

El acuífero de Doñana y su relación con el medio natural

MARISOL MANZANO *, EMILIO CUSTODIO **

En la comarca de Doñana se encuentra un acuífero detrítico de grandes dimensiones, unos 3400 km², y que posee una singular relevancia medioambiental y humana, ya que el agua subterránea juega un papel esencial tanto en la generación y mantenimiento de medios naturales muy diversos y ecológicamente valiosos, como en la subsistencia y desarrollo de una población que depende casi enteramente del agua subterránea para su abastecimiento y para el regadío. Denominado oficialmente Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas (antiguo Acuífero 27 y actual Acuífero 05-51 + 04-14 en la relación del Instituto Geológico y Minero de España), en la práctica se le designa simplemente como Acuífero de Doñana.

Desde el punto de vista hidrogeológico se trata de un "sistema acuífero", es decir, de un conjunto de unidades con distinto origen y capacidad para almacenar y transmitir el agua, pero conectadas espacialmente e hidráulicamente entre sí. Está formado por sedimentos de edad pliocena (entre 5 y 2 millones de años) a cuaternaria (menos de 2 millones años) depositados en el arco Guadiana-Guadalquivir y sobre un sustrato de margas azules de edad miocena (entre 24 y 5 millones de años) y gran espesor (hasta más de 2000 m) que actúa de base impermeable del acuífero en toda su extensión. En su mayor parte son sedimentos no consolidados y de grano fino, depositados en ambientes sedimentarios fluvio-marinos (litoral, aluvial, eólico, estuarino, mareal). El conjunto tiene un espesor variable: los máximos espesores están hacia el SE (>300 m bajo la marisma, cerca de la costa), mientras que hacia el SO (El Asperillo-El Abalario) el espesor es de menos de 100 m y hacia el N oscila entre 10 y 50 m. Los estudios geológicos más recientes y otros en marcha⁶⁵ explican la geometría general del acuífero y sus características hidráulicas en función de los ambientes donde se formaron y de los procesos que dieron lugar a la acumulación de sedimentos. En la Figura 1 se muestra esta geometría y estructura a grandes rasgos:

- Sobre las margas azules miocenas y otros depósitos arcilloso-arenosos que las recubren aparecen, gradualmente, limos, margas y arenas finas de origen deltaico y edad entre pliocena y pleistocena (Unidad Deltaica en la Figura 1; corresponde a las unidades Limos Basales y Arenas Basales de IGME, 1982). Se trata de los aportes de la red fluvial pliocena desarrollada en los relieves de la actual Sierra Morena. La Unidad

Deltaica está más desarrollada al N del acuífero que al O. Hacia el SE, bajo la marisma, los sedimentos se van haciendo cada vez más finos y menos permeables y por ello en esta zona se les considera, desde el punto de vista hidráulico, parte del substrato impermeable del acuífero.

- Bajo la marisma, la parte superior de la Unidad Deltaica es sustituida por niveles de gravas de ambiente aluvial y edad entre pliocena y cuaternaria (Unidad Aluvial en la Figura 1). La Unidad Aluvial se desarrolla principalmente bajo la marisma, donde alcanza el centenar de metros de espesor, pero su extensión lateral es limitada y hacia el S se va intercalando con capas de sedimentos mucho más finos (arenas, limos y arcillas) de plataforma marina y estuario y, finalmente, tienden a desaparecer antes de la línea de costa actual. La Unidad Aluvial está recubierta por una capa bastante homogénea (50 a 70 metros de espesor) de limos y arcillas de edad cuaternaria y origen estuarino y mareal (Unidad de Marismas en Figura 1), y está separada del mar actual por el cordón arenoso de Matalascañas-Malandar, también de edad cuaternaria.



Muestreo de CO₂ del suelo en una zona de vegetación natural del manto eólico para determinar la composición isotópica del carbono en la zona de recarga del acuífero. Este parámetro es necesario para interpretar los datos de carbono 14 del agua subterránea y poder estimar razonablemente el tiempo de permanencia del agua en el terreno.

Fotografía: Emilio Custodio.

- En el sector SO del acuífero la Unidad Deltaica está muy poco desarrollada (menos de 15 metros) y la Unidad Aluvial parece estar ausente, al menos en forma de depósitos de grava. Sobre la primera se acumuló un potente depósito (entre 20 y 80 metros) de arenas de tamaño medio procedentes en su mayor parte de la plataforma continental y de los relieves de la costa onubense-portuguesa. Aunque el conjunto se denomina Unidad Eólica (Figura 1), estas arenas tienen distintos orígenes: las más profundas son de origen litoral (playa sumergida), las intermedias de playa emergida y también de origen aluvial y las más someras de origen eólico. En realidad buena parte de estas arenas han sido retrabajadas a lo largo de la historia geológica, pasando de un ambiente sedimentario a otro distinto en períodos posteriores. Las capas más someras, depositadas por el viento durante distintos episodios dunares a lo largo del Cuaternario⁴¹, forman el denominado Manto Eólico Litoral de Doñana^{42,43}, que con una extensión de 400 km² cons-

* Universidad Politécnica de Cartagena

** Universidad Politécnica de Cataluña

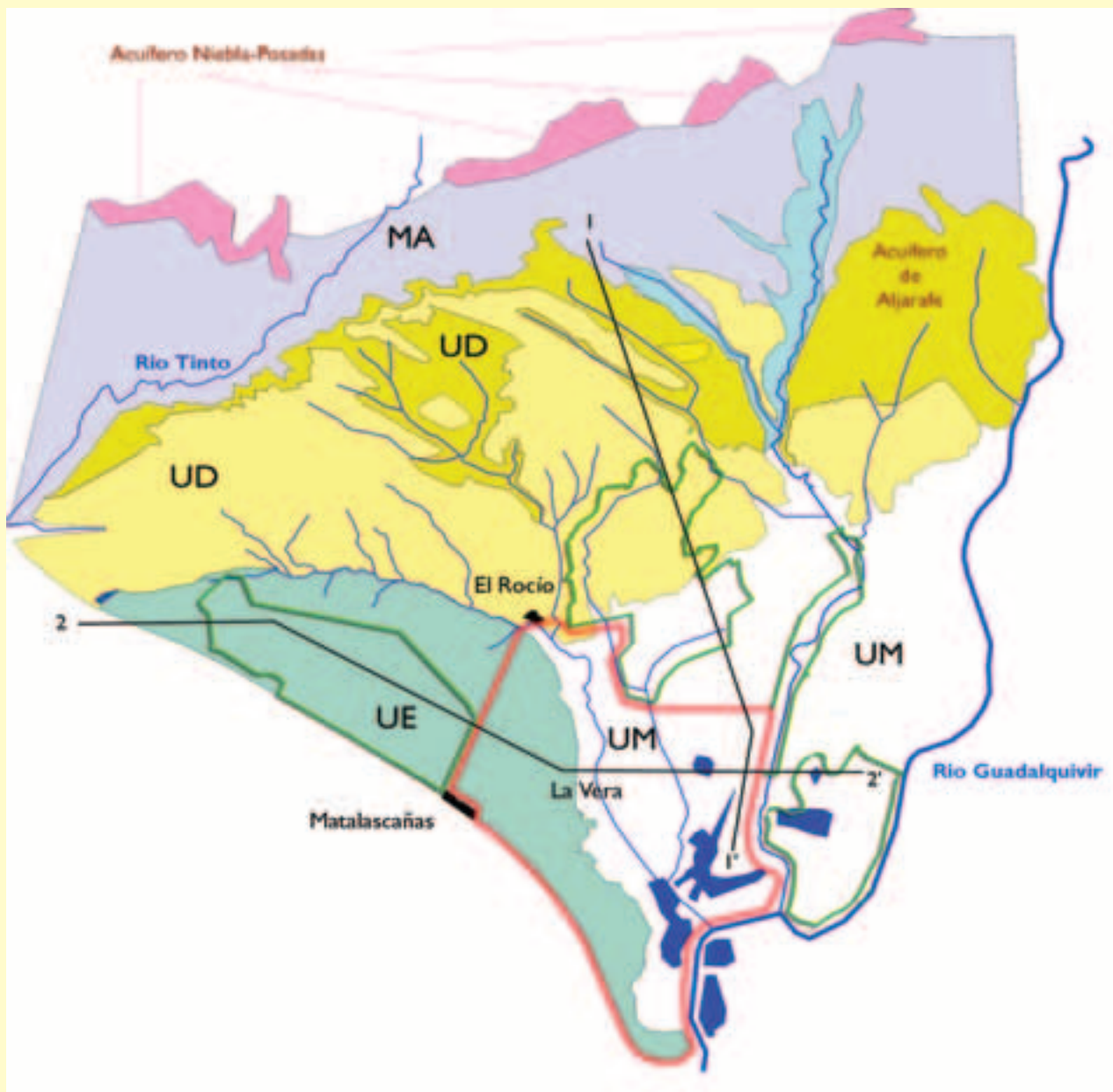


FIGURA 1

Geología regional y geometría del acuífero de Doñana (o Almonte-Marismas).

PLIO-CUATERNARIO		TERCIARIO (Mioceno)	
□	UM Unidad de Marismas. Arcillas	■	MA Margas azules
■	UE Unidad Eólica. Arenas	■	Arenas y limos
■	UD Unidad Deltáica. Limos		▲
■	UD Unidad Deltáica. Arenas		—
■	UA Unidad Aluvial. Arenas y gravas		—
■	Aluvial del río Guadiamar		—

tituye el segundo mayor manto eólico de Europa occidental. En El Abalarío aparece, entre las arenas, una capa de arcillas marinas con niveles de gravilla y arenas que se desarrolla hacia el E hasta enlazar con las arcillas de Marisma. Se trata de una pulsación de la línea de costa hacia el O y, desde el punto de vista hidrogeológico, diferencia el comportamiento de las arenas superiores, que actúan como acuífero libre respecto a las inferiores, que actúan como acuífero semiconfinado⁵³.

A escala regional este conjunto de sedimentos plio-cuaternarios da lugar a dos regiones bien diferenciadas hidrogeológicamente que están, no obstante, en continuidad lateral:

1. *Las arenas*, que ocupan todo el sector occidental desde el río Tinto hasta las marismas del Guadalquivir y se prolongan por el norte hacia Villamanrique de la Condesa hasta el Guadamar, el cual separa el acuífero de Doñana del acuífero del Aljarafe (ver Figura 1). Constituyen el afloramiento de los materiales permeables del sistema acuífero y actúan de impluvio a la recarga de la lluvia. Hasta hace unos diez años se consideraba que todo el sector de arenas era un acuífero libre, pero la construcción de una red de observación piezométrica puntual por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir ha permitido conocer que si bien la parte superior de las arenas y limos contiene el nivel freático (acuífero libre), a mayor profundidad -claramente, al menos, en el sector occidental de arenas- aparecen capas semiconfinadas con distintos niveles piezométricos. Esto origina flujos verticales descendentes y ascendentes en distintos lugares del acuífero, los cuales juegan un papel muy relevante en la generación y el mantenimiento del medio natural mediante descargas permanentes de agua dulce muy poco mineralizada en el borde O de la Marisma y mediante el mantenimiento de la densa vegetación freatófita que aún queda en algunas zonas.

2. *La Marisma*, bajo cuyos sedimentos arcillosos se encuentran las gravas y arenas que constituyen la parte confinada de sector permeable del acuífero. Las arcillas y limos de la Unidad de Marisma también forman parte del sistema acuífero, actuando como acuitardo. Contienen agua salada congénita en sus poros que se ha ido desplazando muy lentamente desde el momento de su formación hasta la actualidad, mediante flujo vertical ascendente hacia la superficie de la Marisma^{51,64}. La parte confinada supone unos 1800 de los 3400 km² de acuífero.

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ACUÍFERO

La única fuente de *recarga* al acuífero es la infiltración de la lluvia que cae sobre las arenas. Los excedentes de riego no generan recarga neta ya que se realiza con aguas extraídas del propio acuífero, pero sí modifican la calidad del agua. La escorrentía superficial sobre el terreno es poco importante para originar recarga. La superficie freática regional (Figura 2a) reproduce fielmente la topografía del terreno, con algunas modificaciones locales debidas a la extracción localizada e intensa de agua subterránea. La figura muestra que los ríos y arroyos son líneas de descarga de agua subterránea, unos permanentes y otros

estacionales. También muestra cómo en el sector occidental de arenas la topografía favorece la formación de un domo piezométrico cuyas cotas máximas (unos 60 metros) coinciden con la zona topográficamente más elevada en el entorno del poblado de El Abalarío. A escala regional buena parte del agua subterránea se mueve desde las arenas y limos hacia el S y hacia el E, es decir, hacia donde el acuífero se transforma en confinado bajo la Marisma; a escala local parte del agua sigue otras trayectorias de recorrido más corto (hacia los arroyos, ríos y lagunas).

El sector SE del acuífero confinado (gravas y arenas) contiene agua con elevado tiempo de permanencia (varios miles de años) y de salinidad inicialmente marina, a veces evaporada en lagunas o lucios, y modificada posteriormente por distintos procesos físicos y químicos^{55,57}. La información que se tiene indica que se trata de agua marina congénita, atrapada en los poros de los sedimentos durante la deposición de éstos en tiempos pasados en los que el nivel marino era más bajo que el actual. Esta masa de agua salina no ha podido ser desplazada hacia el mar por el agua dulce recargada en los últimos miles de años en las arenas debido a la pequeña cota topográfica existente en la zona desde la estabilización del nivel del mar hace unos 6000 años.



Antiguo pozo de brocal de la casa de Don Ignacio en La Vera. En su día era un pozo surgente como mínimo en la época húmeda. En la actualidad no lo es debido al descenso de niveles ocasionado por los bombeos agrícolas de la zona regable al S de La Rocina.
Fotografía: Emilio Custodio

La *descarga* natural del sistema acuífero tiene lugar de varias formas: al mar; a lo largo de toda la franja costera (los numerosos manantiales y rezumes del acantilado de El Asperillo-El Arenosillo son buena muestra de ello, aunque la mayor parte de la descarga ocurre de forma difusa en el litoral⁴⁵); a los arroyos (Las Madres, La Rocina, El Partido, Cañada de la Mayor, Río Loro,..) y los ríos (tramo bajo del Guadamar, Tinto); a lo largo del contacto arenas-arcillas en los contornos N y O de la Marisma; por evaporación directa desde el nivel freático (la escasa profundidad de éste en el sector occidental lo favorece); mediante transpiración de la vegetación freatófita (especialmente en el área entre El Abalarío y La Rocina y entre Los Cotos y la Marisma); en forma de descargas lineales o difusas a caños y arroyos, alimentadas por flujos verticales ascendentes desde tramos relativamente profundos; mediante descarga, en época de niveles altos, a los centenares de humedales (lagunas, algaidas y pequeñas depresiones topográficas) de distinto origen geomorfológico que se hallan en la superficie de las arenas cuaternarias y pliocenas^{55,56,62,63}.

Una parte pequeña, no cuantificada, del flujo de agua subterránea, en vez de descargar antes del contacto con las arcillas continúa su camino hacia el acuífero confinado, donde terminan descargando a la

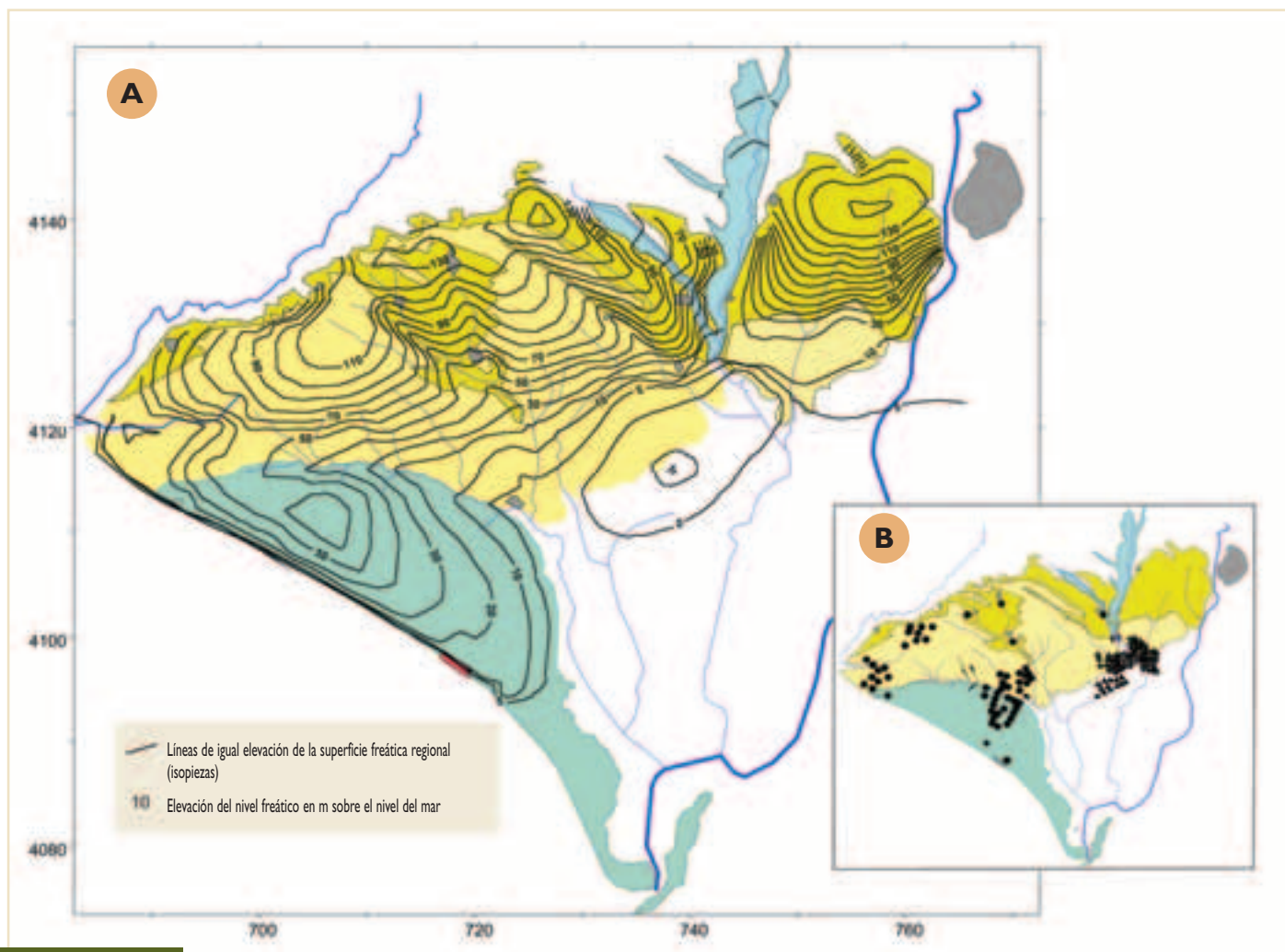


FIGURA 2

A) Piezometría regional representativa de los acuíferos de Doñana y Aljarafe. B) Ubicación de los principales centros de bombeo en el acuífero. Ver leyenda geológica en Figura 1.

superficie de la Marisma mediante flujos ascendentes lentos a través de las arcillas⁵¹. La descarga al mar es poco conocida y posiblemente pequeña, si existe, ya que el acuífero alberga agua salina confinada bajo la Marisma y el cordón litoral de arenas de Matalascañas-Malandar contiene el nivel freático de la recarga local sobre las dunas. El agua subterránea del cordón dunar descarga por un lado hacia el mar y por el otro hacia los distintos tipos de humedales presentes en los corrales interdunares⁴⁴. Pero aunque la conexión hidráulica entre las arenas y las gravas confinadas bajo la Marisma hace que éstas sean niveles acuíferos surgentes (con nivel piezométrico por encima de la superficie del terreno), la posible descarga profunda hacia el mar es más difícil de explicar, ya que el potencial hidráulico del agua dulce a la profundidad de las gravas no basta para compensar la diferencia de densidad con el agua de mar. Este aspecto es actualmente objeto de estudios más detallados.

Este esquema de funcionamiento ha debido ser operativo desde la última estabilización del nivel marino, hace unos 6000 años^{70,71}, hasta hace unos 30 años. Durante las últimas tres décadas el sistema de flujo natural se ha modificado localmente debido a los bombeos intensivos y concentrados justo en zonas de descarga natural del acuífero (Figura

2b): a lo largo del contacto arenas-arcillas de Marisma (alrededores de El Rocío y de Villamarique de la Condesa) y en el sector Mazagón-Palos-Moguer. La concentración espacial de las explotaciones ha producido tres efectos: 1) el descenso local, entre métrico y decimétrico, del nivel freático y de los niveles piezométricos profundos; 2) disminución de la descarga natural y su sustitución parcial por descarga artificial a través de pozos^{48,61,66,67,68,69} y 3) localmente, inversión del gradiente hidráulico y del sentido de los flujos de agua, desplazando muy lentamente las aguas salinas confinadas bajo la Marisma hacia algunas captaciones agrícolas en el sector NE de la misma, las cuales se están salinizando.

La explotación intensiva y localizada de agua subterránea ha tenido distinta incidencia en todo el acuífero, pero localmente (entorno de El Rocío, La Rocina, Villamanrique, Palos, Moguer...) ha ocasionado modificaciones muy relevantes para el medio natural, tales como la reducción del agua disponible para la vegetación freatófita y para los caños de agua dulce que sustentan buena parte de la fauna herbívora en verano (Figura 3), o la modificación de hidropériodo (patrón temporal de inundación) de muchos pequeños humedales del manto eólico, que han disminuido su frecuencia transformándose de permanentes en tempora-

les y de estacionales en interanuales (Figura 4), o incluso han desaparecido, como indican algunos topónimos locales en zonas donde hoy no hay humedales^{54,55,56}. Las extracciones localizadas e intensas de agua subterránea para abastecimiento a ciudades y urbanizaciones turísticas (Matalascañas, Mazagón) y las destinadas a usos medioambientales (Acebuche), tienen también un claro efecto negativo sobre la cota del nivel freático y, por tanto, para las necesidades hídricas del medio natural (vegetación, inundación de humedales)⁵³.

Otra actuación humana que ha contribuido significativamente a un descenso apreciable (de orden decimétrico y alcance espacial kilométrico⁶⁹) del nivel freático y la consiguiente modificación del funcionamiento hidrológico de muchos humedales, ha sido la introducción de especies vegetales alóctonas (v.g. eucaliptus) con mayores necesidades hídricas y mayor accesibilidad de sus raíces al agua subterránea que la que posee la vegetación autóctona. Es el caso del área El Abalarío-La Mediana-La Rocina, donde buena parte de las antiguas descargas de agua freática al conjunto de lagunas de Ribatehilos, Mediana y otras aisladas desaparecieron casi por completo a causa de la introducción de eucaliptus hace unos cuarenta años. La erradicación casi total de estos árboles en esa zona hace una década, dentro de las actuaciones de conservación del Parque Natural de Doñana, favorece la recuperación de buena parte del funcionamiento hídrico original de esas lagunas.

Los tiempos medios de permanencia del agua subterránea en el terreno son muy variables según las condiciones de cada lugar. Mediante el estudio de los isótopos ambientales tritio y ¹⁴C en el agua, el agua se sabe que la transferencia del agua de recarga hasta el nivel freático oscila entre menos de un año y pocos años; que el agua de los manantiales costeros de El Asperillo tiene pocos años de permanencia en el terreno; que el agua de los pozos profundos (menos de 40 metros) del sector de arenas tiene varias decenas de años de permanencia; que las descargas de flujos regionales tienen entre varias decenas y algún centenar de años de permanencia y que los pozos profundos bajo la marisma tienen aguas con edades entre 1000 y 15000 años^{40,49,55}.

COMPOSICIÓN QUÍMICA Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE DOÑANA

La composición química y la calidad natural del agua subterránea es el resultado de un conjunto de factores interrelacionados tales como la geología, el clima, la topografía, los procesos biológicos y el aprovechamiento del suelo, los cuales proporcionan al agua el denominado *fondo químico natural*. El primer factor que contribuye al fondo natural del agua de un acuífero es la composición química de la lluvia que produce la recarga. La lluvia aporta solutos de origen marino y continental y gases en distintas proporciones, dependiendo de la procedencia de los frentes nubosos que producen recarga y de la trayectoria espacial de los mismos. Una vez en el suelo, se produce una concentra-

ción salina por evapotranspiración que es variable de un lugar a otro. A este proceso se suma el conjunto de interacciones agua-terreno que tienen lugar desde el momento de la infiltración de la lluvia y durante el tránsito del agua subterránea por el medio. Los principales procesos son: disolución de CO₂ en el agua durante el paso por la zona edáfica; precipitación y disolución de minerales; adsorción de sustancias disueltas en el agua sobre arcillas, materia orgánica y óxidos de hierro; intercambio iónico de unos solutos por otros, oxidación-reducción; biodegradación; etc. Conocer la composición mineral del medio sólido y la del agua que se está infiltrando es crucial para averiguar las reacciones que se producen



Descarga de agua subterránea al mar a través de rezumes y manantiales en el acantilado de El Asperillo.

Fotografía: Marisol Manzano.

y cuantificar su contribución al fondo químico natural del agua.

El fondo químico natural del acuífero de Doñana, y los procesos que lo originan, se conocen razonablemente por haber sido estudiados con cierto detalle mediante el estudio conjunto de la composición química del agua y de la composición mineral del terreno a distintas profundidades^{49,55,57}. De forma sintética, el origen y las características químicas del agua a escala regional son éstas:

- En las zonas no confinadas del acuífero el fondo químico natural del agua está controlado por:

la composición del agua de lluvia, que es de origen atlántico y composición clorurada-sódica; la concentración salina por evapotranspiración; la disolución de CO₂ edáfico; el equilibrio químico con calcita (CaCO₃), allí donde hay carbonatos (sector de arenas al N de la Marisma y cordón litoral de dunas móviles); el equilibrio químico con sílice y feldespatos allí donde no hay carbonatos (sector E de arenas). Como resultado de estos factores, en el sector occidental de arenas el agua subterránea es de tipo clorurado-sódico, tiene mineralización muy baja y pH ácido (entre 4,5 y 6), debido todo ello a la impronta del aerosol marino que incorpora el agua de recarga y a la práctica ausencia de minerales solubles y fácilmente hidrolizables en el terreno. En el sector de arenas al N de la Marisma las aguas tienen mayor mineralización, son de tipo carbonatado-clorurado-cálcico-sódico y tienen valores de pH claramente básicos (7-8,5) debido a la ubicua presencia de restos de carbonatos. En el cordón arenoso litoral los pH son también básicos por la presencia de restos de conchas en las arenas, pero las aguas suelen ser cloruradas-sódicas por la mayor contribución salina del aerosol marino a las dunas.

- En el tránsito arenas-acuífero confinado, el fondo químico natural del agua cambia principalmente debido a la mezcla con el agua marina antigua presente bajo la Marisma. Además de aumentar progresivamente la salinidad del agua bajo la Marisma, esta mezcla va acompañada de procesos geoquímicos tales como intercambio iónico de Na con Ca y Mg en el frente de mezcla, la reducción de sulfatos al hacerse anóxico



La comarca de Doñana se caracteriza por la extraordinaria abundancia de humedales. Estos humedales tienen origen geomorfológico y funcionamiento hidrológico muy distintos, pero la mayor parte de ellos depende directamente del agua subterránea. El principal factor de control del funcionamiento y, por tanto, de la ecología de estos humedales, es la hidrología. En la imagen, vista de la Marisma inundada desde la Vera.

Fotografía: José María Pérez de Ayala.

el medio y precipitación/disolución de calcita. Las aguas resultantes tienen mineralizaciones que oscilan entre moderadas y muy elevadas, incluso superiores a la del agua de mar, están desprovistas de sulfato, pueden contener metano y, por efecto del intercambio iónico en las arcillas, son localmente más duras (exceso de Ca y Mg) o más blandas (exceso de Na) de lo que corresponde a una simple mezcla.

Las arcillas de la Unidad de Marismas también contienen agua mucho más salina que la del mar. La elevada salinidad de los 40-50 m superiores de las arcillas se ha explicado como el resultado de la evaporación de agua del mar en superficie, cuando la Marisma era mareal, y el posterior transporte vertical descendente de estas sales a través de los poros de las arcillas^{51,64}.

La composición química del agua subterránea es muy estable a escala regional y, en la mayor parte del acuífero, también a escala local. No obstante, en algunos lugares del manto eólico, y de forma localizada, flujos poco profundos de agua subterránea muestran cambios químicos temporales de salinidad, pH y composición iónica considerables. Estos cambios se producen principalmente cerca de las lagu-

nas de Los Cotos y en La Vera. El motivo es que en el entorno de ciertas lagunas se generan sistemas de flujo de agua subterránea de carácter regional o local dependiendo de la época del año (seca o húmeda), del nivel de inundación de las lagunas y de la posición del nivel freático^{52,53}. Adicionalmente al cambio de escala de la red de flujo, a lo largo del año tienen lugar cambios químicos importantes en el agua de las lagunas que se transmiten al agua freática del entorno. Por ejemplo, la fuerte evaporación de la época seca ocasiona la precipitación y acumulación de sales (cloruro sódico, sulfato cálcico, quizá también carbonato cálcico) en la zona inundable de las cubetas, en muchos casos acompañadas de reducción de los sulfatos del agua a sulfuros y acumulación de estos en forma sólida en los sedimentos de fondo lagunar. En la época húmeda buena parte de estas sales son redisueltas e incorporadas al agua freática local junto con los sulfuros, de nuevo oxidados a sulfatos (no en todas las lagunas), modificando así la salinidad total del agua freática y, eventualmente, su composición iónica. Otro proceso frecuente es la puesta en solución del abundante hierro retenido en las pátinas de las arenas al disminuir el potencial redox y aumentar la aci-

FIGURA 3

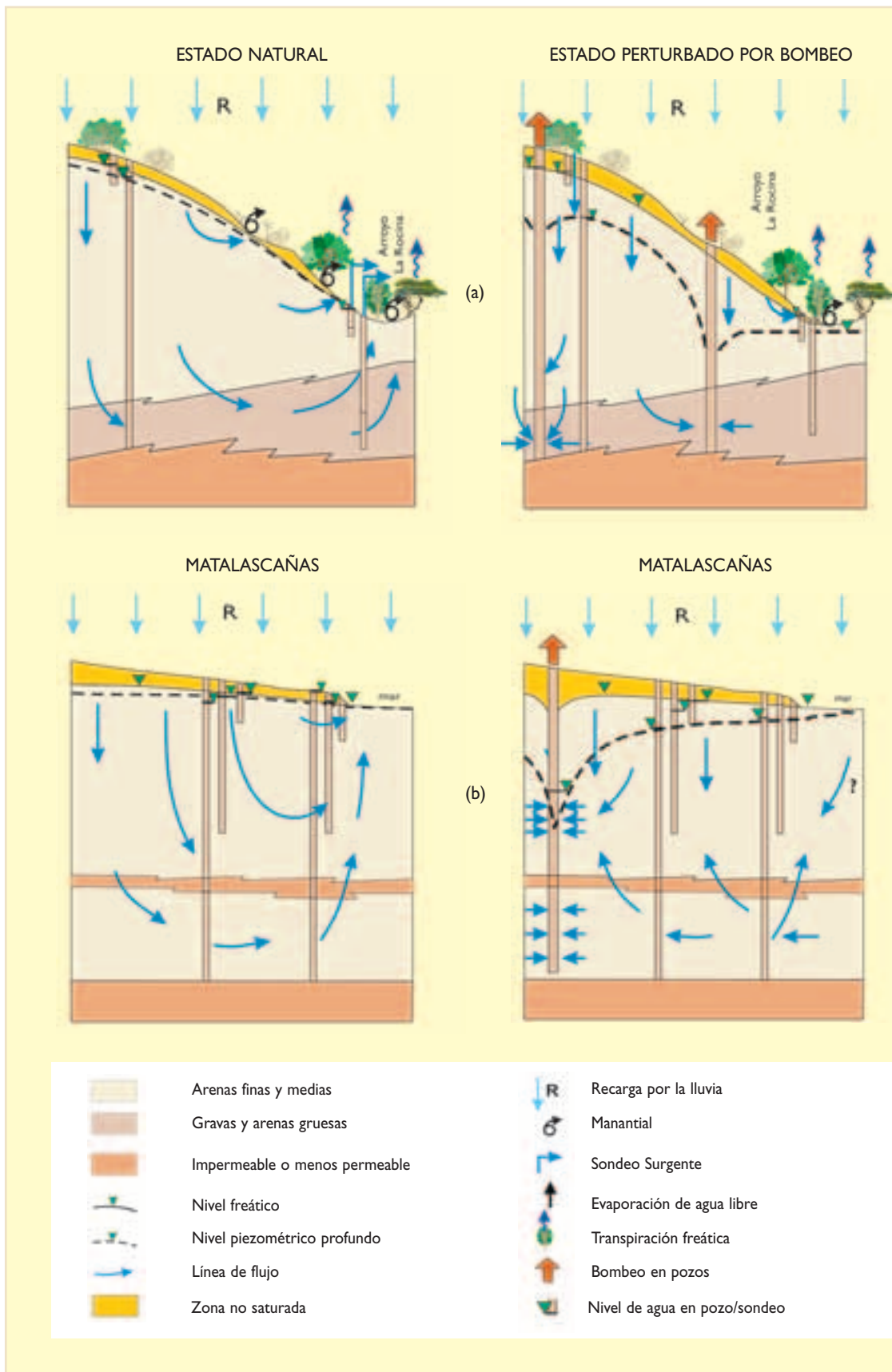


Ilustración simplificada del efecto de los bombeos en el entorno de El Rocío y Matalascañas. En ausencia de bombeos (estado natural, figuras de la izquierda) el agua que se recarga en las arenas fluye hacia la parte más profunda del acuífero y luego asciende, de forma localizada, en las proximidades de La Rocina y del mar, descargando en ambos lugares. En estado perturbado por bombeos (figuras de la derecha) los niveles piezométricos de las capas profundas y el nivel freático de las arenas superiores están deprimidos, el gradiente hidráulico entre ellos ha aumentado y la mayoría de los flujos de agua son ahora descendentes, disminuyendo así la descarga natural a La Rocina y al mar. (Modificado de Custodio y Palancar, 1995).



dez del agua en el entorno de los frecuentes niveles turbosos de fondos lagunares antiguos y recientes. Todos estos cambios químicos, que suelen ocurrir con las primeras lluvias tras una época seca prolongada, son rápidos y se transmiten al agua freática del entorno lagunar al aumentar la cota del agua en la laguna respecto a la del nivel freático

adyacente. Estas aguas freáticas descargan a las depresiones locales de la superficie del terreno (otras lagunas, caños, borde de marisma) tras recorridos cortos, poniendo así de manifiesto los cambios ocurridos en o cerca de las lagunas.

La vegetación natural, tanto la que depende de la humedad del

suelo como la que depende del agua freática, está adaptada a la química del agua. Así, en el sector O de arenas hay especies adaptadas a aguas ácidas, poco mineralizadas y pobres en nutrientes; en el sector N de arenas las pocas especies naturales que quedan están adaptadas a aguas alcalinas, aunque también escasas en nutrientes; en el entorno de las lagunas con alta tasa de evaporación, y en sectores costeros del manto eólico, la vegetación está adaptada a aguas salinas.

El fondo químico natural del agua subterránea explicado hasta aquí está ya localmente modificado por la actividad humana. Así, en los niveles menos profundos de las zonas no confinadas en arenas (menos de 40 metros) aparecen agroquímicos (principalmente nitratos, y también cabe esperar plaguicidas, otros nutrientes, metales usados en los fitosanitarios,...) y contaminantes industriales (principalmente metales pesados, procedentes por vía atmosférica del polo industrial de Huelva y quizá de las actividades mineras a cielo abierto en la franja pirítica), introducidos en el acuífero por el agua de recarga tras incorporar polvo y gases atmosféricos^{49,57}. Algunos pozos agrícolas que explotan capas confinadas a 40-50 metros de profundidad en el NE de la Marisma tienen nitratos agrícolas que han alcanzado la zona de captación por flujo descendente a través del terreno o por entrada directa por el espacio entre la entubación y el terreno. Lo observado es coherente con los tiempos de residencia calculados mediante tritio, que son de pocos años para las aguas más someras y de más de 40 años para las líneas de flujo más profundas de 35-40 metros⁴⁵. En las zonas confinadas la composición del agua es principalmente fondo natural.

Aunque la información relativa a la contaminación del agua de ríos y arroyos es escasa, los datos existentes indican que ciertas sustancias procedentes de la actividad humana han alcanzado también las áreas



“Ojo de marisma”, área de surgencia de flujos ascendentes de agua subterránea desde niveles de arena confinados bajo las arcillas de la Marisma.

Fotografía: Emilio Custodio.

protegidas. Así, los arroyos y ríos que fluyen hacia la Marisma desde el N llevan metales y compuestos orgánicos derivados de la industria alimentaria y agrícola local (Almonte, Hinojos, Pilas,...). Algunas sustancias se originan muy cerca de las zonas protegidas: en el sector de arenas al SO de El Rocío buena parte de los excedentes de riego, con elevados contenidos en sulfato, nitrato y probablemente plaguicidas y otros productos agroquímicos, descarga a los pequeños arroyos cuyas cabeceras cruzan la zona en cultivo. Estas aguas terminan en La Rocina o en La Vera, zonas ambas muy vegetadas y de relevante valor ecológico debido, en gran medida, a ser áreas de descarga de aguas subterráneas de largo recorrido y calidad excelente.

LOS HUMEDALES DE DOÑANA

Y SU RELACIÓN CON EL ACUÍFERO

Como ya se ha dicho, la comarca de Doñana se caracteriza por la extraordinaria abundancia de humedales. Estos humedales tienen origen geomorfológico y funcionamiento hidrológico muy distintos, pero la mayor parte de ellos depende directamente del agua subterránea^{45,55,59,60}. Existe una buena aproximación a su clasificación genético-hidrológica, paso imprescindible para la gestión de estos humedales^{62,63}.

El principal factor de control del funcionamiento y, por tanto, de la ecología de estos humedales, es la hidrología⁴⁶. Este término comprende factores tales como el origen del agua del humedal, el modo de vaciado de mismo, su hidroperiodo (frecuencia y permanencia de la inundación), la mineralización del agua y el tipo iónico^{54,55}. Debido a la dependencia que del agua subterránea tiene buena parte de los humedales de Doñana, un factor determinante de la hidrología de los mismos es la ubicación de los humedales respecto al flujo regional en el acuífero. En función de otros factores más locales la variedad de tipos genético-hidrológicos es grande; no obstante, es posible establecer unos pocos tipos hidrológicos principales y sus características mayores, que a grandes rasgos son⁵⁶:

- En el área de recarga regional al acuífero, sobre las arenas, abundan los humedales permanentes y temporales originados en época húmeda por descargas locales de aguas freáticas a pequeñas depresiones eólicas, erosivas o simplemente morfológicas (como los corrales) entre las dunas antiguas y actuales. Esto se debe a que, salvo en las áreas donde se explota el acuífero, en general el nivel freático es poco profundo e intercepta con facilidad la topografía del terreno. En época seca la evaporación freática directa y la transpiración vegetal hace descender la posición del nivel freático lo suficiente como para que éste quede bajo la superficie del terreno. En estas condiciones, lluvias esporádicas pueden acumular pequeñas láminas de agua en esos humedales, que se mantienen colgadas durante un tiempo gracias a la relativa impermeabilización del vaso lagunar por los restos orgánicos y material fino acumulados, y que desaparece habitualmente por evaporación. Debido a los cambios de uso del suelo y a la explotación de aguas subterráneas, hoy en día quedan pocos humedales sobre arenas que sean permanentes de forma natural (Dulce, Santa Olalla, Las Madres), y la mayoría lo son de forma artificial, bien por alimentación externa (El Huerto, Las Pajas, Acebuche), bien por excavación del vaso, habitualmente mediante zacallones, excavaciones locales para tener acceso permanente al agua freática (Alamillo, Moguer...).

Algunos humedales sobre el sector O de arenas se alimentan de agua vadosa, flujos temporales de corto recorrido en la zona no saturada del terreno, por encima del nivel freático regional, que se forman tras episodios lluviosos. En su camino descendente hacia la zona saturada del terreno estas aguas pueden eventualmente encontrar horizontes de menor permeabilidad (edáficos, fondos lagunares, turbas, etc.) que faci-

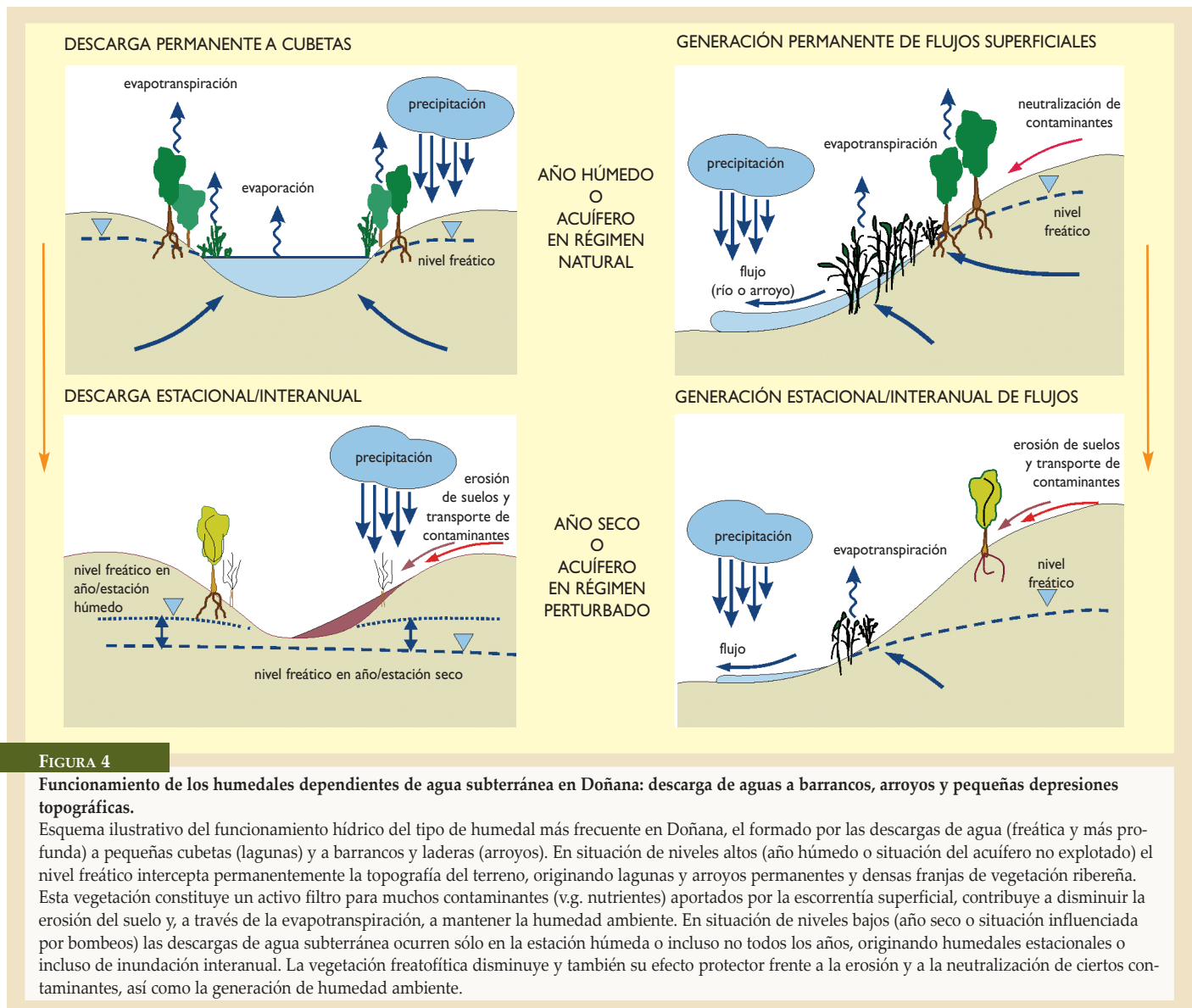


FIGURA 4

Funcionamiento de los humedales dependientes de agua subterránea en Doñana: descarga de aguas a barrancos, arroyos y pequeñas depresiones topográficas.

Esquema ilustrativo del funcionamiento hídrico del tipo de humedal más frecuente en Doñana, el formado por las descargas de agua (freática y más profunda) a pequeñas cubetas (lagunas) y a barrancos y laderas (arroyos). En situación de niveles altos (año húmedo o situación del acuífero no explotado) el nivel freático intercepta permanentemente la topografía del terreno, originando lagunas y arroyos permanentes y densas franjas de vegetación ribereña. Esta vegetación constituye un activo filtro para muchos contaminantes (v.g. nutrientes) aportados por la escorrentía superficial, contribuye a disminuir la erosión del suelo y, a través de la evapotranspiración, a mantener la humedad ambiente. En situación de niveles bajos (año seco o situación influenciada por bombeos) las descargas de agua subterránea ocurren sólo en la estación húmeda o incluso no todos los años, originando humedales estacionales o incluso de inundación interanual. La vegetación freatofítica disminuye y también su efecto protector frente a la erosión y a la neutralización de ciertos contaminantes, así como la generación de humedad ambiente.

tan su desplazamiento lateral frente al vertical, descargando a las pequeñas depresiones del terreno que encuentran en su trayectoria.

Atendiendo a la química del agua, los humedales ubicados en la zona de recarga tienen aguas de mineralización muy variable espacial y temporalmente, y en general son de tipo clorurado-sódico o intermedio entre éste y el bicarbonatado-cálcico. Los cambios temporales de mineralización y tipo iónico dependen, sobre todo, de cambios en el balance entre las entradas y las salidas de agua y de las reacciones químicas que ocurren en el seno de la laguna, en las cuales el papel de la biota es crucial.

Sea cual sea el origen del agua y su permanencia, todos los humedales que hay sobre las arenas mantienen especies vegetales acuáticas y freatofíticas que durante centenares o miles de años han contribuido a retener las arenas eólicas, ayudando así a crear el extenso y vegetado manto eólico litoral de Doñana.

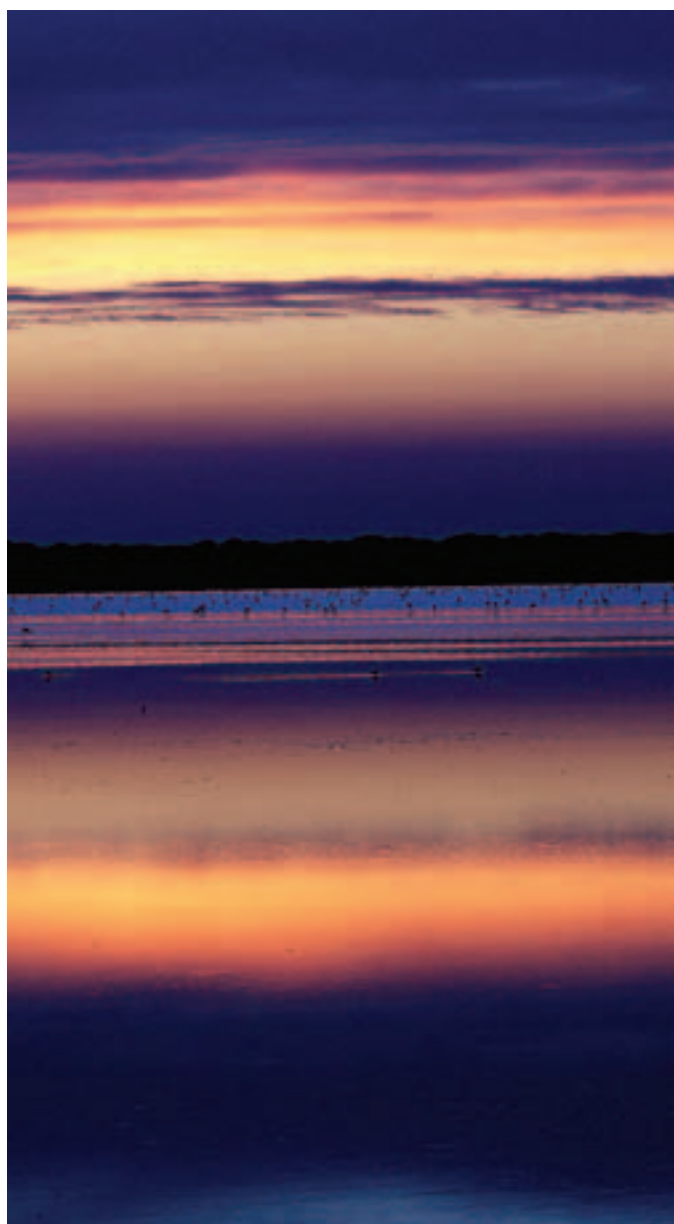
- Los humedales ubicados en las zonas de descarga del acuífero son en su mayoría suelos húmedos densamente vegetados, con o sin lámina

libre de agua, ubicados en las partes bajas de los arroyos (algaidas). En condiciones naturales suponen una descarga permanente de agua freática que permite mantener todo el año vegetación acuática y freatofítica. Es el caso de los pequeños arroyos, caños y cañadas que descargan a La Rocina y a la Marisma por La Vera y La Retuerta, y también el de algunos arroyos permanentes, barrancos y manantiales que descargan al mar por el acantilado occidental de El Asperillo (río Oro, etc.). También La Rocina es un drenaje lineal de agua subterránea, tanto freática como profunda, que mantiene un bosque de ribera relativamente bien conservado. Los arroyos que descargan a la Marisma por el N (El Partido, Cañada de la Mayor, etc.) tenían una densa vegetación de ribera alimentada por agua freática, pero en este caso la vegetación fue eliminada hace tiempo para utilizar el terreno en cultivos y vías de comunicación; su caudal, sobre todo en el tramo bajo, es de origen freático la mayor parte del año, ya que la escorrentía de la lluvia sólo es importante con lluvias intensas.

En general tienen aguas de mineralización media a alta, variable a lo

largo del año debido a procesos locales de evaporación y reacciones químicas, ya que los aportes de agua subterránea son de composición muy estable.

- También en la zona de acuífero confinado hay diversos tipos de humedales. Algunos son de alimentación subterránea en origen, ya que la Marisma, antes mareal y hoy fluvial, recibe agua de los ríos y arroyos que a su vez drenan el acuífero de las arenas al N y NO. Entre los distintos humedales de la Marisma están: encharcamientos estacionales de aguas dulces a salinas que son residuo de la inundación invernal; encharcamientos permanentes (lucios) de aguas también dulces a salinas procedentes en parte de la descarga del agua freática del cordón arenoso litoral y en parte de la inundación invernal (algunos lucios se mantienen hoy artificialmente alimentados con agua subterránea bombeada desde las gravas y arenas confinadas); pequeñas áreas circulares de arenas permanentemente saturadas por flujos de agua subterránea ascendente desde niveles arenosos más o menos profundos (ojos de marisma);



humedales mareales, de los que actualmente sólo queda uno en la margen derecha del Guadalquivir, cerca de la desembocadura.

Buena parte de la extraordinaria biodiversidad por la cual es conocida Doñana en todo el mundo es el resultado de combinar los distintos tipos hidrológicos de humedales con su ubicación, la salinidad del agua y el tipo químico de la misma.

La extracción intensiva de agua subterránea durante más de dos décadas, localizada en zonas de descarga natural del acuífero, ha ocasionado descensos locales acumulados de los niveles piezométricos profundos que a su vez han supuesto un descenso del nivel freático. Estos descensos no están aún estabilizados, y lo que se observa es una situación transitoria hasta que los niveles alcancen una nueva posición de equilibrio de acuerdo con la actual relación entre la recarga y la descarga del acuífero. Estos descensos suponen una disminución de la descarga por rezumes en el contacto arenas-arcillas, la desaparición de las condiciones de surgencia en pozos y sondeos de La Vera que hace años eran surgentes, la disminución del goteo ascendente a través de las arcillas de marisma y la formación de un cono de depresión piezométrica de grandes dimensiones en el sector NE de la Marisma, el cual ha inducido el desplazamiento de agua salina de S a N y la consecuente salinización.

Los humedales situados cerca de las zonas de descarga regional del acuífero (alrededor de la Marisma y en el borde O) son los más vulnerables al efecto sobre los niveles freáticos y piezométricos de las extracciones de agua subterránea intensivas y concentradas en esas zonas, pero no son los únicos. Los humedales del sector El Alamillo-El Acebuche-El Abalario-La Mediana también han resultado afectados por el descenso freático resultante de combinar los bombeos agrícolas junto a La Rocina y el incremento de la evapotranspiración freática tras la introducción de eucalipto en la zona hace algunas décadas. La vegetación freatofítica de los Cotos, La Vera y el contorno N de la Marisma también ha experimentado las dificultades para alimentarse del nivel freático que ahora es más profundo, secándose muchos ejemplares. Como consecuencia de ello, muchos pequeños humedales situados cerca de las áreas cultivadas (El Acebuche; El Alamillo; El Peladillo; La Mediana y La Rocina, hacia el O; Villamanrique y Guadamar, hacia el N) que hace 20 o 30 años eran permanentes, son hoy estacionales o incluso esporádicos, inundándose sólo en años muy húmedos.

Un efecto adicional del descenso freático localizado en los bordes de la Marisma es la disminución de la descarga de agua a los múltiples arroyos, caños, etc. cuyos aportes, ya sea directos o a través de La Rocina, son relevantes para la Marisma en época seca. Muchos que antes eran permanentes son ahora estacionales y, además, llevan agua procedente de los excedentes de riego, lo que significa que introducen nutrientes, materia orgánica, plaguicidas, etc. en zonas de alto valor ecológico. Adicionalmente cambia la distribución de la duración de épocas secas y épocas húmedas, relativa a la accesibilidad de la vegetación al agua freática^{46,69}.