

## CARACTERIZACION Y EVOLUCION GEOLOGICA DEL SISTEMA DUNAS-HUMEDALES DE CANTALEJO (SEGOVIA)

J. Temiño \*, J. F. García-Hidalgo \* y M. Segura \*

### RESUMEN

El sistema dunas-humedales de Cantalejo es un conjunto de origen eólico, Cuaternario, de poco espesor y actualmente inactivo. El sistema está formado por cuerpos dunares y zonas interdunares secas y húmedas, controladas por la profundidad del nivel freático. Las morfologías de dunas corresponden principalmente a dunas transversas de orientación principal NW-SE con caras de avalancha al NE por lo que el movimiento de las dunas fue hacia el NE remontando un suave paleorrelieve desarrollado sobre materiales pre-Holocenos. En las proximidades de Cantalejo se han realizado 53 pequeños sondeos, que han permitido caracterizar la evolución del sistema. Se pueden reconocer cuatro niveles de paleosuelos, de los cuales tres han sido datados mediante  $C^{14}$ : nivel a, 10.200 años BP; nivel b, 6.120 años BP; nivel c, 2.210-1.490 años BP y el cuarto nivel (nivel d) está aún en formación. La movilización de los cuerpos dunares se produjo durante períodos climáticos áridos, mientras que la instalación del sistema dunas-humedales está ligado a episodios húmedos, en éstos se produciría un ascenso de nivel freático y la inmovilización o ralentización del sistema dunar debido al desarrollo de vegetación, mientras que durante los momentos áridos, el descenso del nivel freático y la reducción de la vegetación favorecería la desaparición de los humedales y la reactivación del sistema dunar.

**Palabras clave:** Depósitos eólicos, dunas, zonas interdunares secas, zonas interdunares húmedas, humedales, paleosuelos, dataciones  $C^{14}$ .

### ABSTRACT

The dune-wetlands system of Cantalejo (Segovia, Spain) is a thin Quaternary eolian deposit, presently inactive. The system is composed of dunes and interdune deposits (both dry and wet), mainly controlled by the table water position. Dunes are mainly NW-SE trending transverse dunes with slip faces in the NE indicating an unimodal wind blown direction from the SW, moving on a smooth paleorelief. Fifty-three manual boreholes drilled in the eolian sands show the subsurface structure of the system with sands (dunes and dry interdunes) and paleosoils (wet interdunes). Four paleosoil levels have been distinguished and dated by  $C^{14}$  with ages in: level a, 10,200 years BP; level b, 6,120 years BP; level c, 2,210-1,490 years BP and level d, less than 800 years BP. Dune movement took place in relation to arid events; meanwhile, the development of the dune-wetlands system was linked to wet climatic events. Along the wet climates a raised table water existed, which favoured the growing of vegetation and the ralentization or stopping of dunes. On the other hand, during the arid events water table was lowered, wetlands and vegetation disappeared then favouring dune reactivation.

**Key words:** Eolian deposits, dunes, wet interdunes, dry interdunes, wetlands, paleosoils,  $C^{14}$  data-tion.

### Introducción

En la cuenca del Duero se han descrito diversos conjuntos de arenas cuaternarias (Casas, 1973; Alcalá del Olmo, 1974; Pérez González, 1979;

Alvarez *et al.*, 1987; Molina y Pérez González, 1989; etc.), que presentan diferentes formas y morfologías eólicas. Uno de los más interesantes, debido a su asociación con zonas húmedas, se encuentra situado en la provincia de Segovia, al oeste del

\* Departamento Geología. Universidad de Alcalá. 28871 Alcalá de Henares, Madrid.

municipio de Cantalejo (fig. 1), encontrándose actualmente cubierto por un extenso pinar de repoblación con sotobosque xérico. Unos 5 km al oeste del núcleo de población (fig. 1), entre las arenas eólicas, se encuentran pequeños humedales dispersos constituidos por áreas de encharcamiento más o menos permanente (lagunas) o esporádico (bodones), y por prados. Muchas de las lagunas están incluidas en el Catálogo Regional de Zonas Húmedas de Interés Especial de la Comunidad de Castilla y León (BOC y L n.º 178, Decreto 194/1994, de 25 de agosto).

Geológicamente, las arenas eólicas de Cantalejo están situadas en el borde meridional de la cuenca del Duero, concretamente en el sector nororiental de la depresión tectónica terciaria que, con orientación NE-SW, queda limitada por los afloramientos paleozoicos y mesozoicos del Sistema Central y por la alineación de Santa María la Real de Nieva-Fuentidueña (subfosa terciaria de Valverde del Majano *sensu* Fernández García, 1988). En el área estudiada la depresión está rellena por una serie detrítica miocena de al menos 300 m de espesor, coronada por un conjunto también detrítico de edad Plioceno (rañas). En los materiales terciarios se encajaron diversos sistemas fluviales, originando una topografía suavemente irregular, la cual ha quedado recubierta con amplios sectores por arenas eólicas holocenas con unos 8 m de espesor medio (ITGE, 1977; Temiño, 1994).

En el presente trabajo se exponen los resultados del estudio realizado para caracterizar la dinámica pretérita del sistema dunas-humedales en un pequeño sector de 2,5 km<sup>2</sup> de extensión limitada por las lagunas de Matisalvador, Cerrada y Navalayegua (fig. 2), que, por sus morfologías dunares y sus lagunas, consideramos representativo del sistema. Para elaborar el estudio geológico de la zona se han perforado sondeos manuales con extracción de testigo continuo, cuyo emplazamiento fue posteriormente localizado y nivelado mediante aparatos topográficos de precisión (fig. 2). Se trata de sondeos cortos, que solamente en 5 casos ha llegado a alcanzar profundidades entre 5 y 6,5 m; en unos casos por haber llegado al sustrato y en otros por hundimiento del sondeo, dadas las dificultades de perforación en este tipo de sedimentos sueltos cuando están saturados. Hasta la fecha se han obtenido las columnas litológicas y la posición del nivel freático en 53 puntos de la zona estudiada, a partir de los cuales, por correlación, se han construido diferentes cortes geológicos.

Se han realizado también nivelaciones topográficas de precisión para el estudio de las morfologías superficiales de las dunas y zonas interdunares (fig. 3), lo que ha permitido la obtención de las pen-

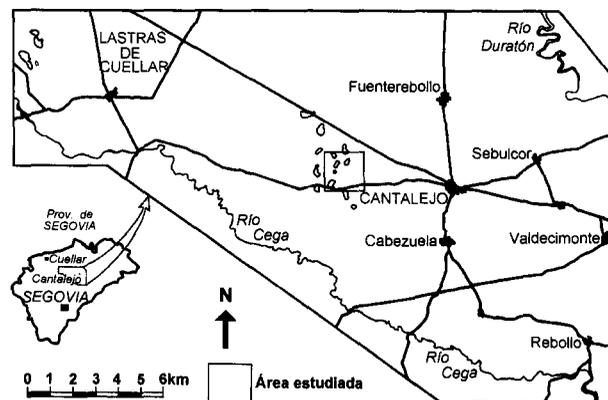


Fig. 1.—Localización geográfica del área estudiada en la provincia de Segovia.

dientes de las formas dunares y áreas interdunares del sistema y su comparación con otros sistemas actualmente activos.

Finalmente, se ha datado la materia orgánica de diversos niveles húmicos mediante C<sup>14</sup>, lo que permite precisar la edad de funcionamiento del sistema.

### Morfología actual del sistema dunas-humedales

El sistema dunas-humedales de Cantalejo forma parte de un amplio conjunto eólico, que actualmente es inactivo. En la zona estudiada está compuesto por cuerpos dunares, generalmente degradados, y áreas interdunares, tanto húmedas como secas, como las descritas por Ahlbrandt y Fryberger (1982). La separación entre estos dos subambientes guarda relación con la posición del nivel freático. Las arenas eólicas constituyen un acuífero libre cuya superficie piezométrica desciende hacia el W con un gradiente hidráulico medio del 0,6 % en la zona estudiada (figs. 3 y 4) (Temiño y Rebollo, 1994; Temiño, 1994) y las oscilaciones estacionales del nivel freático rondan los 0,6 m/año (Temiño *et al.*, 1995).

Las arenas eólicas son de tonos claros, beige, con granos mates, subredondeados, de tamaño medio a fino, muy bien seleccionadas. Su composición es mayoritariamente cuarcítica (61 a 70 %), con una proporción importante de feldespato potásico (25 a 37 %) (Casas, 1973; Alcalá del Olmo, 1974; Temiño y Bustamante, 1993; Temiño, 1994).

Las dunas son cuerpos de pequeño tamaño con anchuras entre 60 y 200 m, y 2 a 8 m de altura máxima, en ellas el nivel freático se sitúa siempre a más de 2 m de profundidad. Las dunas más grandes son dunas transversas con crestas rectas o ligera-

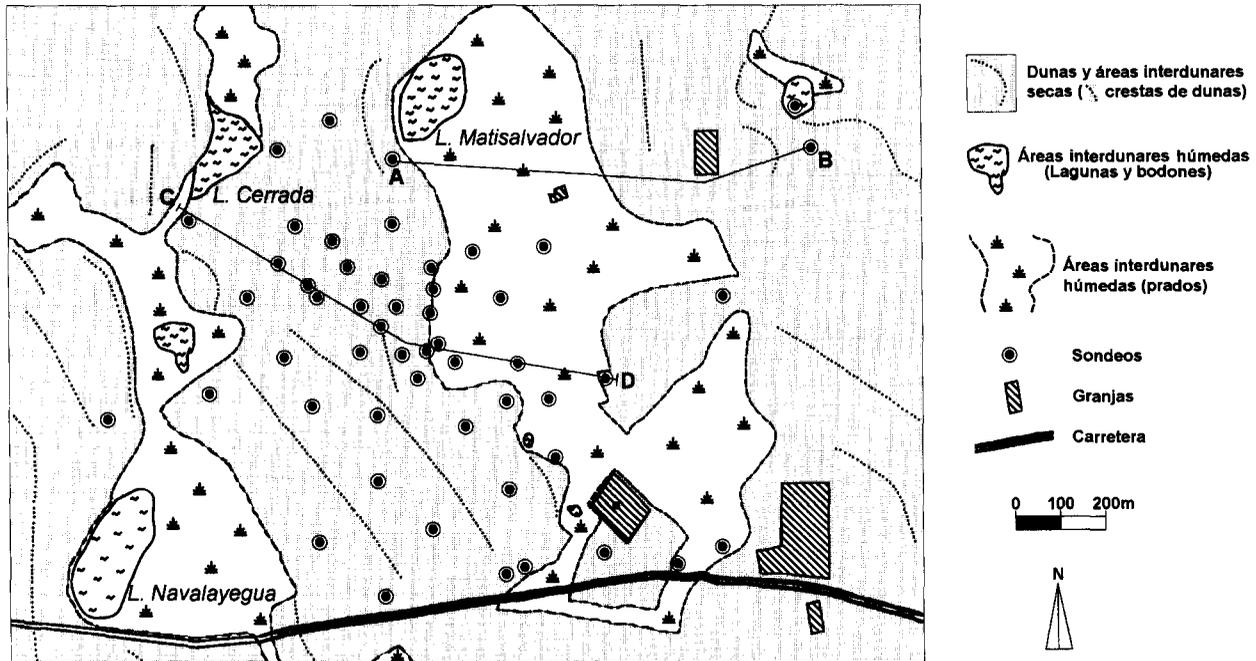


Fig. 2.—Esquema geológico del área estudiada mostrando la distribución de ambientes sedimentarios, la situación de los sondeos realizados y la localización de los perfiles de las figuras 3 y 4.

mente sinuosas que presentan en la dirección de sotavento tanto formas convexas como cóncavas. Las dunas menores tienen morfologías tanto parabólicas y, en algunos casos, barjanoides según la clasificación de McKee (1979). La lineación de las crestas reconocibles (fig. 2) y la orientación de los cuerpos arenosos, con las caras de avalancha en la parte E o NE, indican que el movimiento dunar se produjo en esa misma dirección, por lo que los vientos dominantes debieron de ser desde el W o SW. El perfil de la figura 3 se ha realizado desde una duna poco modificada hasta el siguiente cuerpo dunar más próximo, mostrando las características topográficas de una duna y de las zonas interdunares tanto secas como húmedas. La duna estudiada muestra pendientes del 11 % (6,2°) a barlovento y 41 % (22,5°) a sotavento, las pendientes de sotavento son las típicas de las dunas transversas (22°) o barjanas (24°) (Ahlbrandt y Fryberger, 1980; 1982). Estos cuerpos dunares no muestran desarrollo edáfico, están fijados por pinar con sotobosque xérico poco denso de implantación relativamente reciente, y la morfología de las dunas está en numerosas ocasiones modificada como consecuencia de su pérdida de actividad, pero todavía es posible reconocer su morfología eólica (fig. 3).

Los sectores interdunares son las zonas que quedan deprimidas topográficamente entre los cuerpos dunares. Su anchura suele variar entre 50 y 400 m

con una pendiente topográfica igual o inferior al 1 % en la dirección transversal al surco (fig. 3). En función de la profundidad del nivel freático se pueden reconocer áreas interdunares secas y húmedas; las húmedas se caracterizan porque en ellas la profundidad del nivel freático es siempre somera (menor de 1,5 m), lo que propicia en el suelo una elevada humedad, dando lugar al desarrollo de una vegetación típica de praderas. Cuando el nivel freático asciende, las zonas interdunares topográficamente más deprimidas quedan encharcadas. Las oscilaciones piezométricas estacionales son del orden de 0,6 m/año, lo que unido a la escasa pendiente topográfica de las áreas interdunares ocasiona grandes variaciones estacionales en la superficie de encharcamiento (Temiño *et al.*, 1995).

La vegetación de las zonas interdunares húmedas da lugar al desarrollo de procesos edáficos en estas zonas. Alvarez *et al.* (1993) y Alonso Romera *et al.* (1996) han estudiado estos suelos, concluyendo que están generalmente poco desarrollados y constituidos por horizontes AC; son inceptisoles del suborden aqueps, clasificados como gleysoles por la FAO. Los horizontes A suelen tener 15 a 30 cm de espesor y están compuestos por arenas con contenidos en arcillas del orden del 10 %, presentan colores grisáceos a negruzcos debido a su contenido en materia orgánica (generalmente entre 3 y 10 %); por el contrario, los horizontes C son muy similares a

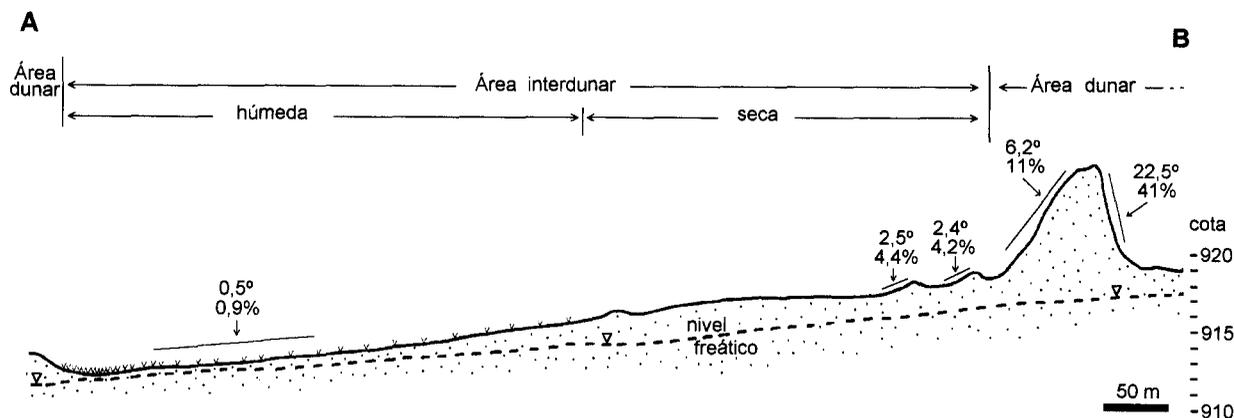


Fig. 3.—Perfil a lo largo de la línea A-B de la figura 2. Muestra la distinción entre áreas dunares e interdunares, tanto secas como húmedas, indicando las pendientes topográficas de los cuerpos sedimentarios y la posición del nivel freático. Las áreas interdunares húmedas son zonas llanas que se caracterizan por una posición somera del nivel freático, lo que permite un desarrollo de la vegetación principalmente herbácea (prados). Las áreas interdunares secas se caracterizan por tener el nivel freático a mayor profundidad y la presencia de morfologías de acumulación de arenas de pequeño tamaño e irregulares («zibars»). Las áreas de dunas presentan el nivel freático a la mayor profundidad, se pueden reconocer dunas y las arenas se han fijado mediante pinar al que suele ir asociado un sotobosque xérico.

las arenas del sustrato, con menos del 1 % de arcillas, tienen colores pardos a blanquecinos y muy bajos contenidos en materia orgánica (menores del 0,4 %). La mineralogía de las arenas es cuarzo-feldespática, idéntica a las arenas eólicas del sustrato. Estos autores citan la existencia de suelos superpuestos en los perfiles estudiados en las lagunas de Matisalvador y Navahornos. En casi todos los sondeos realizados se han reconocido arenas oscuras que se interpretan como originadas en zonas de interdunas húmedas por procesos edáficos; estas arenas están interestratificadas con arenas eólicas y formando cuerpos lenticulares de pequeña potencia y cierta extensión lateral (fig. 4).

La existencia de áreas interdunares húmedas con lagunas es común en algunas zonas eólicas como las Sand Hills en Nebraska (Ahlbrandt y Fryberger, 1982), donde existen áreas similares a las aquí descritas. Los procesos edáficos tampoco son raros en zonas eólicas, como los descritos por Pye (1993) en Australia, o en algunos de los citados por Dabrio *et al.* (1996) en la costa de Huelva, o los desarrollados en los «corrales» de las dunas de Doñana.

Las áreas interdunares secas están cubiertas por sedimentos arenosos con morfologías planas, en ellas a veces destacan pequeñas acumulaciones monticulares en las que no se pueden distinguir caras de avalancha y cuyas pendientes pueden alcanzar hasta 2,5° (fig. 3), estas formas monticulares han sido denominadas «zibars» por Nielson y Kocurek (1986). Estas áreas tienen el nivel freático habitualmente a más de 1,5 m de profundidad, por lo que en ellas no se desarrollan ni encharcamientos ni prados y no muestran desarrollo de suelos húmi-

cos. Puesto que los sedimentos arenosos de estas áreas y de las dunas son idénticos, no se pueden distinguir en los testigos de los sondeos.

### Estratigrafía, facies y evolución sedimentaria

En la zona estudiada (fig. 2) el campo de dunas forma una cobertera de poco espesor, menor de 10 m. La figura 4 muestra el corte más característico, es una sección en el sentido de progradación de las dunas y muestra todos los elementos del sistema. Las arenas se apoyan sobre un sustrato más compacto que presenta una pendiente topográfica ascendente hacia el Este (fig. 4), de forma que los vientos dominantes del W o SW hicieron progresar el campo de dunas pendiente arriba.

Regionalmente el sustrato corresponde principalmente a depósitos arcillosos, de tonos marrones y edad terciaria (Mioceno superior). Este sustrato se corta en algunos sondeos. En otros, sin embargo, el sustrato está constituido por un conjunto heterogéneo y compacto de niveles interestratificados de arenas gruesas angulosas y heterolíticas, con matriz limo-arcillosa, y gravas con cantos de cuarcita, cuarzo, granito y gneis, que en la mayor parte de los casos tiene un color verdoso. No existen afloramientos de estas facies en esta región, ni se corresponden, por su litología y color, con ninguna de las facies típicas del Terciario que afloran en zonas próximas; por lo que, en base a su posición estratigráfica y a su litología, los interpretamos como depósitos cuaternarios más antiguos, probablemente de origen fluvial, que deben corresponder posiblemente

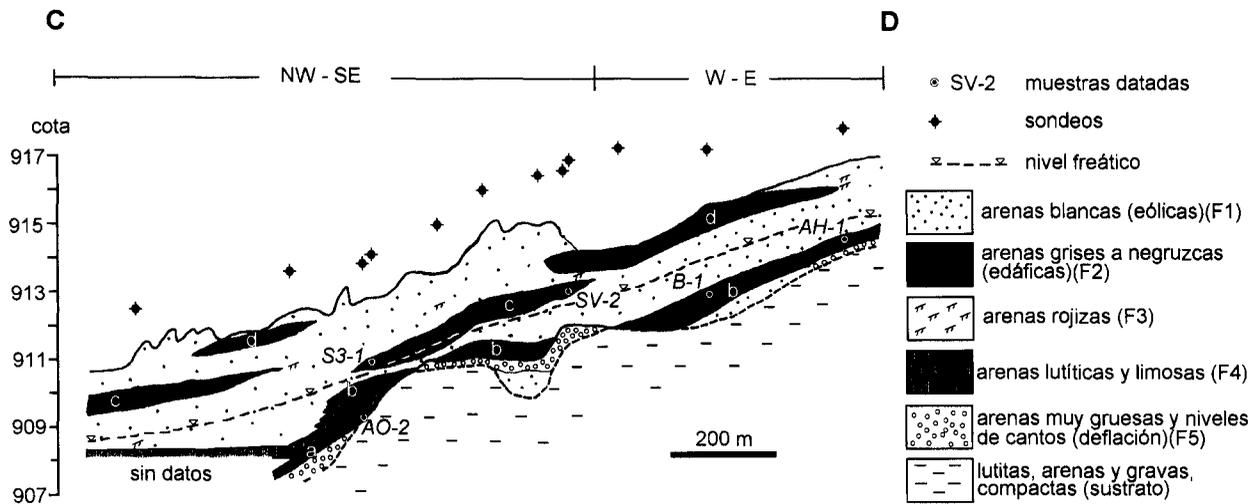


Fig. 4.—Corte geológico a lo largo de la línea C-D de la figura 2. Muestra la distribución de facies en profundidad (F1 a F5), la situación de los cuatro niveles («a» - «d») de paleosuelos descritos, la localización de las muestras datadas y la posición media actual del nivel freático. No ha sido posible obtener datos en la parte izquierda del perfil debido a que en este tipo de sedimentos, cuando están saturados, los sondeos tienden a hundirse y no se puede recuperar testigo.

ta a terrazas altas del río Cega, río que se localiza inmediatamente al SW del área estudiada (fig. 1).

La cobertera eólica se ha estudiado en los testigos de los sondeos manuales. Las litologías obtenidas en todos los sondeos son muy similares y se pueden agrupar en las siguientes cinco litofacies:

F1: Arenas sueltas beigeas, cuarzo-feldespáticas, de grano medio a fino, que por debajo del nivel freático suelen presentar colores blanquecinos, debido al lavado del agua subterránea. Son similares a las arenas que afloran en superficie constituyendo los cuerpos dunares y áreas interdunares secas. El mecanismo de perforación no permite reconocer estructuras sedimentarias en los testigos extraídos y por lo tanto tampoco se puede precisar la presencia, extensión y relaciones estratigráficas entre los depósitos interdunares secos y dunares.

F2: Arenas oscuras, de colores grises a negruzcas, con tamaño de grano medio a fino, estructuradas en niveles decimétricos de cierta extensión lateral. Son arenas sueltas, con mayor contenido en lutita y materia orgánica que las arenas eólicas (F1). Por su contenido en arcillas y materia orgánica se interpretan como niveles edafizados, cuya génesis sería similar a los existentes actualmente en las zonas interdunares húmedas.

F3: Arenas de grano medio a fino de colores rojizos en finos niveles milimétricos a centimétricos; su coloración se debe a la presencia de óxidos de hierro. Suelen estar en relación lateral con las arenas oscuras (F2) y se interpretan como paleoindicadores de la posición del nivel freático en zonas de mayor espesor de arenas eólicas. Niveles con presencia de

óxidos de hierro han sido interpretados como originados por migración hidromórfica vertical de hierro por Dabrio *et al.* (1996).

F4: Arenas lutíticas sueltas, de grano fino a medio y color verdoso o gris verdoso. Aparecen discontinuamente hacia la base del conjunto eólico, siempre en relación con las arenas oscuras (F2). Por su contenido en arcillas se interpretan como depósitos de lagunas en áreas interdunares húmedas.

F5: Arenas de grano grueso a medio-grueso, con niveles de cantos subredondeados y mates, generalmente de cuarzo y cuarcita, que aparecen siempre sobre el sustrato; algunas veces los niveles de cantos aparecen aislados. Se interpretan como un pavimento eólico por el aspecto mate de los cantos, producido por deflación en las etapas iniciales de instalación del sistema eólico.

La distribución lateral de las facies descritas se observa en el corte de la figura 4, el cual muestra que la estructura de la cobertera eólica no es excesivamente compleja. Sobre un suave paleorrelieve del sustrato con restos de deflación (F5), se depositaron un conjunto de arenas eólicas (F1), que contienen intercalados niveles de arenas oscuras interpretables como paleosuelos originados en zonas interdunares húmedas (F2, relacionadas con prados y encharcamientos estacionales, y F4 de lagunas permanentes, situadas hacia la parte basal del conjunto). La sucesiva disposición de los cuerpos de arenas oscuras marcaría el ascenso del nivel freático propiciado por la acumulación de arena que se iba depositando sobre el área estudiada. Estas sucesivas posiciones del nivel freático vienen también marcadas por

niveles discontinuos de arenas enrojadas (F3), que marcarían la posición del nivel freático bajo las áreas dunares e interdunares secas.

Los paleosuelos y los niveles rojizos tienen un buzamiento subhorizontal que es sensiblemente paralelo al nivel freático actual y a la superficie topográfica de las actuales zonas interdunares húmedas. La morfología lenticular de estos depósitos se origina por el mecanismo de alternancia de dunas e interdunas (McKee y Moiola, 1975), siendo cuerpos de poco espesor, especialmente en sistemas dunares originados por vientos unidireccionales (Ahlbrandt y Fryberger, 1982).

### Edad

Para establecer la edad de funcionamiento del sistema eólico de Cantalejo se ha tratado de datar los niveles edafizados (F2) intercalados en las arenas eólicas. El lavado y mineralización de la materia orgánica en estos niveles es muy variable, por lo que el contenido recuperable en materia orgánica en general es muy bajo y solamente se ha podido realizar la datación absoluta mediante el método del  $C^{14}$  de las cinco muestras indicadas en el corte de la figura 4 (tabla 1). Dichas dataciones han sido realizadas en el laboratorio Beta Analytic (Miami, EE.UU.); debido al bajo contenido en materia orgánica de las muestras S3-1, AO-2 y AH-1, ha sido necesario emplear la técnica AMS. En cambio la muestra B-1 es un pequeño fragmento de materia orgánica quemado incluido en el sedimento (tabla 1).

Los resultados de las dataciones absolutas, sin embargo, deben considerarse como orientativos, tanto porque se desconoce el tiempo de residencia de la materia orgánica analizada durante el período de desarrollo del perfil edáfico, como por el hecho de la heterocronía de los niveles de paleosuelos, lo cual también sugieren Dabrio *et al.* (1996).

Temíño (1994) cita los resultados obtenidos en dos muestras (S3-1 y SV-2; ver fig. 3) para un mismo nivel de paleosuelo; dichas dataciones dieron unas edades de  $2.210 \pm 60$  años BP (S3-1, datos calibrados, ver cuadro 1) y  $1.490 \pm 130$  años BP (SV-2, datos sin calibrar, únicos disponibles, ver cuadro I). Los datos de edad son relativamente próximos, siendo más antigua la muestra situada más hacia el W y a mayor profundidad. La ligera diacronía del nivel datado es consistente con el mecanismo de formación de estos depósitos de zonas interdunares húmedas como ponen de manifiesto McKee y Moiola (1975).

De las otras tres dataciones, una corresponde al nivel de paleosuelos más profundo, proporcionando

una edad de  $10.200 \pm 60$  años BP (muestra AO-2, datos calibrados, ver tabla 1); otra corresponde al nivel de paleosuelos más profundo de la parte oriental del área estudiada, con una edad de  $6.120 \pm 60$  años BP (muestra AH-1, datos calibrados, ver cuadro I). En este último nivel también se ha conseguido realizar una datación sobre un pequeño fragmento de materia orgánica quemado, que se ha datado en  $10.240 \pm 80$  años BP (muestra B-1, datos calibrados, ver tabla 1) y que se interpreta como derivado por removilización eólica.

Alternativamente, el dato de la muestra AH-1 se podría interpretar como una edad rejuvenecida; en este caso, la edad de la muestra B-1 sería coherente con la de la muestra AO-2, por lo que todas ellas se deberían interpretar como pertenecientes al nivel de paleosuelos más antiguo. Sin embargo, en la zona central del área estudiada, los datos estratigráficos (fig. 4), indican la existencia de tres paleosuelos superpuestos, lo que parece sugerir una correlación de los paleosuelos como la señalada en la figura 4, por lo que la muestra B-1 se interpreta como heredada, en vez de la muestra AH-1 rejuvenecida.

Por último, hay que tener en cuenta que los niveles de paleosuelos más bajos no son la base del conjunto eólico, sino que aún existen depósitos eólicos estratigráficamente por debajo (fig. 4).

En conjunto, estos resultados parecen sugerir que la edad de comienzo de funcionamiento del sistema eólico en esta zona es ligeramente más antigua en la parte occidental que en la parte oriental ( $10.200$  años BP frente a  $6.120$  años BP), lo que es coherente con la interpretación de avance de todo el sistema eólico desde el W hacia el E.

En función de la distribución y correlación de las facies descritas, junto con las dataciones disponibles, se puede interpretar la existencia de cuatro episodios en los que el desarrollo de los paleosuelos parece ser significativo y que están separados entre sí por etapas sin paleosuelos. El paleosuelo más antiguo tendría una edad en torno a  $10.200$  años BP («a» en la fig. 4); posteriormente, hacia los  $6.100$  años BP se desarrolla una segunda etapa («b» en la fig. 4). Por encima se situaría un tercer nivel de paleosuelos («c» en la fig. 4) que ha sido datado entre  $2.200$  y  $1.500$  años BP. Finalmente, los niveles más recientes («d» en la fig. 4) corresponden a los suelos relacionados con las actuales zonas interdunares húmedas, cuya edad de funcionamiento más antigua no ha sido precisada mediante datación isotópica.

En cualquier caso, estas dataciones permiten asegurar que la sedimentación eólica en esta zona ha tenido lugar a lo largo del Holoceno. Sin embargo, en otras zonas de la cuenca del Duero la actividad eólica pudo comenzar al menos en el Pleistoceno

Tabla 1.—Datos de edad de C<sup>14</sup> sin calibrar y calibrados (1 sigma de desviación) expresados en años BP.

Muestra	N.º laboratorio	Edad medida, sin calibrar (años BP)	Relación C <sup>13</sup> /C <sup>12</sup>	Edad convencional, calibrada (años BP)	Tipo de muestra - tratamiento
SV-2	Beta 68498	1.490 ± 130	—	—	Sedimento orgánico - estándar
S3-1	Beta 68496	2.250 ± 60	-27,4	2.210 ± 60	Sedimento orgánico - AMS
AH-1	Beta 83079	6.160 ± 60	-27,7	6.120 ± 60	Sedimento orgánico - AMS
AO-2	Beta 83081	10.220 ± 60	-26,6	10.200 ± 60	Sedimento orgánico - AMS
B-1	Beta 83082	10.240 ± 80	-25,1	10.240 ± 80	Material quemado - estándar

Las muestras han sido analizadas en los laboratorios Beta Analytic Inc. (Estados Unidos), de la muestra SV-2 el laboratorio sólo nos ha facilitado la edad sin calibrar. Las muestras consistentes en sedimentos orgánico son arenas oscuras interpretadas como niveles edafizados (F2). Las muestras analizadas con tratamiento estándar contienen al menos de 1 a 4 gr de carbono final, después de los pretratamientos (normalmente lavados ácidos, excepto para B-1 que consistió en lavado ácido-alcalino-acido); las muestras analizadas por AMS contienen entre 0,001 a 0,3 gr de carbono, estos análisis se han realizado en el Lawrence Livermore National Laboratory (Estados Unidos).

Medio (Pérez González, 1979; Molina y Pérez González, 1989). Lo que sugiere que la progradación del sistema eólico no alcanzó esta zona de borde hasta el Holoceno.

### Discusión y conclusiones

Los arenales estudiados forman parte de los recubrimientos eólicos cuaternarios que existen en amplias zonas de la Cuenca del Duero (Alcalá del Olmo, 1974; Pérez González, 1979; Alvarez *et al.*, 1987). El área estudiada se sitúa en el borde del complejo eólico, el cual se caracteriza por tener poco espesor. Como peculiaridad existe una interacción con el nivel freático, que está muy próximo a la superficie, y permite el desarrollo de áreas encharcadas, dando lugar a un sistema de dunas-humedales. Tanto por el hecho de estar en el borde del complejo, como por su poco espesor, se ha podido estudiar la distribución de ambientes sedimentarios en superficie y extender el estudio en profundidad caracterizando la evolución del complejo en los últimos 10.000 años.

Las arenas eólicas, aunque han sido modificadas y fijadas mediante un pinar de repoblación, todavía presentan morfologías dunares que permiten su reconocimiento. Existe una cierta variedad de tipos dunares, dominando las dunas transversas con pequeñas formas parabólicas y barjanoides asociadas; entre las dunas se desarrollan zonas interdunares secas y húmedas dependiendo de la profundidad del nivel freático.

En profundidad, mediante sondeos, se pueden distinguir fácilmente las arenas del complejo eólico del resto de los materiales del sustrato. Las arenas eólicas son subredondeadas, claras, sueltas y homométricas; mientras que las del sustrato son arenas arcillosas, compactas, de color marrón o verdoso, angulosas y con mucha mayor variación

en cuanto al tamaño de grano, predominando las arenas de grano grueso, cuyo transporte por medio eólico es más difícil. Las marrones corresponden inequívocamente al Terciario, pero el origen de las verdosas no es claro. La presencia de numerosas terrazas fluviales, a cotas diferentes, de los ríos de esta región (Fernández García, 1988) hace pensar que las arenas verdosas del sustrato pueden corresponder a terrazas altas del río Cega que están recubiertas por arenas eólicas. Siendo las arenas fluviales la fuente principal a partir de las cuales se separó la fracción de arenas eólicas. Un origen de las arenas a partir de las arenas cretácicas se puede descartar (Alcalá del Olmo, 1974), debido a la mayor proporción de feldespatos en las arenas eólicas frente a las cretácicas.

En los sondeos realizados se pueden distinguir fácilmente los depósitos correspondientes a antiguas zonas interdunares húmedas, por sus contenidos en arcillas y colores oscuros, que les hace similares a los suelos de las zonas de interdunas húmedas actuales. Sin embargo, la distinción entre depósitos dunares y depósitos de zonas interdunares secas no es posible, debido a que no se observan estructuras sedimentarias en los testigos de sondeos.

La distribución de las facies en profundidad indica que las arenas progresaron hacia el E, pendiente arriba, a lo largo de un suave paleorrelieve del sustrato. La disposición lenticular heterócrona de los niveles de zonas interdunares húmedas se origina al progradar las dunas hacia el este, lo que hace que la posición de los prados y lagunas se desplace también en esa dirección; los paleosuelos serán más antiguos en sus porciones occidentales que en las orientales, como se observa por las dos dataciones realizadas en el nivel «c» de paleosuelos (fig. 4) y como ha sido descrito por otros autores (McKee y Moiola, 1975).

El actual sistema eólico ha existido en el área estudiada durante los últimos 10.000 años, si bien

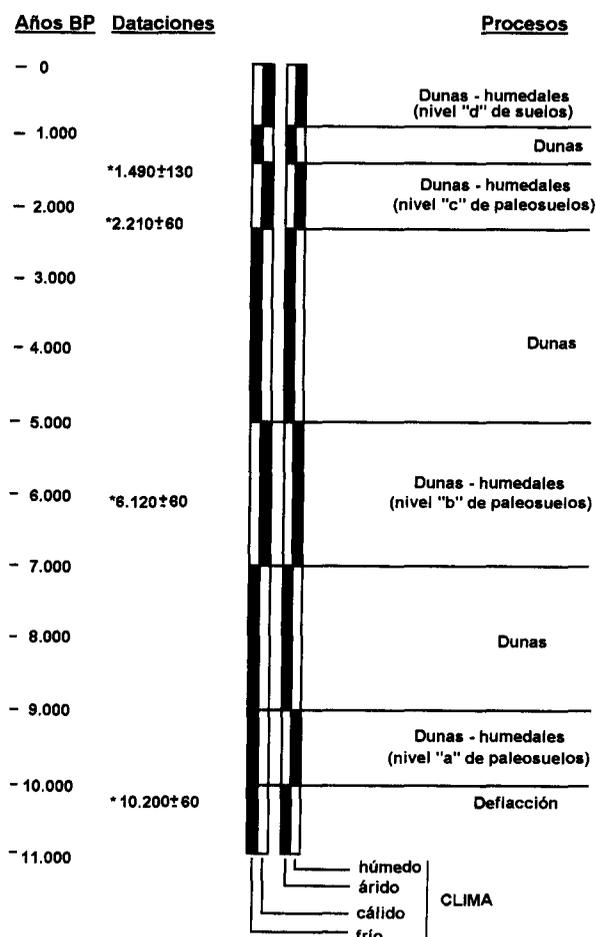


Fig. 5.—Distribución temporal de los grandes períodos climáticos de la zona estudiada (basados en Font-Tulot, 1988) mostrando en él la posición de las muestras datadas (\*). Los períodos con desarrollo de dunas-humedales están asociadas a épocas más húmedas, en las que el nivel freático debe estar alto; mientras que los períodos con desarrollo de dunas están asociados a épocas más áridas y nivel freático bajo. El inicio del desarrollo de la acción eólica en la zona estudiada se sitúa hacia los 10.000 BP durante un período árido asociado a procesos de deflacción.

la existencia de los humedales parece haber sido discontinua a lo largo del tiempo. La alternativa de períodos con y sin humedades parece tener un origen climático. En la figura 5 se muestra un esquema en el que se sintetizan las conclusiones de Font-Tulot (1988) sobre los grandes episodios de evolución climática. Los períodos húmedos serían los más favorables para el establecimiento de lagunas y el desarrollo de la vegetación y de los procesos edáficos, especialmente si van acompañados de climas cálidos. Font-Tulot (1988) menciona la existencia de cuatro grandes períodos relativamente húmedos, uno de ellos frío y tres más cálidos: el primero entre 10.000 y 9.000 años

BP, el segundo entre 7.000 y 5.000 años BP, el tercero entre 2.300 y 1.500 años BP y finalmente el actual que comenzó hace unos 1.000 años BP. Los límites entre los episodios climáticos no son bruscos, por lo que las edades indicadas deben considerarse orientativas.

Como se puede observar existe casi una correlación directa entre los niveles datados y los períodos húmedos (fig. 5). La datación más antigua del nivel basal de paleosuelos (nivel «a», fig. 4) da una edad de  $10.200 \pm 60$  años BP lo que se puede correlacionar con el comienzo de las condiciones húmedas en la región. El período anterior con condiciones frías y áridas puede corresponder a los momentos iniciales de instalación de todo el sistema eólico, que debe comenzar lógicamente con la acción del viento que barre los materiales más finos y deja un pavimento de cantos y arenas gruesas mediante un proceso de deflacción típico de las áreas marginales de los sistemas eólicos (génesis de las facies F5).

El segundo período húmedo coincide con la datación de los niveles «b» (fig. 4) de paleosuelos en  $6.120 \pm 60$  años BP (fig. 5). El tercer período húmedo viene acotado por las dataciones de los paleosuelos del nivel «c» (fig. 4) cuya edad oscila entre  $2.210 \pm 60$  años BP y  $1.490 \pm 130$  años BP (fig. 5). Finalmente, aunque no existen dataciones, los paleosuelos más superficiales son actuales o paractuales (nivel «d», fig. 4) y corresponderían al período actual húmedo que comenzó hace unos 900 años.

La posición de los niveles edáficos datados respecto a las grandes variaciones climáticas (fig. 5) sugiere que la movilización de los cuerpos dunares se produjo durante períodos climáticos áridos, mientras que la instalación y extensión del sistema dunas-humedales está ligado a episodios húmedos. Durante estos últimos se produciría simultáneamente un ascenso del nivel freático y la inmovilización o ralentización del sistema dunar como consecuencia del desarrollo de vegetación en la región. Por el contrario, durante los períodos áridos, el consiguiente descenso del nivel freático y la reducción de la cubierta vegetal favorecerían la desaparición de los humedales y la reactivación del sistema dunar.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado gracias a la financiación de los proyectos: «Evolución geológica del sistema dunas-humedales de Cantalejo y análisis de su incidencia en la pérdida actual de superficie encharcada» de la Universidad de Alcalá (UAH 047/95) y «Caracterización de los procesos de degradación de los medios hídrico, edáfico y biótico por el almacenamiento de residuos sólidos. Propuestas de pautas para la evaluación de impacto ambiental» de la CICYT (NAT 89-0995).

## Referencias

- Ahlbrandt, T. S. y Fryberger, S. G. (1980). Eolian deposits in the Nebraska Sand Hills. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 1120A, 24 págs.
- Ahlbrandt, T. S. y Fryberger, S. G. (1982). Introduction to eolian deposits. En: *Sandstone Depositional Environments*, Scholle, P. A. and Spearing, D. (eds.). Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem., 31, 11-47.
- Alcalá del Olmo, L. (1974). *Estudio edáfico sedimentológico de los arenales de la Cuenca del Duero*. Tesis doctoral (inédita), UCM.
- Alonso Romera, E., Moreno García, A. M., y González Parra, J. (1996). Disponibilidad de metales pesados (Cu, Zn, Pb y Cd) en suelos y sedimentos de zonas húmedas (Segovia, España). *Tomo Extraordinario 125 Aniversario de la R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 337-339.
- Alvarez, F., Casquet, C., Fuster, J. M., Martín Parra, L. M., Martínez-Salanova, J., y Pinado, M. (1987). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Nava de la Asunción (hoja n.º 456)*. Serv. Publ. Min. Industria y Energía.
- Alvarez, A. M., Cala, V., y González, J. (1993). El factor edáfico en humedades de Cantalejo (provincia de Segovia). *Ecología*, 7, 37-45.
- Casas, J. (1973). *Sedimentología y mineralogía de los materiales detríticos del borde Norte de la Sierra del Guadarrama en el interfluvio Eresma-Voltoya*. Tesis doctoral (inédita). Universidad Autónoma de Madrid, 224 págs.
- Dabrio, C., Borja, F., Zazo, C., Boersma, J. R., Lario, J., Goy, J. L., y Polo, M. D. (1996). Dunas eólicas y facies asociadas pleistocenas y holocenas en los acantilados del Asperillo (Huelva). *Geogaceta*, 20, 1089-1092.
- Fernández García, P. (1988). Evolución cuaternaria y sistemas de terrazas en la subfosa terciaria de Valverde del Majano y el Macizo de Sta. M.ª Real de Nieva (Segovia). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol.)*, 84, 69-83.
- Font-Tullot, I. (1988). *Historia del clima en España. Cambios climáticos y sus causas*. Ed. Inst. Nac. Meteorol., Madrid, 297 págs.
- I.T.G.E. (1977). *Investigación hidrogeológica en la zona norte del sistema 11. Area Turégano-Sepúlveda*. Inédito 33531. Inédito.
- McKee, E. D. (1979). Introduction to a study of global sand seas. En: *A global study of sand seas*, U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 1052, 1-19.
- McKee, E. D. y Moiola, R. J. (1975). Geometry and growth of the White Sands, New Mexico, dune field. *U.S. Geol. Survey, J. Res.*, 3, 59-66.
- Molina, E. y Pérez González, A. (1989). Depresión del Duero. En: *Mapa del Cuaternario de España. Inst. Tecnol. Geomin. España*, 153-161.
- Nielson, J. y Kocurek, G. (1986). Climbing zibars of the Algodones. *Sedim. Geol.*, 48, 1-15.
- Pérez González, A. (1979). El Cuaternario de la región central de la Cuenca del Duero y sus principales rasgos geomorfológicos. *Temas Geológico-Mineros*, 6, 717-740.
- Pye, K. (1993). Late Quaternary development of coastal parabolic megadune complexes in northeastern Australia. En: Pye, K., y Lancaster, N. (eds.), *Aeolian sediments: Ancient and modern*, Spec. Publs. Int. Ass. Sediment, 16, 23-44.
- Temiño, J., Rebollo, L. F. y Galán, J. J. (1995). Análisis del origen y la dinámica de las Lagunas de Cantalejo (Segovia) y caracterización de los rasgos ambientales derivados de su relación con las aguas subterráneas. *Hidrogeología y recursos hidráulicos*, 20, 339-352.
- Temiño, J. y Bustamante, I. (1993). Primeros resultados obtenidos en experiencias de laboratorio destinados a caracterizar el comportamiento de contaminantes inorgánicos en materiales arenosos. *Geogaceta*, 13, 122-124.
- Temiño, J. y Rebollo, L. F. (1994). Delimitación del enclave de contaminación del vertedero de residuos sólidos urbanos de Cantalejo (Segovia). *Análisis y Evolución de la contaminación de las aguas subterráneas*, Tomo 2, 51-62.
- Temiño, J. (1994). *Caracterización hidrogeológica del entorno del vertedero de residuos sólidos urbanos de Cantalejo (Segovia) y su enclave de contaminación*. Tesis doctoral (inédita). Universidad de Alcalá, 180 págs.

Recibido el 7 de febrero de 1997

Aceptado el 7 de mayo de 1997