

PROCESOS EÓLICOS TARDIGLACIARES EN LA SUBMESETA SEPTENTRIONAL: CRONOLOGÍA DEL MANTO ARENOSO DE LA TIERRA DE PINARES

A. Díez Herrero (1), M.D. Bateman (2), J.A. López Sáez (3) y J. Vegas Salamanca (4)

(1) Dpto. de Ingeniería Geológica y Minería. Facultad de Ciencias del Medioambiente,
Universidad de Castilla la Mancha, 45071 Toledo

(2) Sheffield Centre for International Drylands Research. Department of Geography,
University of Sheffield. S10 2TN Sheffield (U.K.).

(3) Laboratorio de Arqueobotánica. Instituto de Historia (CSIC). Duque de Medinaceli S. 28014 Madrid.

(4) Dpto. de Geodinámica. Facultad de CC. Geológicas (UCM). Ciudad Universitaria. 28040 Madrid.

RESUMEN: La Tierra de Pinares es una comarca natural situada en el sector centro-meridional de la submeseta norte, comprendiendo parte de las actuales provincias de Segovia, Valladolid y Ávila, y abarcando una extensión de unos 1000 km² entre los ríos Zapardiel, Duero y Duratón. Geológicamente, se localiza próxima al borde meridional de la cuenca intraplaca cenozoica del Duero, en su límite con el Sistema Central español, asentándose fundamentalmente sobre materiales sedimentarios pliocenos y cuaternarios de naturaleza detrítica. El más superficial de los mantos arenosos cuaternarios que recubren irregularmente esta comarca ha sido clásicamente referido en la bibliografía como "arenas voladoras" o arenas eólicas, y será el objeto de estudio del presente trabajo.

Para el análisis del registro sedimentario superior de la Tierra de Pinares se procedió al levantamiento de seis columnas estratigráficas representativas de los sectores oriental (Burgomillado y Sebúlcor), central (Río Pirón y AguilaFuente) y occidental (Coca Voltoya y Castillo). Además de las medidas y observaciones convencionales (estructuras sedimentarias, paleocorrientes, litología, dimensiones, color...), se procedió a la toma de muestras para el estudio petrológico, granulométrico, paleopalinológico y su datación mediante luminiscencia. Esta última técnica consistió en la combinación de termoluminiscencia (TL) y luminiscencia de estimulación óptica (OSL), con tratamiento químico, estimación de ED por el método de dosis aditiva y análisis ICP-MS. De forma paralela se revisó y completó la cartografía geomorfológica mediante fotointerpretación estereoscópica de fotografías aéreas verticales y recorridos de campo, y se acometió una exhaustiva revisión bibliográfica.

Los resultados obtenidos permiten atribuir el depósito de los mantos arenosos a una alternancia entre procesos fluviales (corrientes entrelazadas o *braided* de arenas) y procesos eólicos de removilización (campos de dunas transversales barjánicas y mantos) en las llanuras de inundación arenosas y terrazas, con una notable escasez de vegetación densa. Los primeros procesos predominan en las proximidades de los principales cauces, mientras que los segundos alternan con fases de edafización en los interfluvios, por lo que la sedimentación fluvial fue progresivamente restringiéndose en favor de la acción eólica. No obstante, se observa una importante influencia de factores locales, como la presencia de paleorrelieves que generan depocentros de sedimentación (Burgomillado), disposiciones locales del relieve que generan paleocorrientes contrarias (Río Pirón), o biselado de los mantos arenosos por el desarrollo de superficies erosivas favorecidas por la arroyada difusa.

Cronológicamente pueden distinguirse dos fases de depósito: una generalizada entre 12,5 y 10,2 ka cal BP, centrada en la etapa tardiglaciaria seca y fría del Dryas reciente y que se prolonga hasta el periodo frío holoceno del Preboreal (Burgomillado₁₋₆, Río Pirón₁ y Coca Voltoya₁); y otra más restringida espacialmente, en el intervalo 8,8 a 6,5 ka cal BP (Burgomillado₇, Río Pirón₂ y Sebúlcor), atribuible a la etapa más templada del periodo Atlántico antiguo.

Dichos resultados se han comparado con otros depósitos coetáneos de la península Ibérica y de Europa noroccidental para obtener datos sobre los condicionantes paleoclimáticos (vientos predominantes, precipitación...) y biogeográficos (vegetación) de la actividad eólica. Ello ha permitido encontrar puntos de convergencia entre los mecanismos genéticos y la cronología de los procesos eólicos en Europa noroccidental y las zonas interiores de la Meseta Ibérica.

PALABRAS CLAVE: Procesos eólicos, Tierra de Pinares, Tardiglaciario, Holoceno, luminiscencia, paleopalinología.

ABSTRACT: Tardiglacial Aeolian Processes in the Northern Spanish Plateau: Chronology of the Tierra de Pinares Sandcover. The Tierra de Pinares is positioned on the southern edge of the Duero sedimentary basin close to the northern part of the Variscian Massif which forms the Sierra de Guadarrama mountains. Approximately 1000 km² in size, it is bounded on the north, east and west by the Duero, Zapardiel and Duratón rivers respectively with its meridional edge lying approximately between Arévalo and the city of Cantalejo. The pine forest, from where it derives its name, is pri-

marily of *Pinus pinaster* with minor amounts of *Pinus pinea* and this extends, excluding settlements and river valleys, over the entire area.

The superficial sand unit of the Tierra de Pinares is formed of medium sub-arkosic sands, as subhorizontal beds clearly discordant to the underlying conglomerates, sands, silts and marls with gypsum and calco-dolomite materials formed as the middle/distal deposits of Paleogene and Neogene alluvial fans.

Detailed sedimentological investigations of six outcrops (Burgomillodo, Sebúlcor, Aguilafuente, C.M. Río Pirón, Coca-Voltoya and Coca-Castillo) reveal an alternation of braided fluvial and aeolian processes in the sedimentation of sand deposits. Two phases of deposition are identified from eleven luminescence (TL and OSL) dates: an upper unit between 6.5-8.8 ky cal BP during the warm-aridity of the Atlantic period, and a lower unit between 12.5-10.2 ky cal BP coinciding with the cold-aridity of the Younger Dryas event and the Preboreal period. The latter is the dominant phase over the whole region for sand deposition. From this it is concluded that the main phases of aeolian activity in the Eastern Tierra de Pinares coincide with the transition from cold dry to warm dry periods with the palaeo-winds having a strong northerly component.

The Younger Dryas climatic oscillation is thought to have been the regional driving mechanism for the extensive aeolian deposits found in NW Europe. Our data shows a period of enhanced aeolian activity in Central Spain in the period ca. 10-13 ka which coincides with a similar peak in the NW European aeolian sand record. The strong correlation of the two records suggests that climate was indeed the driving force behind intensified aeolian activity during the Younger Dryas period with the exact aeolian depositional style depending on local factors.

KEY WORDS: Aeolian processes, Tierra de Pinares, Late Glacial, Holocene, luminescence, palaeopalynology.

1. Introducción

La Tierra de Pinares es una comarca natural situada en la submeseta septentrional (o Cuenca del Duero), comprendiendo parte de las actuales provincias de Segovia, Valladolid y Ávila (Comunidad Autónoma de Castilla y León). Con una extensión de unos 1.000 km², presenta cartográficamente una morfología trapezoidal, elongada en dirección este-oeste, y limitada al este, norte y oeste por los ríos Duratón, Duero y Zapardiel, respectivamente (Figura 1). La característica más relevante de la comarca, y de la cual toma el nombre, es la presencia de una extensa y continua masa forestal de pino resinero (*Pinus pinaster* Ait.), junto al que aparece en menor proporción el pino piñonero (*Pinus pinea* L.).

Geológicamente, se localiza próxima al borde meridional de la cuenca intraplaca cenozoica del Duero, en su límite con el Sistema Central español (Sierra de Guadarrama). La comarca se asienta fundamentalmente sobre materiales sedimentarios pliocenos y cuaternarios de naturaleza detritica. Estas litologías se encuentran suprayacentes sobre facies conglomeráticas, arenosas, limosas, margosas, yesíferas y calcodolomíticas, que constituyen los depósitos medios y distales de abanicos aluviales paleógenos y miocenos; o sobre materiales propios de los macizos satélites del Sistema Central, tales como: pizarras metamórficas, cuarcitas, granitoides, cuarzoarenitas, areniscas dolomíticas, dolomías, calizas y margas.

Desde los trabajos más antiguos de índole geológico-geomorfológica sobre el manto arenoso superficial de la Tierra de Pinares, que se remontan a mediados del siglo XIX (Prado, 1854), hasta los estudios más recientes (Bateman & Díez-Herrero, 2001), los antecedentes hacen hincapié en la doble génesis fluvio-eólica de estos depósitos. Sin

embargo, aún existen importantes lagunas en el conocimiento paleogeográfico y cronoestratigráfico de esta unidad, su significado geomorfológico, y la correlación con otras semejantes y contemporáneas en diversas regiones de Europa noroccidental.

2. Material y métodos

Para el estudio geomorfológico y sedimentológico del manto arenoso superficial de la Tierra de Pinares se seleccionaron, por las condiciones de exposición y representatividad, un conjunto de seis afloramientos distribuidos uniformemente por los sectores oriental (Burgomillodo y Sebúlcor), central (Aguilafuente y Río Pirón) y occidental (Coca Castillo y Voltoya). Su situación geográfica y características se recogen en la Figura 1 y la Tabla 1.

Además de los clásicos sistemas de recopilación bibliográfica, revisión cartográfica, estereoscopia de pares de fotografías aéreas verticales y estudio de itinerarios de campo, las técnicas de trabajo se centraron en tres aspectos: el análisis sedimentológico, la datación de los materiales mediante luminiscencia y el análisis paleopalínológico. De forma complementaria, se utilizaron informaciones procedentes de técnicas históricas y arqueológicas.

2.1. Análisis sedimentológico

Se realizó el levantamiento de columnas estratigráficas o de perfiles longitudinales de los seis afloramientos; de forma subsidiaria se procedió a la medida de direcciones de paleocorrientes sobre estructuras sedimentarias em-

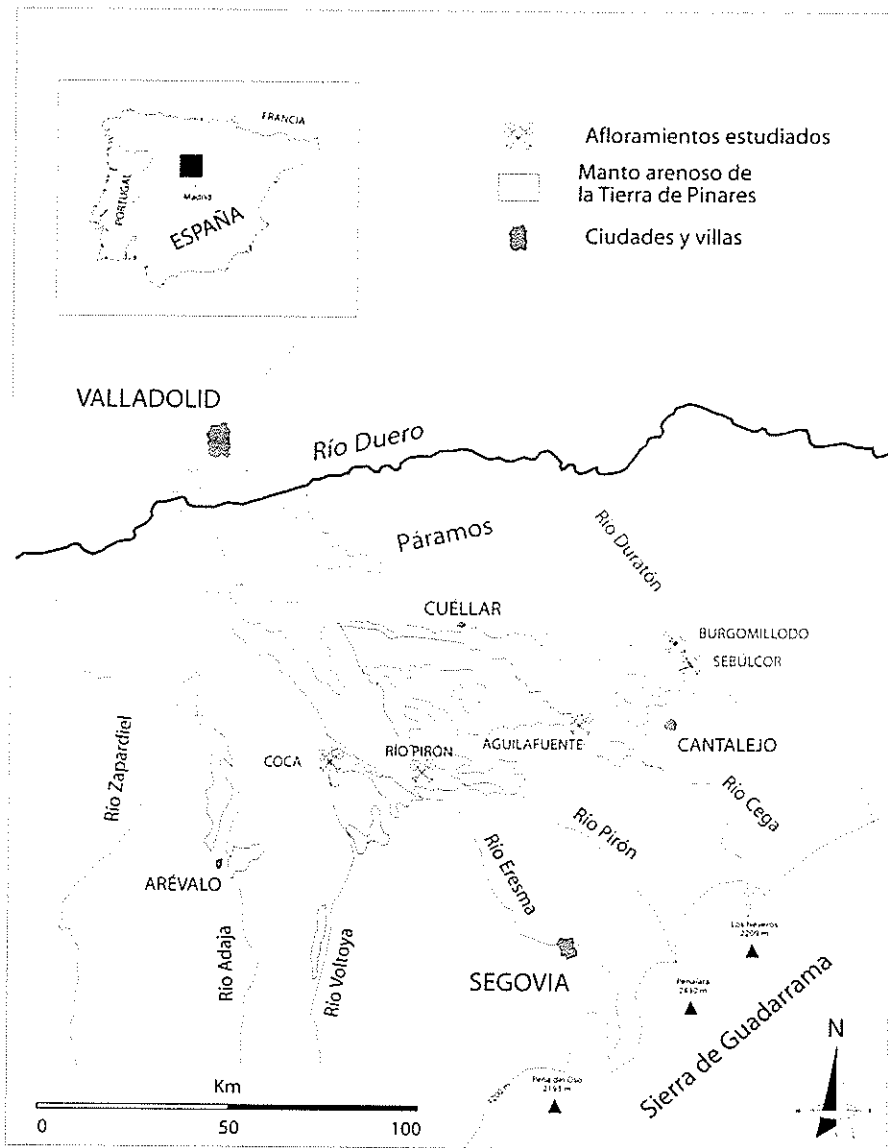


Figura 1. Mapa de situación del manto arenoso de la Tierra de Pinares, con la ubicación de los afloramientos citados en el presente estudio.

Afloramiento	Latitud N41°	Longitud W	X UTM	Y UTM	Z (m)	h (m)	Municipio	Muestras
Burgomillodo			0425600	4576850	851	35	Carrascal del Río	BUR - n
C.M.R.P.	11°55'9"	04° 22'05"9"	0385273	4561730	830	6	Navas de Oro	RP - n
Castillo	12°48'3"	04° 31'43"2"	0371839	4563527	792	5	Coca	CC - n
Voltoya	12°27'9"	04° 31'59"4"	0371460	4562953	786	4	Coca	CV - n
Portillo Pez	18°50'0"	03° 52'45"0"			890	¿?	Sebúlcór	SEB - n
L.D.yA., S.L.	14°29'2"	04° 06'12"1"	0407557	4566171		5,9	Aguilafuente	A - n

Tabla 1. Situación (coordenadas geográficas y UTM 30T, cota absoluta y municipio) y características (altura de afloramiento y siglado de muestras) de los afloramientos estudiados en la Tierra de Pinares.

pleando la brújula y el clinómetro. Los resultados para las columnas de los afloramientos de la Tierra de Pinares están reflejados en la Figura 2.

Paralelamente se realizó un análisis granulométrico de las muestras mediante tamizado, empleando una torre de ocho tamices normalizados Eurotamiz entre 8 y 0,0625 mm de luz de malla y un agitador analógico CISA. Además se estudió la composición mineralógica, redondez y exoscopia de

las muestras mediante lupa binocular y microscopía óptica convencional; los resultados para las muestras de la columna de Burgomillodo se muestran en la Tabla 2.

2.2. Datación por luminiscencia

Todas las muestras para datación fueron tomadas y preparadas mediante procedimientos estandarizados (Bateman

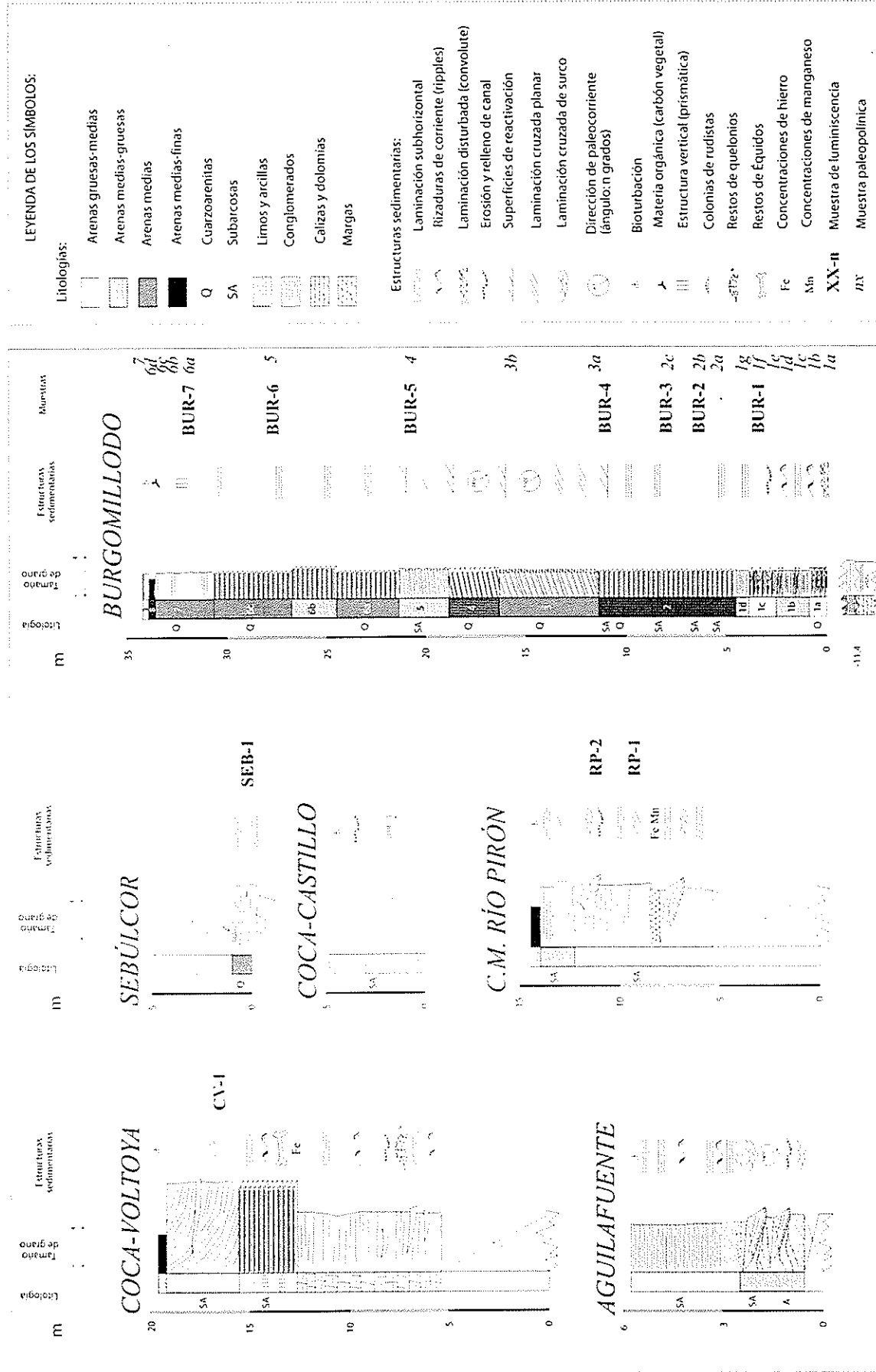


Figura 2. Columnas estratigráficas de los afloramientos y situación de las muestras.

& Díez-Herrero, 1999). Se midieron en un lector de luminiscencia Risø ajustado con una fuente beta de Sr⁹⁰. Toda la luminiscencia se monitorizó mediante un filtro Hoya U-340, mientras que la estimulación óptica de luz verde (OSL-GLSL) se suministró a través de una lámpara halógena de 75 W con filtros GG420 y de interferencia. Las dosis de radiación acumulada o paleodosis (D_e) se determinaron tanto por dosis aditiva multi-aleuota (MAAD) para TL, como aleuota sencilla (SAAD) para GLSL. Las tasas de dosis (dosis anuales de fondo) se calcularon mediante ICP para uranio y torio, y mediante AAS para el potasio. Los resultados para las muestras de la Tierra de Pinares se reflejan en la Tabla 3.

2.3. Análisis paleopalínológico

Se tomaron del afloramiento de Burgomillado un total de 19 muestras para análisis palinológico, que fueron sigladas de acuerdo a la unidad donde se obtuvieron como: 1a, 1b, 1c, 1d, 1e, 1f, 1g, 2a, 2b, 2c, 3a, 3b, 4, 5, 6a, 6b, 6c, 6d y 7. Su ubicación se señala en la Figura 2.

Las muestras fueron tratadas con 7% HCl para eliminar carbonatos, maceradas en 10% NaOH y lavadas sucesivamente para remover los ácidos húmicos; calentadas en 45% HF durante dos horas y, tras la centrifugación, retra-

tadas de nuevo con 7% HCl para eliminar coloides. Finalmente, fueron concentradas mediante la adición de licor de Thoulet (Goeury & de Beaulieu, 1979), y montadas en glicerina.

Para la identificación de los principales tipos polínicos nos servimos de las claves de Moore *et al.* (1991), Reille (1992, 1995), así como de la palinoteca o colección de referencia del Laboratorio de Arqueobotánica del Instituto de Historia (CSIC, Madrid).

3. Resultados

3.1. Análisis petrológico

La mayor parte de las muestras obtenidas en las columnas estratigráficas corresponden a arenas con granulometrías de tamaños medios (0,25-0,5 mm), medios-gruesos (0,5-1 mm) y medios-finos (0,125-0,25 mm), con prácticamente nula representación de gravas y escasa presencia de matriz limo-arcillosa (nunca superior al 2,1 %); la selección es buena a muy buena.

La composición de estas arenas es fundamentalmente cuarzo, encontrándose en proporciones que varían entre el 65 y 99 %, según los afloramientos estudiados y las

Muestra	Q (%)	Fto. (%)	F.R. (%)	Accesorios	Redondez	Exoscopia granos Q	Génesis
BUR - 1A	96	2	2	-	SR	Limpios, lisos, y mates	Fluvial-eólica
BUR - 1C	75	20	3-5	Ru, Bt	SR-SA	Rugosos y mates	Fluvial
BUR - 1D	75	20-22	3	Ru, Bt, Tu	SR-SA	Mates y algo picados	Fluvial-eólico
BUR - 1E	78	5-7	15	Bt, Ru	SA-SR	Mates y restos picaduras	Fluvial
BUR - 1F	85	12	2-3	Bt, Ru	SR (SA)	Mates o mates picados	Fluvial-eólico
BUR - 1G	73-75	20	5-7	Bt, Ru	SR-SA	Muy limpios y algo mates	Eólico-fluvial
BUR - 2A	96-97	1-2	1	-	SR	Muy limpios y mates	Fluvial-eólico
BUR - 2C	95	4	1	-	SR	Muy limpios y mates	Fluvial-eólico
BUR - 2D	96	3	1	-	SR	Limpios y algo mates	Eólico-fluvial
BUR - 3A	97	2	1	Ru, Tu	SR-SA	Limpios y algo mates	Fluvial-eólico
BUR - 3B	97	2	1	Ru	SR	Limpios y mates picados	Fluvial-eólico
BUR - 4	98-99	1-2	-	Ru, Tu, Zr	SA-SR	Muy limpios y lisos	Eólico
BUR - 5	97	3	-	Ru, F.R.	SA-SR	Limpios y picados	Eólico
BUR - 6A	96	3	1	Ru, Tu, Zr	SA-SR	Limpios y picados	Eólico
BUR - 6B	96-97	2	1	Ru, Zr	SA (SR)	Mates y algunos picados	Fluvial?-eólico
BUR - 6C	98	2	1	-	SA-A	Sucios, corroidos, picados	Fluv.-eól.-edaf.
BUR - 6D	96-97	2	1	-	SA-SR	Sucios, alterados, picados	Fluv.-eól.-edaf.
BUR - 7	98	1	1	Ru, Plag	SR-R	Limpios y lisos	Eólico?-fluvial

Tabla 2. Características composicionales (cuarzo, feldspato, fragmentos de roca y accesorios), de redondez (redondeados, subredondeados, subangulosos y angulosos), exoscópicas, e interpretaciones genéticas de las muestras correspondientes a la columna de Burgomillado.

muestras elegidas; en menor porcentaje contienen feldespato, principalmente potásico, entre el 1 y 22 %; y fragmentos de roca, de naturaleza metamórfica y granítica, entre el 1 y 7 % (Tabla 2). Según la clasificación de Pettijohn *et al.* (1973) para arenas detríticas, las muestras se encuentran en los campos de las subarcosas y cuarzoarenitas, siendo minoritarias las arcosas; de acuerdo a esta clasificación, se trataría de arenas muy maduras. La madurez de las arenas no puede justificarse únicamente por un elevado transporte desde el área madre, y posiblemente esté favorecida por ser arenas de segundo, tercer e incluso superiores ciclos de erosión-sedimentación, que aumentan el contenido en cuarzo; en este sentido, una de las posibles litologías-fuente serían las cuarzoarenitas cretácicas.

En cuanto a los caracteres texturales y los rasgos de las superficies de los granos, aparece todo un muestrario de marcas que pueden atribuirse a diferentes ambientes de sedimentación (Torcal *et al.*, 1984); la mayoría de las muestras estudiadas presentan rasgos fluviales, posteriormente modificados en mayor o menor medida, en un medio eólico (Tabla 2)

3.2. Interpretación sedimentológica de los afloramientos

El afloramiento de Burgomillado es, sin lugar a dudas, el más completo y representativo, permitiéndonos describir e interpretar diferentes asociaciones de facies sedimentarias, cuyo depósito parece corresponder a una alternancia de medios continentales aluviales y eólicos, con un claro predominio (al menos en espesor) de los primeros (Díez y Bateman, 1998; Bateman & Díez-Herrero,

1999). Los medios aluviales son típicamente fluviales, con asociaciones características de dominios de llanura arenosa (*sand-flat*) de las márgenes del canal (St-Sp-Sr-Sh-FI), formadas por migración de barras y dunas transversas subacuáticas (SB y FM) en ríos de múltiples canales y baja sinuosidad (entrelazados o *braided*) donde predomina la carga arenosa (facies St); paralelamente se localizan asociaciones correspondientes al dominio del canal e influencia mixta (Gm-St-Sp). Los depósitos eólicos corresponden al núcleo de morfologías dunares transversas a barjónicas, con laminación interna de medio-alto grado e intercalaciones de deslizamientos de arena (*sand slides*); se asocian con los depósitos fluviales de llanuras arenosas, por lo que la actividad eólica estaría restringida a las zonas secas, más alejadas de los canales funcionales.

La secuencia sedimentaria de C.M.R.P. es equivalente a la registrada en Burgomillado, tanto en los medios sedimentarios representados como en su interpretación ambiental. Hay que reseñar que los espesores son menores, por lo que podría hablarse de una serie condensada de interfluvio, donde los episodios fluviales están más restringidos espacio-temporalmente en favor de etapas de edafización e incluso deflación.

El relleno del barranco del Portillo de la Pez (Sebúlcór) se produjo mediante sucesivas tongadas de mantos arenosos, aprovechando que las paleodirecciones de transporte eólico (SO-NE) coincidían con la dirección del propio valle.

La secuencia sedimentaria de Aguilafuente contiene muy bien representados los términos fluviales de la serie frente a las secuencias de removilización eólica. Ello puede deberse a la proximidad del cauce del río Cega, que restrin-

Muestra	Código del Laboratorio	Prof. (m)	Tasa de dosis (mGy/ka)	Paleodosis TL(Gy)	Paleodosis OSL (Gy)	Edad TL (Ka)	Edad OSL (Ka)
BUR - 1	Shfd 95093	31,6	3,676 ± 0,208	49,1 ± 4,9		12,5 ± 1,0	
BUR - 2	Shfd 95094	28,8	3,713 ± 0,216	45,7 ± 4,0		12,3 ± 1,3	
BUR - 3	Shfd 95095	27,65	3,566 ± 0,205	43,1 ± 2,5		12,1 ± 1,0	
BUR - 4	Shfd 95096	24,05	3,609 ± 0,213	41,6 ± 2,5		11,5 ± 1,0	
BUR - 5	Shfd 95097	14,3	3,689 ± 0,214	42,2 ± 3,1		11,4 ± 1,1	
BUR - 6	Shfd 95098	7,3	2,973 ± 0,167	32,6 ± 2,8		11,0 ± 1,1	
BUR - 7	Shfd 95099	2,5	3,341 ± 0,200	21,6 ± 1,8	20,3 ± 2,3	6,5 ± 0,7	
RP - 1	Shfd 95102	4,2	5,016 ± 0,297	55,92 ± 3,33	44,96 ± 3,26	11,1 ± 0,9	9,0 ± 0,8
RP - 2	Shfd 95103	1,7	4,494 ± 0,254	39,87 ± 3,55	40,14 ± 3,28	8,7 ± 0,9	8,9 ± 0,9
CV - 1	Shfd 95100	2,4	4,254 ± 0,238	43,50 ± 7,99	42,66 ± 8,04	10,2 ± 2,0	10,0 ± 2,0
SEB - 1	Shfd 95104	0,5	3,564 ± 0,199		28,09 ± 3,34		7,9 ± 1,0

Tabla 3. Dosimetría y datos cronológicos de luminiscencia de las muestras correspondientes a la Tierra de Pinares.

gió la actividad eólica, predominando asociaciones de relle- no y migración de dunas arenosas en canales entrelazados.

Las secuencias sedimentarias de Coca (Voltoya y Casti- llo) son también equivalentes a la registrada en Burgomillo- do. Los menores espesores representados se podrían expli- car por el temprano encajamiento del río Voltoya en la su- perficie de Coca en busca del nivel de base que le marca el río Eresma, dejando colgados estos niveles y restringiendo la removilización fluvial de los depósitos; en este contexto sólo tiene sentido la removilización eólica y la edafización de de- pósitos fluviales antiguos.

3.3. Resultados cronológicos y paleopalinológicos de las muestras

Los resultados del análisis mediante luminiscencia (TL y OSL) de las once muestras analizadas están reflejados en la Tabla 3. Según los cuadros cronológicos al uso, las edades de bu- na parte de las muestras corresponden con el Pleistoceno Superior Final, al llamado Tardiglaciario wurmiense (estadio isotópico 2), en concreto al periodo del Dryas reciente. Se trata de un periodo frío y seco con interestadios más cálidos una vez superado el Pleniglaciario superior wurmiense (Dryas inferior o antiguo). Las muestras de la parte superior de los perfiles corresponderían al Holoceno, tanto a la etapa Pre- boreal y Boreal como al Atlántico, inmediatamente anterior al Óptimo Climático Postglaciario (5,5 ka B.P.). El clima se suaviza progresivamente después del tardi- y finiglaciario wur- miense, aunque tiene alguna fase fría, como el llamado avance glaciario de Larstig (6 ka B.P.).

En la secuencia paleopalinológica de Burgomillado se han definido 3 zonas polínicas:

1) Incluye las unidades litoestratigráficas 1 a 3. Desde el punto de vista de su paleovegetación, se caracteriza por una vegetación arbórea bien desarrollada (en torno al 50% del total) aunque de limitada extensión, que segura- mente colonizó los territorios anteriormente ocupados por formaciones estépicas durante el Dryas antiguo, que no queda recogido en cambio en esta secuencia. Entre las es- pecies arbóreas dominantes se encuentran principalmente aquellas de carácter boreal como *Pinus sylvestris* t. o *Betu- la*, así como cierta representación del bosque mesófilo (*Corylus*, *Quercus caducifolios*), cuya presencia podría atri- buirse a su desarrollo a partir de sus refugios. *Juniperus* t. es otro de los elementos del cortejo arbóreo-arbustivo pre- ponderante en esta biozona.

2) Comprende las unidades litoestratigráficas 4 a 6. A diferencia de la zona anterior, y aunque la vegetación arbórea sigue dominando sobre la herbácea, se produce un progreso muy sensible de los táxones mesotermófilos

como *Quercus caducifolios* y *Quercus perennifolios*, junto a *Corylus*, *Fraxinus* y *Ainus*. En cambio, *Pinus sylvestris* t. y *Betula* disminuyen sus porcentajes, al igual que *Junipe- rus* t. Es en este momento cuando se detecta la presencia de *Pinus mediterráneos* t., aunque en porcentaje ínfimos que nos impiden suponer su presencia local en la zona de estudio.

3) De acuerdo a la datación existente, esta zona, co- rrespondiente únicamente a la unidad litoestratigráfica 7, se situaría en la primera mitad del periodo Atlántico. La ve- getación arbórea supera el 70% del total, indicando un fe- nómeno de forestación muy manifiesto con respecto a la situación observada en el Interestadio Tardiglaciario en las dos biozonas anteriores. Entre las especies arbóreas domi- nan claramente las quercíneas, tanto caducifolias como perennifolias, acompañadas de abedul, olmo, aliso, casta- ño y fresno. Los porcentajes de *Pinus sylvestris* t. no supe- ran el 5% y los pinos mediterráneos aparecen puntual- mente. Algunos signos de antropización del territorio se observan dentro del espectro polínico considerado.

Por otra parte, existen datos arqueológicos que pue- den contribuir a la datación de los mantos arenosos. El úl- timo hallazgo (D. Vega, com. per.) consiste en un enterra- miento datado como Edad del Bronce (3.500 a B.P.) loca- lizado en unas antiguas areneras de Sanchonuño (Sego- via). Está formado por una cavidad subelipsoidea exca- vada a unos 30 cm bajo el nivel actual de la superficie, de la que tan sólo la separa un nivel de suelo edáfico; en su interior se localizó un esqueleto humano en posición fetal. Los enterramientos no han sufrido signos de removiliza- ción por erosión o aterramiento por depósito de arenas, tras su excavación.

Otra evidencia de índole arqueológica la constituyen los pulidos eólicos y las pátinas silíceas de eolización ("barniz del desierto") asociadas a los petroglifos de Do- mingo García, que aparecen bajo y sobre los grabados atri- buidos al Paleolítico Superior Final (Solutrense-Magdale- niense, contemporáneos al periodo de fuertes vientos) y no sobre los postpaleolíticos (Ripoll y Municio, 1999).

4. Discusión de los resultados

4.1. Modelo paleoambiental propuesto

Durante el Pleistoceno superior se detecta con claridad en la submeseta norte la aparición de fases secas-frías y tem- pladas alternantes, reflejo de la sucesión de etapas glacia- res-interglaciares que afectaron a Europa Septentrional y a gran parte de los macizos montañosos de Europa Meridio-

nal. El reflejo en el margen centro-meridional de la cuenca del Duero fueron periodos con intenso periglacialismo estacional y una continentalización del clima mediterráneo imperante.

Sobre los materiales distales de los antiguos abanicos aluviales miocenos se habían depositado extensos mantos de arenas arcósicas plio-cuaternarias correspondientes a los sistemas fluviales de canales con baja sinuosidad, múltiples y erráticos (tipo *braided* de arenas); la distancia al área madre y la naturaleza del material de origen (cuarzarenítico a subarcósico) justifican la extraordinaria selección y madurez de sus arenas. La escasez de vegetación arbórea (50 % cubierto por *Pinus* y *Betula*) durante los periodos secos y fríos del Tardiglacial, como el Dryas reciente o superior, y la persistencia de vientos de componente oeste-suroeste por el influjo de la Sierra de Guadarrama en la circulación atmosférica general, llevaron a la removilización superficial de los mantos arenosos depositados por los ríos en sus amplias llanuras arenosas (*sand-flats*); de esta forma, en los interfluvios se llegaron a desarrollar procesos mixtos eólicos-arroyada, generando cubetas y ombligos de deflacción y acumulaciones barjánicas, que sólo tuvieron entidad reseñable allí donde el nivel freático se encontraba suficientemente profundo como para permitir la movilización de las arenas.

Las principales corrientes alimentadoras, de dirección perpendicular a la de transporte eólico, sirven de límite y freno a éste, de forma que los cauces controlan su desarrollo, como es el caso manifiesto de ambas orillas del río Duratón en Carrascal del Río. Muchos depósitos fluviales nunca fueron retrabajados por la acción eólica, fundamentalmente los más profundos; otros, tras ser reelaborados volvían a retransportarse por corrientes fluviales. He aquí el porqué de la complejidad de la exoscopia de los granos de arena, que parecen haber sufrido repetidos procesos superpuestos.

El área de sedimentación de los sistemas fluviales fue restringiéndose más y más con el tiempo, hasta quedar constreñida al propio sistema de terrazas de los principales cursos, mientras que la acción eólica se hacía más eficaz en los interfluvios y alcanzaba los valles, en los que rellenaba cualquier relieve negativo (torreteras afluentes, cubetas sinclinales, o similares).

El límite superior de la etapa de removilización eólica, al menos de forma significativa, se localiza a inicios del Atlántico con el depósito de mantos arenosos generalizados aunque no muy potentes; esta estabilización podría relacionarse con esta época postglacial templada y húmeda, en la que se ubica el Óptimo Climático Postglacial, periodo en el que la temperatura media llegó a ser dos gra-

dos superior a la actual. La fosilización de las formas eólicas pudo completarse con la llegada del Subatlántico, etapa que se inicia con el llamado período cálido de la era romana (siglos III a.C. a IV d.C.), en la que la vegetación de pinares colonizó y estabilizó las arenas facilitada por las mejores temperaturas y la ausencia de vientos persistentes; incluso se especula con un posible favorecimiento del pino piñonero durante la época romana. Estas interpretaciones coincidirían con las derivadas del análisis en villas romanas situadas en la Tierra de Pinares, como la de Santa Lucía en el municipio de Aguilafuente (Segovia).

4.2. Correlación con depósitos eólicos contemporáneos noreuropeos

Buena parte de Europa noroccidental y central (Polonia, Alemania, Dinamarca, Holanda, Bélgica y Gran Bretaña) está recubierta por extensos depósitos eólicos, fundamentalmente mantos arenosos y loess. Se piensa que las arenas eólicas fueron depositadas durante los cambios climáticos abruptos del Tardiglacial wurmiense; en particular, la actividad eólica se intensificó durante el Dryas reciente (*Younger Dryas*, YD). A lo largo de este estadal, las temperaturas invernales regionales en Europa noroccidental se redujeron unos 20-30° en comparación con las actuales. Como consecuencia se produjo un desarrollo de permafrost, la vuelta a sistemas fluviales entrelazados y el predominio de una vegetación más abierta. El cambio climático abrupto durante el YD se ha considerado como el mecanismo de conducción regional responsable de la mayor parte de los sedimentos eólicos superiores de la lámina arenosa de Europa noroccidental.

Las evidencias actuales muestran que la oscilación climática del YD también afectó a la península Ibérica mediante una reducción de las temperaturas y el aumento de la aridez. Se han analizado las 31 dataciones (TL, OSL o ¹⁴C) publicadas sobre arenas eólicas correspondientes a diversas localidades del interior peninsular, observándose una moda en el periodo 10-13 ka (38%), coincidiendo con el interestadio Tardiglacial y el periodo YD; se observan picos menores a lo largo del Holoceno (Bateman & Díez-Herrero, 2001).

El conjunto de los 132 datos correspondientes a dataciones por luminiscencia sobre cuarzo de arenas eólicas en Europa noroccidental (Holanda, Reino Unido, y Alemania), muestra igualmente una moda entre los 10-13 ka (51%), con un máximo entre 11-12 ka, coincidiendo con el YD; un pico secundario se sitúa ca. 14 ka. Es evidente el alto grado de correlación ($r = 0,86$) entre ambos registros de arenas eólicas. Por tanto, la actividad eólica simultánea en sitios

tan distantes nos da a entender la existencia de agentes desencadenantes que operan a nivel regional (continental) durante la oscilación climática del YD. Sin embargo, ello no significa que los estilos deposicionales fueran idénticos en los dos sectores. Mientras que los vientos muy fuertes y la vegetación escasa son comunes en ambos, el bajo relieve del noroeste europeo permitió el desarrollo de amplias láminas arenosas y dunas bajas, frente al interior peninsular donde el factor limitante fueron los aportes fluviales, que son retrabajados en láminas arenosas restringidas y dunas barjánicas.

5. Conclusiones

El depósito de las coberteras arenosas por sistemas aluviales en la Tierra de Pinares es un proceso dilatado en el tiempo aunque restringido espacialmente, por lo que las facies resultantes pueden considerarse heterócronas, aun presentando similares características litológicas y sedimentológicas. La removilización eólica de la parte superficial de estos materiales se ha producido de forma desigual, continuamente la parte central de los interfluvios desde el Pleistoceno Inferior, y sólo recientemente (Tardiglaciario-Atlántico) y de forma alternante con procesos fluviales en las proximidades de los principales cauces (Voltoya, Eresma, Pirón, Cega y Duratón). La actividad eólica tardiglaciario, asociada a la oscilación climática del Dryas reciente, es correlacionable cronológicamente con la detectada en Europa noroccidental, denotando la existencia de mecanismos climáticos que operaron a escala continental durante este periodo.

Agradecimientos

Quisieramos agradecer su colaboración y amable trato recibido a los directivos, técnicos y personal de planta de INCUSA (Carrascal del Río) y la empresa Luis de Diego y Arcones S.L. (Aguilafuente); en especial a los Sres. Fco. Javier Maeso y Vicente Cerezo. Asimismo, su asesoramiento científico a los doctores Javier de Pedraza, José Francisco Martín y Alfredo Pérez González (Dpto. de Geodinámica, UCM), y Domiciano Vega (arqueólogo municipal de Cuéllar).

Referencias bibliográficas

- Bateman, M.D. and Díez-Herrero, A. (1999a): Thermoluminescence dates and palaeoenvironmental information of the late Quaternary sand deposits, Tierra de Pinares, Central Spain. *Catena*, 34: 277-291.
- Bateman, M.D. and Díez-Herrero, A. (1999b): Late Quaternary aeolian sand deposition in Central Spain and their relationship with the coversands of NW Europe (poster). *9th International Conference on Luminescence and Electron Spin Resonance Dating (LED99)*. Roma 6-10 septiembre 1999.
- Bateman, M.D. and Díez-Herrero, A. (2001): The timing of aeolian sand deposition in Central Spain and its relationship with the aeolian sand record of NW Europe. *Quat. Sci. Rev.* (in press).
- Díez, A. y Bateman, M.D. (1998): Interpretación paleoambiental y datación mediante luminiscencia del manto arenoso de la Tierra de Pinares oriental (Segovia). *Geogaceta*, 24: 107-110.
- Goeury, C.L. and de Beaulieu, J.L. (1979): A propos de la concentration du pollen a l'aide de la liqueur de Thoulet dans les sédiments minéraux. *Pollen et Spores*, 23: 239-251.
- Moore, P., Webb, J.S. and Collinson, M.E. (1991): *Pollen analysis*. 2nd. edition. Blackwell Scientific Publications, London.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. y Siever, R. (1972): *Sand and sandstone*. Springer-Verlag, New York, 618 págs.
- Prado, C. de (1854): Note sur la constitution géologique de la province de Segovia. *Bull. Soc. Geol. Fra.*, 11: 330-338.
- Reille, M. (1992): *Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du Nord*. Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie, Marseille.
- Reille, M. (1995): *Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du Nord. Supplement 1*. Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie, Marseille.
- Ripoll, S. y Municio, L.C. (dirs., 1999): Domingo García. Arte Rupestre Paleolítico al aire libre en la meseta castellana. *Arqueología en Castilla y León*, 8 (memorias). Junta de Castilla y León y U.N.E.D., Salamanca, 278 págs.
- Torcal, L., Zazo, C. y Marfil, R. (1984): Estudio al M.E.B. de las texturas superficiales de los granos de cuarzo y su aplicación a la interpretación de medios actuales y subactuales. *Estudios Geológicos*, 40: 315-339.