecosystems. En: *Freshwater Wetlands*, Academic Press (Ed.), 63-78.
- Iglesias, M. 1999. *Caracterización hidrogeológica del flujo del agua subterránea en El Abalarío, Doñana, Huelva*. Tesis Doctoral. ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Inédita.
- Iglesias, M.; Custodio, E.; Giráldez, J.V.; Manzano, M. y Ordóñez, R. 1996. Caracterización química de la lluvia y estimación de la recarga en el área de El Abalarío, Doñana, Huelva. *Actas del IV Simposio sobre el Agua en Andalucía*, ITGE, Madrid: 99-121.
- IGME, 1983. *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía, Instituto Geológico y Minero de España, Colección Informe. Madrid, 1-120 + mapa.
- IGME, 1992. *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Instituto Geológico y Minero de España, Colección Informes Aguas Subterráneas y Geotécnia, Madrid, 1-64 + 2 mapas.
- INITEC, 1990. *Estudio de las zonas húmedas continentales de la España Peninsular. Inventario y tipificación*. Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.
- Konikow, L. y Rodríguez-Arévalo, F.J. 1993. Advection and diffusion in a variable density confining layer. *Water Resour. Res.* 29 (8): 2727-2761.
- Llamas, M.R. 1987. *Bases científicas para la protección de los humedales en España*. Real Academia de Ciencias, Madrid, 1-360.
- Llamas, M.R. 1988. *Conflicts between wetlands: new constraints in groundwater management. Management: Quantity and Quality*. Inter. Assoc. Hydrol. Sciences. Publ. 188: 295-304.
- Llamas, M.R. 1992. *Wetlands: an important issue in hydrogeology*. Selected Papers on Aquifer Overexploitation. Intern. Assoc. Hydrogeologists, Heise, Hannover, 3: 69-86.
- 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. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Manzano, M. 2001. Clasificación de los humedales de Doñana atendiendo a su funcionamiento hidrológico. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, Madrid, XXIV: 57-75.
- Manzano, M. 2002. El papel de las aguas subterráneas en el mantenimiento de los humedales de Doñana. Marco hidrogeológico. Ponencia del *Seminario sobre La Conservación de los Humedales de Doñana en relación con la explotación de las Aguas Subterráneas*, Fundación Botín, Sevilla, febrero de 2002. (Inédito)
- Manzano, M. y Ayora, C. 1998. Informe sobre la afección a los acuíferos por el vertido de la presa de Aznalcóllar. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Informe del Comité de Expertos para la Evaluación del Impacto del Accidente de Aznalcóllar para la prensa, junio de 1998, 1-33.
- Manzano, M.; Custodio, E. y Poncela, R. 1991. Contribución de la hidrogeoquímica al conocimiento de la hidrodinámica de los acuíferos del área de Doñana. *Actas del III Simposio sobre el Agua en Andalucía*, ITGE, Madrid: 133-146.
- Manzano, M.; Custodio, E.; Loosli, H.H.; Cabrera, M.C.; Riera, X. y Custodio, J. 2001. Palaeowater in coastal aquifers of Spain. En: *Palaeowaters in Coastal Europe: evolution of groundwater since the late Pleistocene*. Edmunds, W.M. y Milne, C.J. (Eds.) Geological Society, Londres, Special Publication, 189: 107-138. ISBN:1-86239-086-X.
- Martín Machuca, M. y Virgós, L. I. 1995. Modelo matemático del acuífero de Almonte-Marismas. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XIX: 639-660.
- Montes, C.; Oliver, J.; Molina, F. y Cobos, J. 1995. *Bases ecológicas para la restauración de los humedales en la cuenca mediterránea (Ecological basis for wetland restoration in the Mediterranean basin)*. Agencia de Medio ambiente de la Junta de Andalucía, Sevilla, 1-348.
- MOPTMA, 1996. *Zonas húmedas (Apoyo al Plan Hidrológico de Cuenca)*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. (Informe inédito.)
- Novitzki, R.P. 1979. Hydrologic characteristics of Wisconsin's wetlands and their influence on floods, stream flow and sediment. En: P.E. Greeson, J.R. Clark y J.E. Clark (Eds.), *Wetland functions and values: the stage of our understanding*. American Water Resour. Assoc., Minneapolis, Minn., 377-388.
- Novitzki, R.P. 1989. Wetland Hydrology. En: *Wetlands Ecology and Conservation: Emphasis in Pennsylvania*. S.K. Majumdar, R.P. Brooks, F.J. Brenner y R.W. Tiner (Eds.), The Pennsylvania Academy of Science, 47-64.
- COPTJA, 1989. *Plan Director Territorial de Coordinación de Doñana y su Entorno*. Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía. Sevilla, 1-300.
- Romero, E.; González, A.; Garrido, R.; Orihuela, D.L.; Fidelibus, M.D. y Tulipano, L. 2001. Procesos de salinización del acuífero Almonte-Marismas en el preparque Norte del Parque Nacional de Doñana en base al estudio de los iones mayoritarios. Pulido Bosch, A.; Pulido Leboeuf, P. Vallejos Izquierdo, A. (Eds.) *Actas del V Simposio sobre El Agua en Andalucía*, Almería, II: 261-270.
- Rodríguez-Arévalo, F.J. 1988. *Origen y movimiento del agua intersticial en el acuitardo arcilloso de las marismas del Guadalquivir*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 1-300 + anejos.
- Rodríguez-Ramírez, A.; Rodríguez-Vidal, J.; Cáceres, L.; Clemente, L.; Belluomini, G.; Manfra, L.; Impronta, S. y de Andrés, J.R. 1996. Recent coastal evolution of the Doñana National Park (SW Spain). *Quaternary Science Review*, 15: 803-809.

- Rodríguez-Ramírez, A.; Rodríguez-Vidal, J.; Cáceres, L.; Clemente, L.; Cantano, M.; Belluomini, G.; Manfra, L. y Impronta, S. 1996. Evolución de la costa atlántica onubense (SO España) desde el máximo flandriense a la actualidad. *Boletín Geológico y Minero* 108(4): 465-475.
- Salvany, J.M. y Custodio, E. 1995. Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas. *Rev. Soc. Geol. España*, 8(1-2): 21-31.
- Smith, R.D. y Wakeley, J.S. 2001. *Hydrogeomorphic Approach Assessing Wetland Functions: Guidelines for Developing Regional Guidebooks*. US Army Corps of Engineers, Wetlands Research Program, ERDC/EL TR-01-30, capítulo 3: 1-18.
- Suso, J.M. y Llamas, M. 1990. El impacto de la extracción de aguas subterráneas en el Parque Nacional de Doñana. *Estudios Geológicos*, 46: 317-345.
- Tóth, J. 1999. Groundwater as a geological agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, 7(1): 7-24.
- 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.
- UPC, 1999. *Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte-Marismas y su entorno*. Informe inédito realizado por el Grupo de Hidrología Subterránea de la Universidad Politécnica de Cataluña para el Instituto Tecnológico Geominero de España del Ministerio de Medio Ambiente, Barcelona, 1-114 + anejos.
- Winter, T.C. 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7: 28-45.
- Winter, T.C. y Llamas, M.R. 1993. Hydrogeology of wetlands. *J. Hydrol.* 141(1-4): 1-269.
- Winter, T.C. y Woo, M.K. 1988. Hydrology of lakes and wetlands. En: *The Geology of North America*, United States Geological Survey, 1-30.
- Zazo, C.; Goy, J.L.; Lario, J. y Silva, P.G. 1996. Littoral zone and rapid climatic changes during the last 20,000 years: the Iberian study case. *Z. Geomorph. N.F.; Berlin-Stuttgart, Suppl.* (102): 119-134.
- Zazo, C.; Dabrio, C.; González, A.; Siervo, F.; Yll, E.I.; Goy, J.L.; Luque, L.; Pantaleón-Cano, J.; Soler, V.; Roure, J.M.; Lario, J.; Hoyos, M. y Borja, F. 1999. The record of the latter glacial and interglacial periods in the Guadalquivir marshlands (Mari López drilling, SW Spain). *Geogaceta*, 26: 119-122.
- Zoltai, S.C. y Pollent, F.C. 1983. Wetlands in Canada: their classification, distribution and use. En: Gore, A.J.P. (Ed.), *Ecosystems of the world, 4B, Mires: Swamp, bog, fen and moor: regional studies*. Amsterdam, Elsevier, 245-26.

Recibido: Julio 2002

Aceptado: Septiembre