

# Las marismas del Parque Nacional de Doñana

La diversidad y elevada productividad de las comunidades vegetales de la marisma dependen de un frágil equilibrio con las variables del medio físico y los consumidores. La pérdida de heterogeneidad ambiental amenaza el futuro de estas comunidades

Luis Clemente, Luis-Ventura García, José Luis Espinar, Juan S. Cara y Adela Moreno

**P**ara entender el proceso de formación de las actuales marismas del Guadalquivir, hay que remontarse al final de la transgresión flandriense, que se inició hace 18.000 años. Durante ese episodio, el nivel del mar ascendió unos 120 metros, invadiendo el continente y organizando grandes estuarios a partir de las desembocaduras de los ríos.

Comenzó así a configurarse el nuevo litoral, cuyo principal agente formador era la corriente de deriva que, con dirección oeste-este, aportaba grandes cantidades de arenas provenientes de la erosión y arrastre de materiales del farallón costero. Se formaron barras arenosas (spits), adosadas a la margen derecha de los ríos, que ocasionaron el cierre de la desembocadura de los cauces menos caudalosos y la creación de lagunas litorales. La datación de la turba acumulada en algunas de estas lagunas (Las Madres) permite establecer el final de la transgresión flandriense, y la correspondiente estabilización del litoral, en 6000 años antes de la actualidad, aproximadamente.

En la zona que hoy ocupa el Parque Nacional de Doñana no existen indicios de esta primera fase pro-

gradante, que se supone enterrada por el avance dunar hacia el NE. La formación litoral más antigua aflorante en la marisma de Doñana está representada por los cordones de Carrizosa-Veta la Arena, cuya datación con  $C^{14}$  revela una antigüedad de 4735 años. Su orientación NE, perpendicular a la dirección de las barreras principales, evidencia un primer episodio erosivo con entrada del mar en el estuario y señala el inicio de la formación de una marisma protegida del mar por los cordones mencionados.

Se produjo luego una segunda fase progradante, a la que se asocia una malacofauna típicamente estuarina. Su datación mediante  $C^{14}$ , en los sedimentos adosados a Carrizosa y Mari López, nos remonta entre 3200 y 3500 años atrás. La disposición de estos depósitos muestran ya una marisma parcialmente emergida. Y siguió el proceso de colmatación del estuario hasta el advenimiento de una nueva fase erosiva.

Se refleja el período erosivo en la orientación de los cordones arenosos de Vetalengua y Las Nuevas, formados hace unos 1800-2000 años. Coincidiendo con esta fase, tiene lugar el establecimiento del asentamiento romano del Cerro del Tri-

go, que abarcaría desde el siglo II d.C. hasta la segunda mitad del siglo V. Los historiadores latinos de la época hablan de la existencia del lago "Ligustinus" en la desembocadura del Guadalquivir, esto es, una marisma mareal surcada por caños navegables, incluso en marea baja.

A esa fase progradante le sucedió otra. Se caracterizó por el crecimiento de las formaciones litorales, el retroceso de acantilados y el incremento de la colmatación del estuario. Se formaron entonces los cordones de la Marismilla, de dirección SSE, de hace unos 1775 años los más antiguos. La presencia de los cordones forzó un desplazamiento de la desembocadura del Guadalquivir hacia el sudeste, llegando a la flecha litoral de la Algaida (margen izquierda) en torno al año 1000 de nuestra era. Las pruebas de este desplazamiento quedan reflejadas en los extensos lucios de la marisma de Doñana (Membrillo, Ansares y Rey).

La coincidencia de este cierre con el incremento de la influencia humana en la cuenca, que aumentó la carga de sedimentos del río por la erosión edáfica asociada a la agricultura y deforestación de la cuenca,





colmatación del estuario  
su progresiva indepen-  
de la influencia marina,  
u continentalización.

no episodio erosivo dio  
aparición de los cordo-  
Plancha, hace 1175 años;  
la última fase progra-  
desde hace unos 1000  
a nuestros días. En esta  
n formado los cordones  
nto y un importante manto

os ahora a una intensifi-  
a deriva litoral y a la ero-  
parte terminal de los cor-  
an Jacinto, con aparición  
s de dirección NE que se  
n el canal del Guadal-  
e proceso, que recuerda  
s erosivos precedentes,  
relacionado con una ten-  
ual de ascenso del nivel  
la que apuntan diversos  
máticos. Durante esta úl-  
progradante, la marisma  
ado colmatándose, hasta  
e que la marea, percep-  
época muy reciente en  
marismeños, sólo afecta

1. LOS APORTES DEL CAÑO de la Madre de la Marisma del Rocio son actualmente los más significativos, de carácter fluvial, que recibe la marisma de Doñana, por la zona NO. La prolongada acción de las aguas ácidas y muy poco salinas, provenientes del Arroyo de la Rocina, han propiciado el desarrollo de suelos singulares (vertisoles) y la presencia de especies que no resisten los niveles de salinidad, ni la dinámica de inundación que imperan en la mayor parte de la marisma del Parque.

ya al Guadalquivir y, en menor medida, al Brazo de la Torre.

En definitiva, se pasó de una situación exorreica a otra endorreica, de una marisma fluvio-mareal a una marisma esencialmente pluvial. Este cambio aceleró la colmatación, acentuada durante el último siglo por la actividad agrícola y la deforestación de las riberas que desaguan en la marisma.

### Dinámica de inundación

Como resultado de los procesos descritos, la actual marisma de Doñana puede calificarse de muy evolucionada o senescente. Se comporta como una llanura de inundación estacional con escasa influencia mareal, sobre todo desde la construcción, en 1984, del dique “Montaña

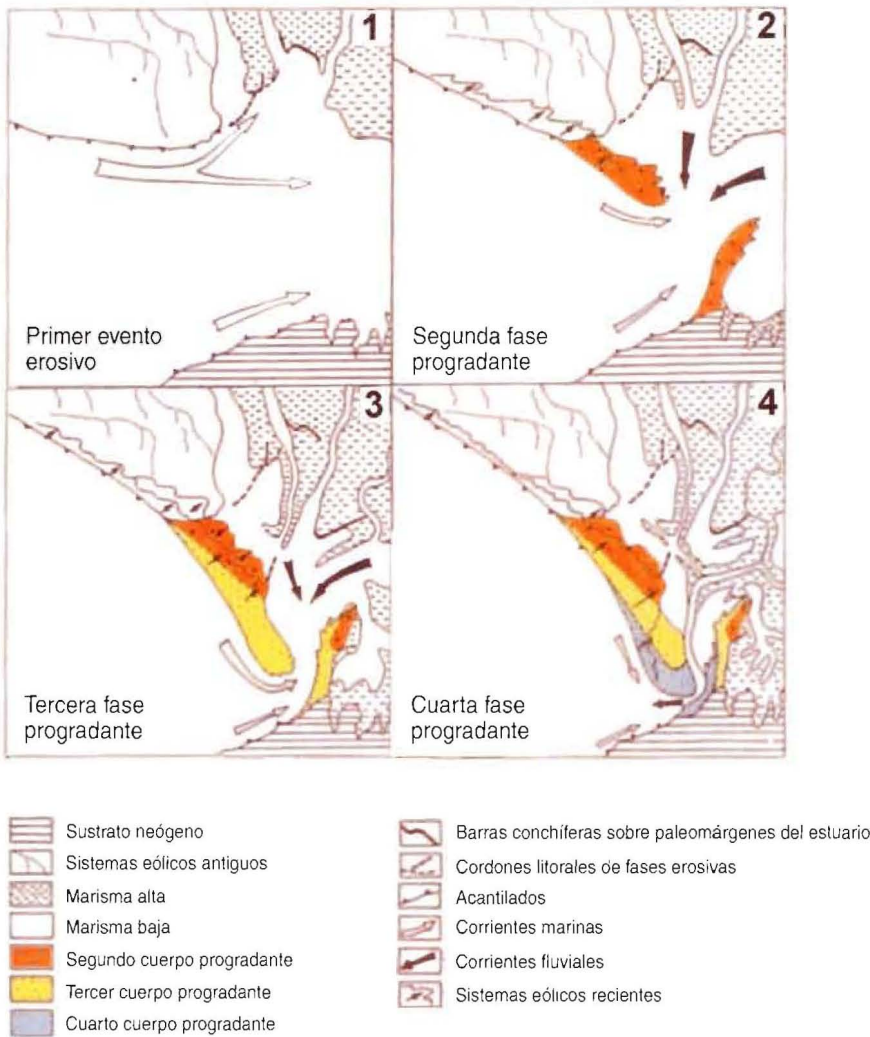
del Río”, que discurre paralelo al cauce del Guadalquivir.

A mediados del siglo pasado, se inició la última y más drástica serie de transformaciones que terminaron por reducir los aportes hídricos superficiales a menos de un tercio de sus valores anteriores. Debido a ello se alteró profundamente el balance hídrico de la marisma. La principal merma en la entrada de agua derivó del encauzamiento y desviación hacia el Guadalquivir de diversos cursos fluviales que hasta entonces desaguan en la marisma; quedaron sólo los aportes de los arroyos de la Rocina y del Partido, junto con los de la precipitación directa.

Desde los años cincuenta, se opera, en efecto, un cambio cualitativo en



2. ETAPAS DE FORMACION de la Marisma del Parque Nacional de Doñana durante el Holoceno (según A. Rodríguez, 1998).



la distribución espacial, régimen de circulación y persistencia del agua en la marisma de Doñana. La marisma ha venido acentuando su carácter endorreico, recibiendo los aportes de agua más concentrados y perdiendo gradualmente espesor la lámina de agua, por evapotranspiración, hasta su total desecación durante el verano.

Dos hechos clave diferencian este régimen hidrológico del régimen de inundación anterior. En primer lugar, la persistencia de la inundación y de la humedad superficial del suelo pasó a depender del espesor que alcanzase la lámina de agua en la estación húmeda. Antes, era posible un mantenimiento más prolongado de la humedad de las zonas deprimidas, particularmente en los caños, merced a las distintas aportaciones de los cursos que en ellos desagaban. En suma, podían mantenerse húmedas las zonas de-

primidas sin necesidad de que la lámina de agua alcanzara un espesor excepcional y anegara las zonas elevadas. En segundo lugar, la reducción de la circulación superficial en los antiguos caños, que recibían aportes de los arroyos y terminaban evacuando en el estuario, ha determinado un menor lavado y eliminación de las sales solubles que ascienden por capilaridad desde la capa freática. Al acentuarse el carácter de cubeta de evaporación, los solutos se concentran en los suelos de zonas deprimidas; se producen acúmulos superficiales de sales solubles que, en algunos casos, forman depósitos de varios centímetros de espesor.

Estas tendencias se vieron acentuadas a partir de 1984, cuando se construyó en la zona sur el dique mencionado para contener el drenaje natural hacia el Guadalquivir, al sobreelevar la cota natural de

desagüe. Con ello se lograba retener el doble de agua en la marisma, aumentar en casi un 20% la superficie inundada y, por tanto, retrasar su desecación durante el verano. Tras la extensión del dique hacia el norte, en 1998, para prevenir la posible contaminación derivada del accidente de las minas de Aznalcóllar, la marisma se ha convertido en un compartimiento prácticamente estanco, susceptible de quedar sumergida en años de precipitaciones muy superiores a la media. El drenaje depende ya de su regulación a través de compuertas.

### Geomorfología

Actualmente, la marisma de Doñana es una extensa planicie aluvial de unos 300 km<sup>2</sup> con morfología típica de llanura de inundación de leve altitud (no supera en general los dos metros sobre el nivel del mar) y suave pendiente (inferior al 2 por mil). El microrrelieve, de orden decimétrico, representa el criterio básico para su diferenciación en unidades geomorfológicas, por ser la característica que mejor expresa tanto la diversidad morfológica y funcional actual como la génesis de los elementos del paisaje.

En la marisma se han distinguido tradicionalmente tres unidades en función de la microtopografía: bancos, zonas de transición y depresiones. Estas unidades reflejan la dinámica geomorfológica ocurrida durante el Holoceno, comentada al principio.

Los bancos, que allí se denominan "paciles" y "vetas", son las zonas más elevadas. No suelen quedar anegadas, salvo en épocas de avenida. Los paciles, de textura arcillo-limosa, se corresponden con elevaciones ("levées") de los caños que divagan por la marisma, algunos de los cuales han dejado de funcionar. Las vetas, elevaciones más o menos aisladas y de dimensiones reducidas, presentan muy diversa naturaleza y origen: las arcillosas son restos fragmentados y erosionados de antiguos paciles y las arenosas con malacofauna, restos de



formaciones litorales antiguas que han quedado incluidas dentro de la marisma. Aunque también aparecen vetas arenosas sin conchas que derivan de dunas superpuestas a dichas formaciones litorales.

Las zonas de transición o “quebradas”, de elevación intermedia, tienen su origen en la colmatación por materiales limo-arcillosos de antiguas depresiones y cauces. Actualmente, la lámina de agua apenas llega a alcanzar un palmo en los años normales.

Las zonas deprimidas, donde la inundación persiste durante muchos meses y alcanza cerca de un metro de profundidad en años lluviosos, se corresponden con los caños y lucios. Los primeros son restos de antiguos canales de marea colmatados que, ahora, operan sólo como cauces temporales. La mayoría de ellos han sido truncados por la acción humana y se limitan a acumular las aguas de precipitación. Los lucios, depresiones de morfología lagunar y profundidad variable, derivan de la fragmentación de antiguos cauces fluvio-mareales abandonados.

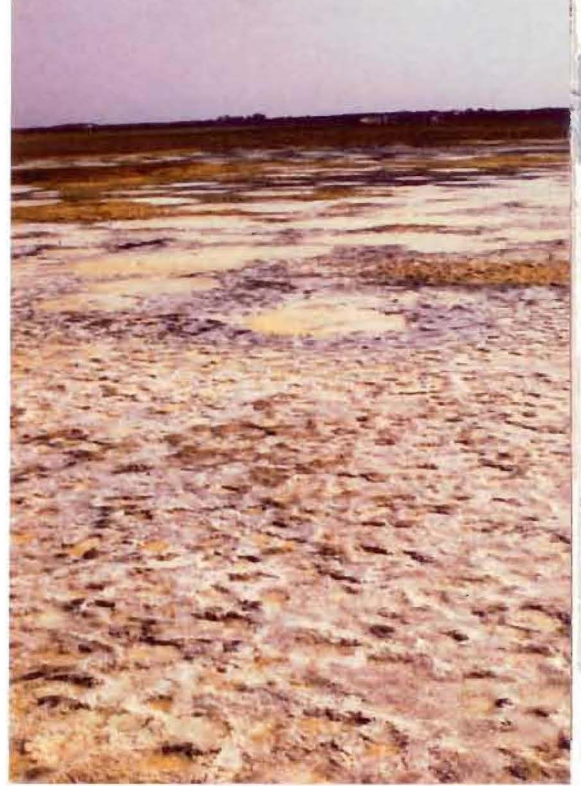
#### Cuatro tipo de suelos

La diversidad y distribución geográfica de los suelos de la Marisma de Doñana guarda una estrecha relación con la de las unidades y subunidades geomorfológicas. De he-

3. LAS DEPRESIONES ENOORREICAS de la marisma tienden a comportarse como sumidero de agua y solutos. Al final de la estación seca se forman acúmulos superficiales de sales solubles —en las que predominan los cloruros de sodio y magnesio— que excepcionalmente llegan a formar costras de varios centímetros de espesor, con la creación consiguiente de suelos extremadamente salinos. Ello impide el establecimiento de los vegetales.

cho, puede afirmarse que la evolución geomorfológica suministra el marco a la evolución de los suelos.

Las características fundamentales de los suelos de la marisma vienen determinadas, en última instancia, por el carácter reciente de los sedimentos, a partir de los cuales se han desarrollado (suelos estratificados y poco evolucionados), por las propiedades físico-químicas de los mismos (arcillo-limosos, calcáreos y salinos) y por el régimen hidrosalino (que depende de la posición geográfica y fisiográfica del punto). Tiene importancia local la presencia de materiales de otra naturaleza (depósitos de arenas conchíferas o silíceas), la influencia de surgencias del nivel freático (“ojos”), la existencia de corrientes de agua dulce y, en pequeños enclaves del sur, la influencia mareal (“playas”).



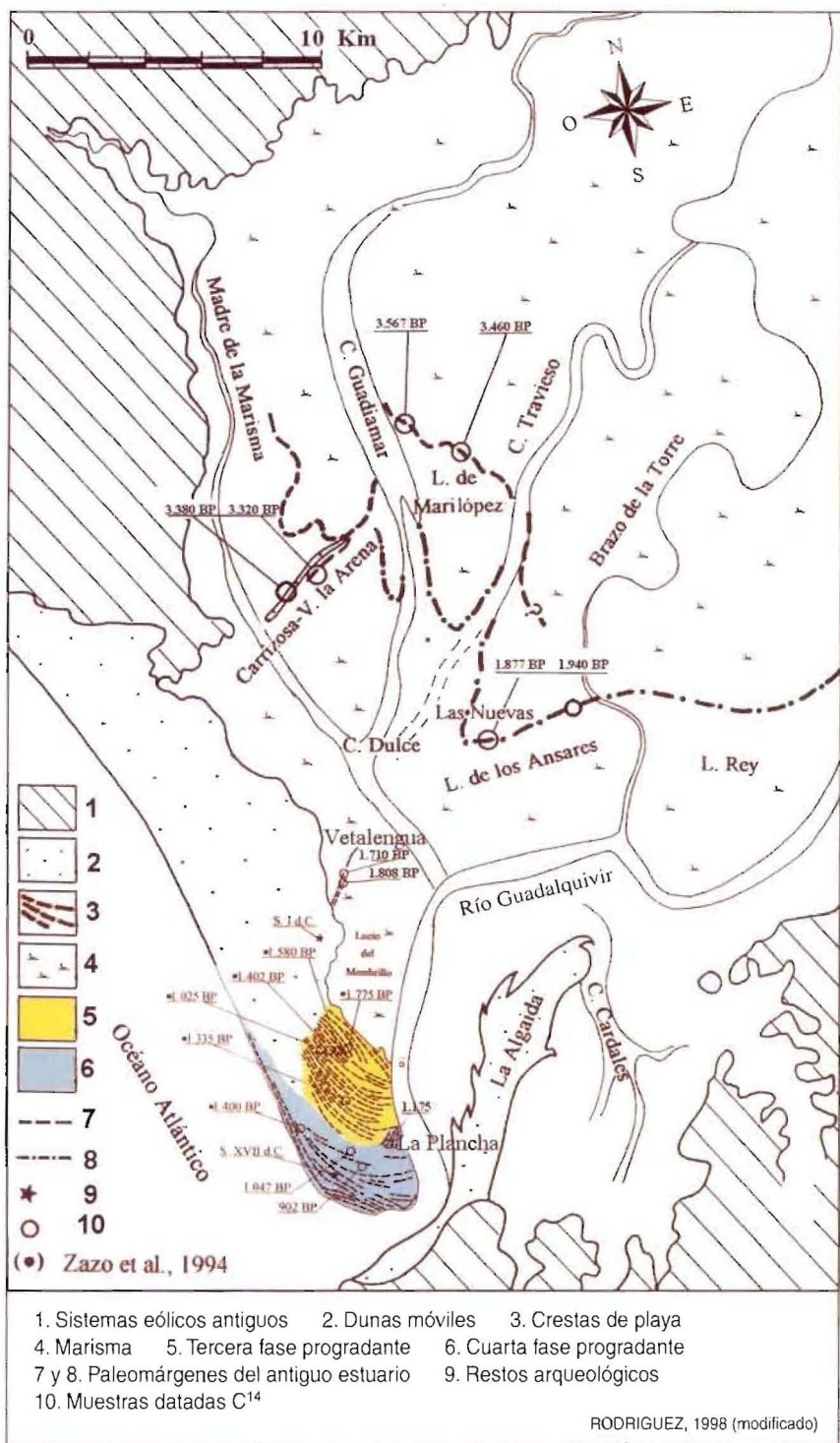
Los suelos dominantes en el área carecen de rasgos indicativos de evolución del perfil, salvo una fuerte acumulación de sales derivada del ascenso capilar de la capa freática salina y de la evaporación de la lámina de agua superficial; en lenguaje técnico, se trata de entisols.

En los casos más extremos, la acumulación de sales solubles permite definir suelos hipersalinos, asimilables a los de zonas áridas, en tanto

4. LAS DIFERENCIAS en el régimen de inundación y aireación de los sedimentos arcillosos que constituyen el sustrato la marisma y la acción de las raíces vegetales han propiciado la diferenciación física, química y morfológica de los suelos de la marisma. Todos los perfiles de la figura corresponden a la estación seca. Los tres de la izquierda pertenecen a suelos salinos del este de la marisma con distinto régimen de inundación (de izquierda a derecha: elevación con quenopodiáceas; zona temporalmente inundable con *Scirpus* y zona con inundación persistente con *Phragmites*). El perfil de la derecha corresponde a un vertisol del NO de la marisma, en el que el sedimento arcilloso ha evolucionado por efecto de la acción prolongada de las aguas ácidas y oligohalinas procedentes de la zona de arenas del Parque.







5. DATAION por  $C^{14}$  de las diferentes fases progradantes y erosivas ocurridas en la formación de la marisma desde el final de la transgresión flandriense.

Los suelos fuertemente salinos se encuentran entre los más extendidos. Ocupan por igual tanto zonas elevadas como deprimidas. En las zonas elevadas, sólo las plantas leñosas suculentas (*Arthrocnemum*) pueden resistir todo el año. Durante el invierno y primavera, aprovechando el descenso de la salinidad superficial y la disponibilidad de agua, estos suelos sustentan un tapiz de hierbas anuales de densidad variable que persisten durante la estación seca en el banco de semillas. En las zonas deprimidas, la dilución de la salinidad superficial puede permitir el desarrollo de comunidades de plantas junciformes (ciperáceas del género *Scirpus* acompañadas de anuales sumergidas) cuyos rizomas subterráneos resisten la estación seca.

Los entisoles son suelos jóvenes con muy escaso desarrollo de horizontes. Predominan en la marisma del Parque Nacional de Doñana y son salinos casi todos ellos, aunque no en el grado de los aridisoles. Esta menor salinidad se debe a varios factores: el nivel freático hipersalino se encuentra a mayor profundidad (zonas elevadas de vetas y paciles), el nivel freático es menos salino o existe un lavado superficial del suelo asociado a la presencia de corrientes de agua superficial (por ejemplo, en las zonas influenciadas por el caño de la Madre); los dos últimos factores pueden darse juntos. Su distribución geográfica coincide con las zonas más elevadas (paciles y vetas) o con los grandes caños que recogen el drenaje de los arroyos que desaguan por el norte de la marisma. Sobre estos suelos medran las comunidades más diversas (pastizales de zonas elevadas) y productivas (zonas deprimidas con alta densidad de *Scirpus* y de acuáticas anuales sumergidas).

Los inceptisoles, suelos de desarrollo incipiente, se concentran alrededor de algunas surgencias de agua freática poco salina (5 gramos de sales por litro de agua) en comparación con áreas deprimidas

que inducen sequía fisiológica; hablamos entonces de aridisols.

En la zona próxima al ecotono arenas-marisma, los sedimentos arcillosos han evolucionado hacia suelos poco salinos, cuya característica más destacada es la contracción en época seca y la expansión en época húmeda, así como la rotación del perfil a través de las grie-

tas que se producen en la época seca; en edafología estos suelos reciben el nombre de vertisols.

Por último, en determinados puntos, las surgencias de agua dulce dentro de la marisma salina ("ojos") y su evaporación en la superficie del suelo da lugar a la aparición de características propias de suelos incipientes o inceptisoles.





6. LAS ZONAS ligeramente elevadas de la marisma permanecen libres de inundación durante la estación húmeda. La mayor aireación del suelo y el lavado superficial por el agua de lluvia permite el establecimiento de muchas especies anuales; generan éstas pastizales que sirven de alimento para muchos consumidores primarios hasta el inicio de la estación seca. Durante la misma perduran sólo los rodales de quenopodiáceas leñosas suculentas (*Arthrocnemum macrostachyum*, principalmente).



próximas (más de 70 g/l). Tales ojos, así se llaman esas zonas surgentes, propician una vegetación densa, típica de carrizos (*Phragmites*), ausente en la marisma salina.

Los vertisoles presentan un elevado contenido de arcilla (más del 50 %) y son, en general, poco salinos. Durante la estación seca pueden desarrollar grietas de varios centímetros de amplitud, a través de las cuales se introducen materiales de las capas superficiales hasta más de 50 cm de profundidad. En la estación húmeda las arcillas se hinchan, produciéndose el cierre de las grietas. Esto provoca la continua rotación de los materiales del suelo, manteniéndose un perfil muy homogéneo con escaso desarrollo.

La mayoría de los vertisoles se encuentran cerca de la zona de contacto con el sistema eólico (arenas), donde descargan acuíferos y cursos de agua dulce. Al igual que los entisoles de las zonas deprimidas, sustentan comunidades de plantas junciformes (especialmente ciperáceas de los géneros *Scirpus* y *Eleocharis*) y de plantas anuales sumergidas menos tolerantes a la salinidad.

### Interacciones abióticas

Lo mismo durante la estación húmeda que durante la extensa sequía estival, la marisma de Doñana constituye una monótona planicie que,

en apenas tres meses, pasa de cenagal rebosante de vida animal y vegetal a estepa semidesértica, con amplias extensiones desnudas, cuarteadas y salinizadas, y el resto, mayoritariamente cubierto por un matorral halófilo y suculento de pequeño porte.

Tal variación temporal en las características del medio impone fuertes restricciones al desarrollo de la vegetación. Asistimos a fluctuaciones de gran magnitud en la disponibilidad de agua y en la salinidad del sustrato.

Durante la estación húmeda, gran parte de la marisma permanece inundada, cae bruscamente el contenido de oxígeno del suelo, para alcanzar muy pronto condiciones reductoras, incompatibles con el desarrollo de la mayoría de las plantas. Pero, simultáneamente, se diluyen las sales en el primer decímetro de suelo y se crean condiciones aptas para el establecimiento de plantas acuáticas de ciclo corto y para el brote de plantas perennes anfibias o "helófitos".

Resistentes a la sequía estival, los rizomas de los helófitos comienzan a reactivarse a finales del otoño, cuando la lámina de agua se consolida. En apenas cuatro meses, las comunidades de zonas bajas explotan su capacidad para sobrevivir en condiciones reductoras, aprovechando los ingentes recursos hídri-

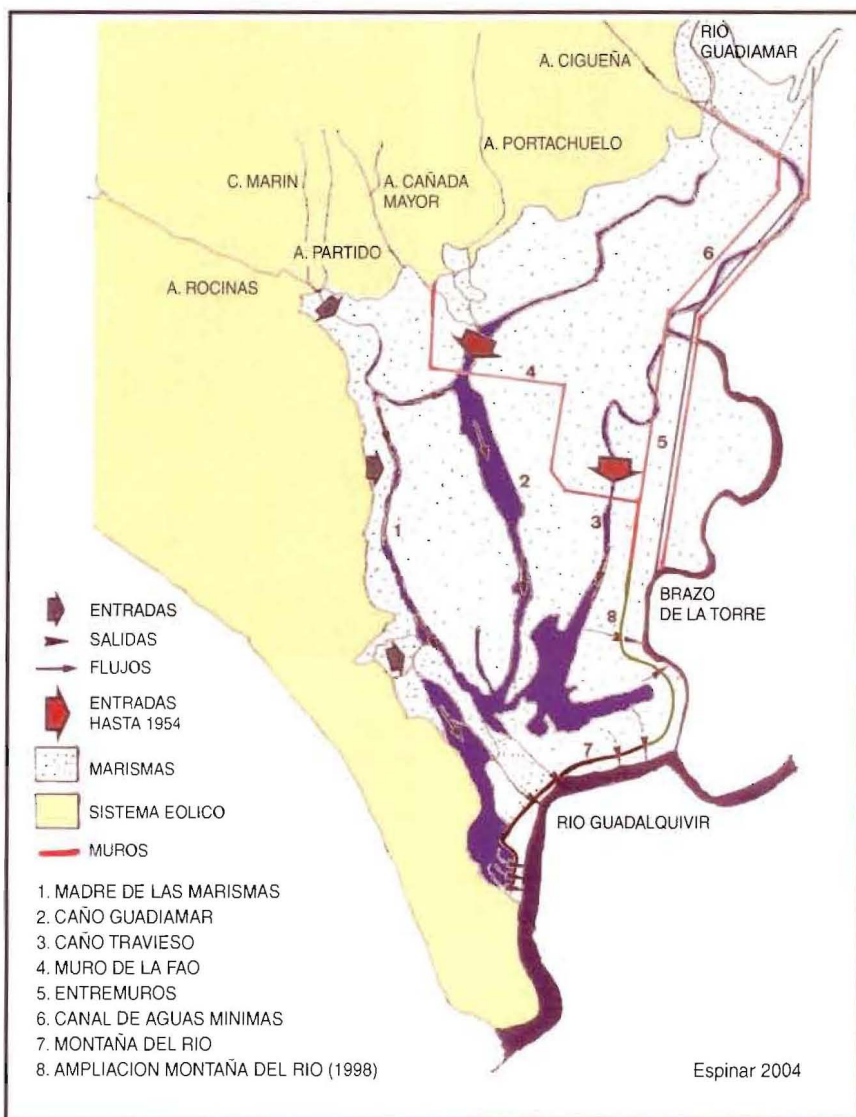
cos poco salinos y las elevadas dosis de luz incidente; se genera así una de las cubiertas vegetales más productivas.

Unas pocas especies de helófitos hacen emerger un tapiz vegetal impenetrable, que supera el metro de altura. Ponen a disposición de los herbívoros hasta 30 toneladas de biomasa herbácea por hectárea y año. Al propio tiempo, estas comunidades de ciperáceas perennes almacenan una parte notable de sus asimilados en órganos de reserva y resistencia, a partir de los cuales se extiende la población (mediante rizomas gemíferos subterráneos) y rebrotan los vástagos en la siguiente estación húmeda.

Los rizomas de los helófitos, muy ricos en hidratos de carbono, representan un auténtico maná para las exhaustas anseriformes que invernan en la marisma de Doñana y que consiguen removiendo los suelos donde se establecen.

A su vez, el tapiz de plantas acuáticas (principalmente algas carófitas sumergidas y diversos grupos de fanerógamas), que se desarrolla entre los vástagos de helófitos emergentes, genera, a partir del banco de propágulos presente en los primeros centímetros de suelo (en cantidades próximas a los 5000 millones por hectárea), una producción de hasta cinco toneladas por hectárea y año de biomasa herbácea seca.





7. **HIDROLOGIA SUPERFICIAL** de la marisma del Parque Nacional. Se indican los principales aportes hídricos, los puntos de drenajes al estuario regulados por compuertas y las principales transformaciones de origen antrópico ocurridas en la zona desde los años cincuenta del siglo pasado.

agua de lluvia y terminan perdiéndola por evaporación. Sin embargo, hasta no hace mucho, los caños actuaron como cauces fluviales más o menos divagantes por las que circulaba el agua que, finalmente, se evacuaba al Guadalquivir.

Los lucios, sin embargo, han funcionado como cubetas de evaporación, durante cientos de años; en vez de zonas de tránsito de agua, se han convertido en sumideros de agua y sales, generando un medio poco favorable para la proliferación de especies perennes y, como resultado, presentan suelos de características químicas y físicas diferenciadas y un aspecto desolador en la época estival.

### Interacciones bióticas

La diversidad del hábitat inundable de la marisma no deriva sólo de la influencia de la variación cíclica de las características hidrológicas y edáficas. Hasta no hace mucho se pensaba que un medio físico exigente, que llevaba hasta el límite las capacidades fisiológicas de las plantas, determinaba *per se* las especies que podían establecerse, por exclusión de las que carecían de las adaptaciones necesarias.

Sin embargo, cada vez se acumulan más pruebas de que ciertas comunidades vegetales, una vez establecidas, inducen modificaciones locales de las características químicas y físicas del suelo y de la lámina de agua que las circunda, para afectar, de ese modo, al asentamiento de otras especies.

Según parece, las comunidades de helófitos del género *Scirpus* modifican el régimen de oxigenación, estructura, consistencia y composición del suelo, así como las características químicas de la columna de agua que lo inunda. Actúan como una suerte de "bomba" que libera al medio nutrientes inmovilizados en el sedimento. Al mismo tiempo,

No termina aquí el potencial productivo de estas zonas deprimidas de la marisma. Otras efímeras esperan en el banco de semillas a que la lámina de agua se evapore para colonizar las zonas antes ocupadas por las acuáticas, ya fenecidas, generando un ralo tapiz de hierbas adaptadas a suelos húmedos y a las condiciones de elevada insolación, temperatura y salinidad que imperan en estas zonas. Son hierbas suculentas (*Suaeda*, *Salicornia*, *Salsola*), capaces de eliminar las sales a través de las hojas (*Aeluropus*, *Crypsis*, *Cressa*), que explotan este hábitat antes del advenimiento de las primeras aguas otoñales.

La multiplicación temporal del hábitat asociada a la evolución estacional de las características del medio físico permite la coexistencia

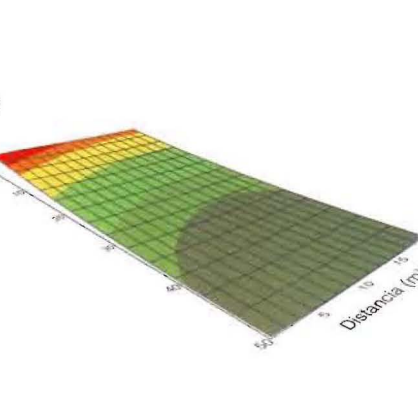
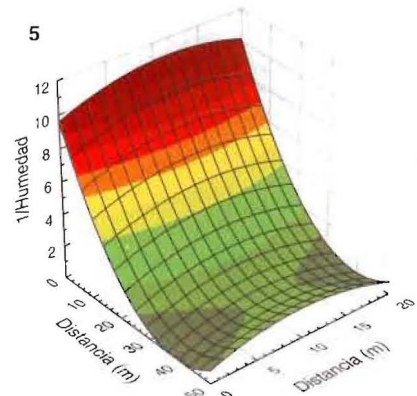
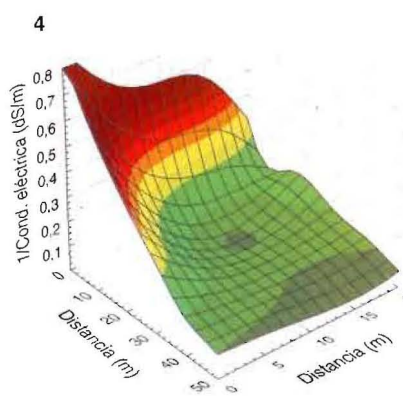
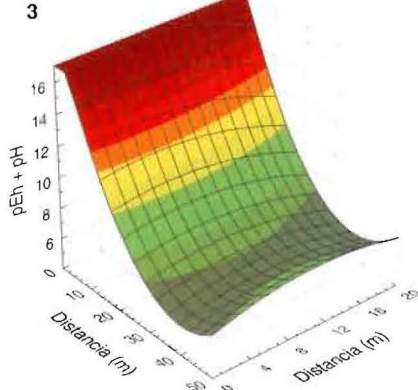
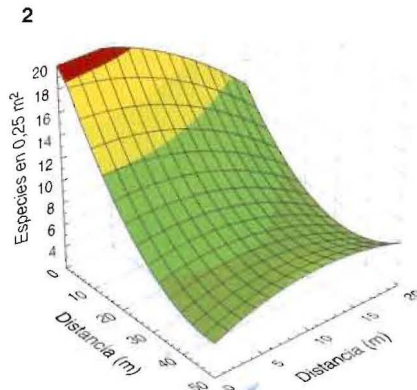
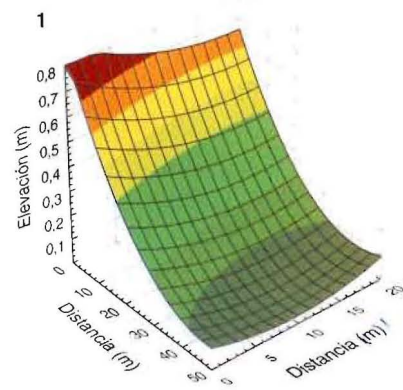
sucesiva, en un mismo punto, de comunidades con estrategias vitales y adaptaciones diferentes.

### Factor tiempo

Sería demasiado prolijo analizar en detalle todas las posibles fuentes de diversidad ambiental existentes en las marismas de Doñana, pero debemos citar al menos una más de gran importancia: la evolución en el tiempo. Este factor determina que las depresiones formadas por los mismos materiales, y que actualmente presentan un régimen hidrológico similar, creen suelos (y vegetación) notablemente diferenciados.

Como hemos dicho, las depresiones inundables de la marisma funcionan a modo de grandes lagunas, que acumulan fundamentalmente





aporta calcio a la columna de agua, cuyo efecto tampón determina las formas dominantes de carbono disuelto que se encuentra a disposición de otros productores primarios.

Todo ello hace que ciertas especies acuáticas sumergidas, capaces de aprovechar mejor estas condiciones, se vean favorecidas en la vecindad de los helófitos, mientras que otras dominan en zonas igualmente inundables, aunque más alejadas de ellos. Así, la conjunción de un hábitat fluctuante en el tiempo con interacciones bióticas y abióticas multidireccionales puede generar un sinfín de variaciones locales de las condiciones ambientales, que pueden ser explotadas por un número de especies muy superior al que cabría esperar en una planicie homogénea.

**Gradiente microtopográfico**

La diversidad ambiental de la marisma no se agota en las depresiones inundables. Junto a ellas, encontramos extensas zonas ligeramente elevadas (0,5-1,0 m) donde las condiciones ambientales varían en el transcurso del año. Para las plantas, estas zonas forman suelos bien aireados y no soportan inundación

8. VARIACION DE LOS PARAMETROS AMBIENTALES y de la riqueza de especies con la microtopografía en un área de dimensiones reducidas (1000 m<sup>2</sup>), con un desnivel máximo de 80 cm. El diagrama 1 representa los valores de elevación relativa; el 2, los cambios en la riqueza de especies de plantas herbáceas por unidad de superficie, en el mismo gradiente de elevación; los tres siguientes, la variación de distintas características del horizonte superficial del suelo que revisten interés para el establecimiento y desarrollo de la vegetación. Los valores del parámetro pEh + pH crecen con la aireación del suelo, mientras que los del inverso de la conductividad eléctrica (1/CE) y los del inverso de la fracción ponderal de humedad (1/Humedad) decrecen con la salinidad y con disponibilidad de agua en el suelo, respectivamente. Por fin, el diagrama 6 ilustra los mismos datos que el diagrama 1, si bien mantiene las proporciones reales en los tres ejes de coordenadas.

prolongada, la mayoría de los años. A su vez, tampoco presentan algunas de sus ventajas, ya que soportan, en la zona de influencia de las raíces, los prolongados períodos de sequía que impone el clima mediterráneo.

Como podría esperarse, un gran número de especies adaptadas a las fluctuaciones propias del clima mediterráneo prosperan en estas zonas. En efecto, se han detectado más de dos centenares de especies de plantas herbáceas diferentes, en comparación con unas decenas escuetas en las zonas con inundación prolongada.

Sin embargo, otra característica del suelo impone a las plantas, que colonizan estas microelevaciones,

una restricción adicional que no concurre en la mayoría de los hábitats de clima mediterráneo: la presencia de un nivel saturado, próximo a la superficie (entre 1,2-1,8 m, en la estación seca, y entre 0,5 y 1 m, en la estación húmeda), con una concentración de sales solubles (principalmente cloruro sódico) que llega a triplicar la salinidad del agua del mar. La salinidad supera, en efecto, los 100 gramos de sal por litro. Su ascenso por capilaridad hasta cerca de la superficie del suelo influye no sólo en los horizontes directamente afectados por la oscilación estacional, sino también en los situados varios decímetros más arriba.





9. LA MAYOR PARTE DE LAS DEPRESIONES inundables no salinizadas de la marisma desarrollan en la estación húmeda un denso tapiz de helófitos emergentes, dominado por ciperáceas del género *Scirpus*. Junto con éstas se desarrolla una cubierta de macrófitos anuales sumergidos, en la que abundan algas carofi-

tas (*Chara*, *Nitella*), plantas acuáticas superiores (*Zanichelia*, *Ruppia*, *Ranunculus*, *Callitriche*) y colonias flotantes de clorofilas (*Volvox*). Tamaña producción primaria, aérea y subterránea, se aprovecha por los herbívoros de Doñana a lo largo del ciclo anual.

Aunque las lluvias otoñales y primaverales lavan las sales acumuladas en el primer decímetro, la mayoría de las especies anuales han de gozar de cierta tolerancia a la salinidad para completar su ciclo biológico en estas condiciones. Se llega así a un tapiz herbáceo mediterráneo peculiar, con algunas asociaciones y especies características, que da lugar a un pastizal rico en gramíneas y leguminosas y de pro-

ductividad moderada (hasta 5 Tm/Ha/año), esencial para la alimentación de la fauna herbívora del Parque. Se trata de un recurso complementario, en tiempo y calidad, al de la vegetación de las zonas inundables.

### Plantas leñosas

En lo que respecta a las plantas leñosas, la mayoría de las especies adaptadas al clima mediterráneo requiere, al menos, un aporte subterráneo de agua de características adecuadas para poder resistir todo el año. Casi ninguna de ellas puede tolerar un nivel freático hipersalino como el existente en las zonas elevadas de la marisma. De hecho, sólo unas pocas especies propias de ambientes hipersalinos aprovechan este recurso subsuperficial, manteniéndose verdes todo el año: las quenopodiáceas leñosas de los géneros *Arthrocnemum*, *Suaeda* y *Sarcocornia*.

El alcajeo (*Arthrocnemum macrostachyum*) es, con diferencia, la quenopodiácea leñosa más extendida en la marisma de Doñana. Su éxito se relaciona con su capacidad combinada de aprovechar las aguas hipersalinas subsuperficiales, durante el verano, y de resistir la inundación somera hasta varios meses, durante la estación húmeda. De ahí que haya ido ganando terreno a medida que progresaron los procesos de desecación, colmatación y salinización de la marisma. Desde el punto de vista cuantitativo las comunidades de *Arthrocnemum* superan las 60 Tm/Ha de biomasa seca, si bien su productividad anual es baja y los tejidos suculentos que presenta son poco consumidos por la fauna herbívora, salvo en casos de extrema necesidad.

Sin embargo, el papel funcional de las plantas leñosas en la protección de especies anuales frente a la presión de los herbívoros y en la



10. EL MOSAICO DE AMBIENTES de la marisma se pone de manifiesto en las imágenes multispectrales captadas al final de la estación húmeda. La composición de la figura, ha sido elaborada por Menanteau y Geffray para un proyecto de investigación en curso, a partir de una imagen captada por el sensor multispectral de SPOT 2 en junio de 2000, combinando un índice normalizado de vegetación (que realza el contraste entre el infrarrojo cercano y el rojo característico de la vegetación fotosintéticamente activa) con los dos canales situados en el rango visible (*verde* y *rojo*). Se separan las zonas deprimidas con inundación somera y sin vegetación helofítica activa (*morado/violáceo*) de las que la presentan (*verde intenso*). Las zonas elevadas (*Arthrocnemum*) se distinguen por su coloración pardo-verdosa. La gran cantidad de matices intermedios, visibles en las zonas de transición, da idea de la enorme variabilidad espacial de los parámetros ambientales existente en la marisma en un momento dado.



generación de hábitats de microclima diferenciado de las zonas descubiertas, reviste sumo interés para mantener la heterogeneidad ambiental y preservar un buen número de especies herbáceas.

### Situaciones intermedias

Entre los dos extremos descritos del gradiente marismeno, se suceden una infinidad de situaciones intermedias, que difieren ligeramente entre sí en el régimen de inundación y oxigenación del sustrato y en la salinidad del mismo. Ello produce una variación gradual de la densidad y composición de la cubierta vegetal, hasta que se llega a la sustitución de la especie o especies perennes dominantes por otra u otras mejor adaptadas a las condiciones medias imperantes.

Cuando sobrevienen ciclos pluri-anales de déficit hídrico se asiste a una colonización de las zonas deprimidas por las quenopodiáceas leñosas, al desaparecer, durante un período suficiente, las condiciones de anoxia prolongada que impiden su establecimiento. Los helófitos, que normalmente ocupaban estas zonas, dejan de producir vástagos o lo hacen en escasa proporción, permaneciendo fundamentalmente en la forma resistente (rizoma) en espera de años más húmedos. Por el contrario, cuando sobrevienen ciclos húmedos, se produce la erradicación de las poblaciones de quenopodiáceas leñosas y el predominio de los helófitos en las zonas deprimidas.

A medio y largo plazo, sin embargo, lo relevante es la existencia de tendencias subyacentes bajo las fluctuaciones naturales de distintos períodos. Tras la merma (a menos de un tercio) de los aportes superficiales de agua que recibía la marisma hace cincuenta años, las quenopodiáceas leñosas han podido colonizar nuevas zonas. Esa ocupación ha contribuido al paulatino acondicionamiento del sustrato, al atrapar sedimentos en suspensión y propiciar la elevación gradual del nivel, en cantidad suficiente para garantizar su posterior supervivencia durante los ciclos húmedos. Se forman, de este modo, rodales ligeramente elevados que permiten el establecimiento de plantas herbáceas propias de zonas más elevadas,



11. VARIACION A PEQUEÑA ESCALA de las características del ambiente físico y vegetación de la marisma salina de Doñana. La acumulación de agua en las microdepressiones favorece a los helófitos del género *Scirpus* y a los macrófitos anuales sumergidos. Sin embargo, bastan apenas unos centímetros de elevación para que los rodales de *Arthrocnemum* puedan subsistir y favorecer la entrada de otras especies anuales menos resistentes a la inundación.

a modo de islas, en el seno de las zonas inundables.

Las comunidades anuales responden con mayor presteza a los cambios cíclicos en las condiciones del medio, de forma que, de acuerdo con sus rangos ecológicos, migran hacia arriba o hacia abajo en el gradiente de elevación y de inundación, en respuesta a ciclos húmedos o secos, respectivamente; en esa reacción se hallan condicionadas por la composición del banco de semillas del suelo consolidado en los años precedentes.

### El futuro de la marisma de Doñana

No se dispone de un modelo operativo que permita estimar la evolución más probable de las variables del medio físico y de la cubierta vegetal bajo distintos escenarios climáticos o de manejo del agua en la zona. Sin embargo, el análisis de los cambios ocurridos en la marisma durante los últimos siglos y, muy especialmente, durante los últimos cincuenta años, nos faculta para identificar tendencias que pudieran acabar comprometiendo tanto su carácter de reserva biogenética de organismos adaptados a condiciones ambientales peculiares como

su ingente producción primaria, esencial para el sostenimiento de la fauna.

Desde la creación del Parque, la fauna vertebrada del mismo ha captado gran parte de la atención y preocupación de los organismos gestores, investigadores y del público en general. Pero difícilmente se podrá garantizar su supervivencia sin avanzar en el conocimiento de las complejas interacciones y delicados equilibrios existentes entre los factores del medio y los productos primarios que alimentan, en última instancia, la singular fauna de la marisma de Doñana. A este respecto, siguen plenamente vigentes los problemas que se planteaban hace ya casi 15 años: la uniformización del régimen hidrosalino, la presión excesiva de herbívoros y la contaminación de origen antrópico.

Vayamos con el primer problema, la uniformización del régimen hidrosalino. A causa de la salinización progresiva del suelo, por alteración del régimen natural de circulación y evacuación del agua en la zona, o a causa de la inundación excesiva, por embalsamiento artificial del agua por encima de la cota natural de desagüe, se está produciendo una homogeneización del





12. LAS AGUAS DULCES que drenan desde las arenas de Doñana revisten suma importancia para el mantenimiento de las comunidades perennes del borde de la marisma; permiten la pervivencia de especies no adaptadas a las fluctuaciones en el régimen hidrosalino propias de las zonas del interior de la marisma.

medio físico de la marisma y, como consecuencia, una pérdida en la biodiversidad.

La evaluación de los cambios ocurridos en los principales grupos de vegetación perenne hasta 1991 permite relacionar el incremento artificial de la superficie inundada, la degradación de las plantas asociadas a las quenopodiáceas leñosas de las zonas elevadas y la extensión de una especie (*Juncus subulatus*) mejor adaptada a sustratos salinos con inundación somera y fluctuante. Los cambios en la vegetación, asociados al excesivo embalsamiento de agua por sobre-elevación del nivel máximo de inundación, pueden resumirse en dos principales.

Un primer cambio concierne a la pérdida en la heterogeneidad espacial con atenuación de los gradientes naturales. Por un lado, se produce una tardía compartimentación de la lámina de agua que influye en la variabilidad necesaria para acoger diferentes comunidades de plantas acuáticas sumergidas y, por otro, se reduce considerablemente el espacio disponible para el desarrollo del pastizal de las zonas elevadas; al propio tiempo, existe un desplazamiento de la superficie ocupada por *Juncus*, en las quebradas, con respecto a *Arthrocnemum* en solitario, en los paciles.

El segundo cambio se refleja en la dinámica del agua. Aunque se ha incrementado el período de inun-

dación de las zonas deprimidas, su dinámica ha pasado de un flujo prácticamente continuo a otra de tipo casi endorreico. El tránsito repercute en la intensidad de lavado de los primeros centímetros de sedimentos, condicionando las características del sustrato y de la columna de agua que son aspectos clave para el establecimiento y persistencia de comunidades de *Scirpus* y para el desarrollo de distintas especies de plantas acuáticas sumergidas.

Se están evaluando los cambios en los niveles de salinidad del suelo operados durante los últimos 15 años para detectar eventuales procesos de acumulación salina que puedan motivar la desaparición de las comunidades más productivas de las zonas inundables.

La pérdida de los originales aportes fluviales a los caños, que prolongaban la humectación y facilitaban el lavado de las sales de los cauces, explica la desaparición de especies de *Thypha* y *Phragmites* que no toleran períodos de sequía prolongados. Se está investigando, así mismo, el posible carácter relicto de muchas de las poblaciones de *Scirpus*, dada la enorme dificultad que parece existir para el establecimiento de estas especies mediante semillas, en las condiciones hoy imperantes, y su resistencia a establecerse en áreas artificialmente removidas o excavadas.

### Presión de herbívoros

Numerosos indicadores apuntan en la dirección de que la marisma de Doñana puede estar sufriendo una excesiva presión de herbívoros, de la ganadería sobre todo, lo que podría incidir en la pervivencia de muchas especies palatables, comprometer los procesos de crecimiento-asimilación que permiten el mantenimiento de los helófitos e influir negativamente en la potencialidad del sustrato.

La concentración de aves que se sustentan de la vegetación, propiciada por la reducción de la superficie conservada de marismas a menos de un 20% de su extensión original, y la proliferación de grandes herbívoros silvestres intensifican los cambios en el medio físico. Preocupación que se funda en un

Año	1956	1977	1991
Paciles ( <i>Arthrocnemum</i> )	—	2287 ha	1225 ha
Quebradas ( <i>Juncus-Arthrocnemum</i> )	—	501 ha	1557 ha
Marisma baja ( <i>Scirpus</i> )	815 ha	1022 ha	1064 ha
Lucios (sin vegetación perenne)	2284 ha	1986 ha	1828 ha

13. EVOLUCION TEMPORAL de las superficies ocupadas por las principales unidades de vegetación, en 6000 hectáreas de la zona sur de la marisma de Doñana.



sólido estudio reciente, si bien no cabe tampoco una solución simplista a este problema, en tanto que la herbivoría moderada contribuye al mantenimiento de la diversidad y productividad vegetal en el ecosistema de marismas. Una eliminación radical de alguna de estas influencias pudiera dar lugar a cambios imprevisibles en la evolución de la cubierta vegetal.

### La acción del hombre

Junto con la amenaza que representan los vertidos agrícolas del entorno para los suelos y vegetación de la marisma, persistía desde hace años el riesgo derivado de los aportes de metales pesados al río Guadamar. En la primavera de 1998, una cadena de hechos fortuitos terminaron por materializar la amenaza en forma de riada tóxica que, a duras penas, logró detenerse en el mismo límite norte de la marisma del Parque Nacional.

No obstante lo anterior, datos recientes parecen indicar que la marisma conserva la huella de una actividad humana milenaria en el entorno. Hay pruebas de que parte de los suelos de las zonas inundables presentan niveles significativos de contaminación por elementos

traza (arsénico, en concreto) y de que dichos elementos se transfieren, al menos, a los primeros niveles de las cadenas tróficas.

Se están volviendo a analizar muestras de suelos tomadas 15 o 20 años atrás. Los primeros resultados parecen indicar que la contaminación del interior del Parque nada tiene que ver con el accidente de las minas de Aznalcóllar. Es posible que las mismas actividades humanas cuenca arriba que, al menos desde la época romana, favorecieron la colmatación acelerada del antiguo lago Ligur, hayan contribuido a la contaminación del río Guadamar y, a través del mismo, a parte de los sedimentos y plantas de nuestra zona húmeda más emblemática.

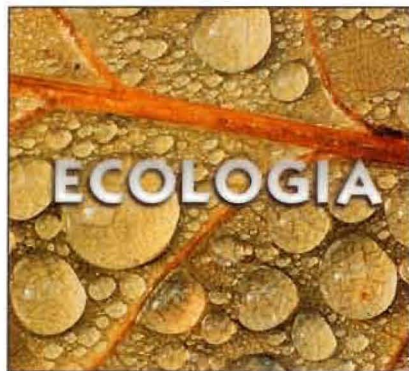
En la actualidad, se lleva a cabo un estudio que abarca el conocimiento de las tasas de sedimentación de la marisma durante el último medio siglo, la evolución de los suelos, en particular la dinámica del horizonte sálico (horizonte de acumulación de sales) y la evolución de la distribución geográfica de las asociaciones vegetales más productivas. Este estudio podría sentar las bases de la regeneración de la marisma y su conservación.

### Los autores

**Luis Clemente, Luis-Ventura García, José Luis Espinar, Juan S. Cara y Adela Moreno** constituyen un grupo de investigación en el departamento de geoecología del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (CSIC), dedicado al estudio del medio físico y su relación con las comunidades vegetales. En esa línea, llevan más de 25 años estudiando la evolución de las características del medio físico y la vegetación en el espacio natural de Doñana, sobre el que han publicado más de 40 trabajos en revistas nacionales e internacionales. En la actualidad, colaboran en el estudio de los suelos afectados por la marea tóxica de Aznalcóllar y desarrollan varios proyectos de investigación sobre la tendencia evolutiva del medio físico y la vegetación natural en el Parque Nacional de Doñana y la regeneración de zonas de marisma recientemente restauradas en el marco del Plan Doñana 2005.

### Bibliografía complementaria

- SUELOS DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA. L. Clemente, L. V. García y P. Siljeström. Ministerio de Medio Ambiente; 1998.
- GEOMORFOLOGÍA DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA. A. Rodríguez. Ministerio de Medio Ambiente; 1998.
- ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LOS GRANDES HERBÍVOROS EN LA MARISMA Y VERA DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA. R. C. Soriguer, A. Rodríguez, L. Domínguez. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid; 2001.
- ECOLOGÍA DE LAS COMUNIDADES DE GRANDES HELÓFITOS DE LA MARISMA DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA. J. L. Espinar. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla; 2004.



## INVESTIGACION CIENCIA

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

**Replanteamiento del mercado ecológico,**  
de Jared Hardner y Richard Rice  
Julio 2002

**El bosque invisible de los océanos,**  
de Paul G. Falkowski  
Octubre 2002

**Malformaciones en anfibios,**  
de Andrew R. Blaustein  
y Pieter T. J. Johnson  
Abril 2003

**Desmantelamiento de centrales nucleares,**  
de Matthew L. Wald  
Mayo 2003

**Contaminación de acuíferos por gasolina,**  
de Mónica Rosell, Silvia Lacorte  
y Damià Barceló  
Agosto 2003

**Mares esquilados,**  
de Daniel Pauly y Reg Watson  
Septiembre 2003

**Fusión en el norte,**  
de Matthew Sturm,  
Donald K. Perovich  
y Mark C. Serreze  
Diciembre 2003



Prensa Científica, S.A.