

TASAS DE DEPOSICION DE POLVO ATMOSFERICO EN UN AREA SEMIARIDA DEL ENTORNO MEDITERRANEO OCCIDENTAL

J. L. Díaz Hernández *, J. M. Miranda Hernández *

RESUMEN

La Depresión de Granada (SE de la Península Ibérica) presenta, en áreas no urbanas y no industriales, una tasa anual de deposición de polvo atmosférico de $23,06 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, obtenida a partir de observaciones semanales durante el año 1992. Este dato es el resultado de una metodología propia, que complementa los métodos de trabajo seguidos por otros investigadores. Dada la ubicación de la estación, este valor es representativo del fondo regional de partículas sólidas en suspensión. La distribución temporal de las tasas presenta importantes fluctuaciones, relacionadas con la dirección predominante del viento, que también parece tener influencia sobre los componentes del polvo.

Estos datos se integran en el conocimiento de los procesos edafogénicos de los suelos mediterráneos.

Palabras clave: *Acumulación de polvo, Polvo sahariano, Transporte eólico, Tasas de deposición de polvo, Suelos mediterráneos, Dinámica de carbonatos en suelos.*

ABSTRACT

We evaluated the deposition rate of atmospheric dust in a non urban area of the Granada Depression (SE of Iberian Peninsula). By using in part existing methodology, we determined a rate of $23.06 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ on the basis of weekly observations, that showed marked variations, partially controlled by Saharan winds. The components of the dust can indicate source area. Thus, southerly winds provide considerable allochthonous components from North Africa, while others are local. Despite the scarcity of industrial activity, signs of contamination were recorded. The employed methodology complements the work methods used by other researchs.

The role of airborne sediments provides an illustration in soil genesis of the Mediterranean region.

Key words: *Dust accretion, Saharian dust, Aeolian transport, Dust deposition rates, Mediterranean soils, Soil carbonate dynamics.*

Introducción

La evaluación cuantitativa de tasas de polvo atmosférico encuentra en las conclusiones de Udden (1896) y de Free (1911) [in Simonson, 1995] las referencias históricas más antiguas. Ambos reconocían que este fenómeno era un importante proceso en la génesis de los suelos estadounidenses.

La recogida sistemática de polvo atmosférico sólo se ha realizado en las últimas décadas, particularmente tras el impulso recibido por diversos trabajos, efectuados en regiones semiáridas y áridas de EE.UU., relacionadas con fenómenos climáticos y

con el conocimiento de flujos de carbonatos en suelos (Gile *et al.*, 1966; Smith *et al.*, 1970; Schlesinger, 1982, 1985, etc.). Estos seguimientos se han generalizado a otros lugares. Uno de ellos, de especial interés por su extensión e influencia, es el Sahara.

Los estudios realizados hasta ahora consideran al Sahara como fuente primaria de sedimentos transportados hacia el entorno a través de la atmósfera. El transporte de polvo sahariano ha sido detectado en diversos puntos del continente americano, especialmente en las islas del Caribe, tras pasar por las Islas Canarias y las Islas de Cabo Verde (Prospero

* Junta de Andalucía. Centro de Investigaciones Agrarias. 18080 Granada.

Tabla 1.—Tasas de deposición de polvo atmosférico en diversas áreas geográficas.

Autor	Años muestreados	Localidad	Tasas (g·m ⁻² ·a ⁻¹)	
			Media	Intervalo
<i>Area circunmediterránea</i>				
Bücher <i>et al.</i> (1975)		Pirineos franceses		25-32
Loÿe-Pilot <i>et al.</i> (1986)	1984	Córcega	14	
Pye (1992)	1988-1990	Creta		10-100
Mattsson <i>et al.</i> (1996)	1988-1994	Creta	19	10-33
Yaalon <i>et al.</i> (1974)		Israel		28-112
Ganor <i>et al.</i> (1982)		Israel		20-40
<i>Area africana</i>				
Pye (1987)		N Nigeria		138-180
Pye (1987)		Chad	108	
Drees <i>et al.</i> (1993)	1985-1989	SW Níger	190	
<i>Otras áreas</i>				
Windom (1969)		N Groenlandia	0,21	
Tiller <i>et al.</i> (1984)		Adelaida (Australia)		5-10
Free (1911)		Rocky Mts-Mississippi R. (USA)	300	
Soil Conservation Service (1962)		Maryland (USA)	36	
Smith <i>et al.</i> (1965)	1963-1964	Kansas (USA)	70	34-167
Smith <i>et al.</i> (1970)	1965-1970	Kansas (USA)	60	22-167
Smith <i>et al.</i> (1970)		New Jersey (USA)	34	
Smith <i>et al.</i> (1970)		Colorado (USA)	77	
Gile <i>et al.</i> (1979)	1962-1965	New Mexico (USA)	23	10-60
Muhs (1983)		Los Angeles (USA)		28-31
Rabenhorst <i>et al.</i> (1984)		Texas (USA)	12	

et al., 1970). En el ámbito europeo también hay referencias de transporte de polvo sahariano, en puntos tan alejados como Rusia, Alemania o las Islas Británicas. Diversos autores reconocen que la magnitud de este depósito debe influir en la evolución de muchos suelos.

En el propio continente africano se aprecia la proximidad del área fuente en los cuatro puntos cardinales, si bien hay pocos estudios al respecto. En el S y N de Nigeria, país que tiene cierto nivel de seguimiento del fenómeno, el principal aporte está ligado periódicamente a la estación harmattiense (cálida y seca), más que a tormentas aisladas. Jaenicke *et al.* (1978) valoraron en 260×10^6 Tm las cantidades anuales transportadas desde el Sahara hacia las Islas de Cabo Verde. La importancia de esta cifra se manifiesta al compararla con el intervalo entre 100 y 500×10^6 Tm que Prospero (1982) estimó para el polvo transportado por la atmósfera a nivel global, aunque las cifras de Prospero posiblemente están infravaloradas (Simonson, 1995).

La parte septentrional del Sahara coincide en buena medida con la región mediterránea. Sin embargo, dada la proximidad y la relación climática con el ámbito sahariano, los aportes eólicos no reciben la atención que merecen y no son bien conocidos. La región iberonorteafricana (Mediterráneo

occidental), que representa una extensión importante, no dispone hasta el presente de datos fidedignos con los que evaluar un fenómeno tan directo, salvo eventuales descripciones de algo curioso y ocasional. Por el contrario, existen diversos seguimientos en el Mediterráneo oriental, particularmente en Israel.

Según Simonson (1995) un buen ejemplo del papel que los sedimentos transportados por el aire juegan en la génesis de suelos es el caso de los «suelos rojos mediterráneos», o «terras rossas», o sus equivalentes taxonómicos actuales, netamente ligados al entorno mediterráneo. Este caso ilustra además, la resistencia al cambio de ideas una vez que han sido ampliamente aceptadas. La importancia de los aportes eólicos se justifica a partir de las evidencias extraídas de Grecia, Italia e Israel y en el tremendo espesor de sedimentos que sería necesario meteorizar para proporcionar los regolitos que actualmente soportan. Yaalon (1997) tras analizar las circunstancias climáticas, litológicas, aportes eólicos y efectos antrópicos que concurren en la región, considera muy razonables aportes eólicos de hasta el 50 % en suelos cuya roca original sean calizas compactas, en el supuesto de residuos insolubles medios del 1 %. También indica que estas condiciones de formación actúan tanto en el ámbito

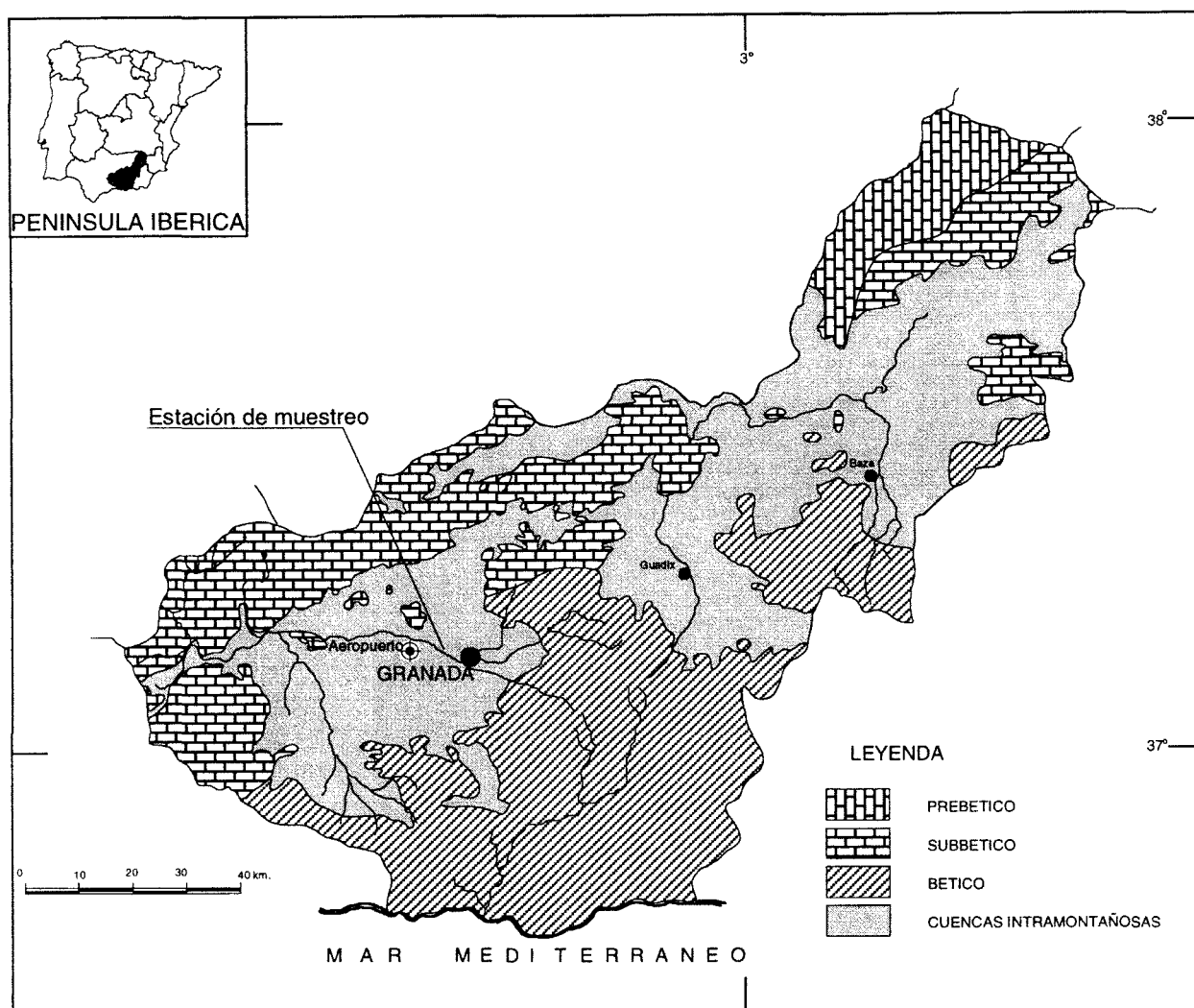


Fig. 1.—Emplazamiento de la estación de muestreo.

mediterráneo como en otras regiones: sólo determinados factores ambientales intensifican aquellos procesos que hacen de la región algo específico.

Con objeto de conocer los márgenes de variación de las tasas de deposición de polvo atmosférico, se muestran en la tabla 1 los resultados de algunos estudios en diversas áreas geográficas de varios continentes. En ella se aprecia el elevado número de datos disponibles en los EE.UU., con un amplio rango de valores, si bien el valor de $300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ parece algo elevado comparado con valores posteriores obtenidos en áreas próximas. Los datos del continente africano, aunque escasos, son particularmente altos, todos superiores a $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. En el ámbito circunmediterráneo las oscilaciones son amplias, entre 10 y $112 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. Ocasionalmente hay estudios similares en otros continentes.

En resumen, el transporte de polvo atmosférico es un fenómeno de carácter global, variable de unos puntos a otros, dependiendo del clima del punto receptor y de la distancia al área fuente. Desde el punto de vista edafogenético, estas adiciones de polvo pueden ser dominantes en la diferenciación de horizontes, importantes pero no dominantes, tener efectos en la individuación de horizontes, influir en la textura de horizontes superficiales o adicionar elementos nutrientes.

Antecedentes

El estudio de las partículas sólidas en suspensión en España se ha asociado con el seguimiento de la contaminación atmosférica y ha permanecido ajeno a finalidades sedimentológicas. Así, en el marco del programa CORINAIR, diversos organis-

mos oficiales (MOPU, 1990) han realizado en áreas urbanas o industriales, el seguimiento de diferentes tipos de contaminantes atmosféricos, fundamentalmente sustancias gaseosas y partículas sólidas en suspensión contenidas en un volumen de aire. Al tratarse de áreas urbanas o industriales, la ubicación de las estaciones ha coincidido con las áreas de emisión de contaminantes, de forma que los valores obtenidos no permiten ni pretenden conocer el fondo regional de partículas sólidas en suspensión.

Dos redes internacionales tienen por objeto medir este fondo regional en condiciones menos alteradas: la red EMEP (European Monitoring Evaluation Programme) y la red BAPMON (Background Air Pollution Monitoring Network). En nuestro país las estaciones de San Pablo de los Montes (Toledo), La Cartuja (Granada), Roquetas (Tarragona) y Logroño (La Rioja) están integradas en la primera. La estación de Izaña (Tenerife) pertenece a la segunda red. Estas estaciones, como las distribuidas en ámbitos urbanos, realizan mediciones de diversos parámetros atmosféricos, entre los que están la masa total de partículas, siempre referida a un volumen de aire.

Entre las partículas sólidas en suspensión (polvo atmosférico) se deben distinguir aquellas sustancias que distorsionan la evolución natural del medio (contaminantes industriales, emitidos de modo especial a partir de 1850), de las que constituyen un elemento más del medio (componentes naturales).

La evaluación del contenido en polvo atmosférico en la baja troposfera, se puede realizar fundamentalmente por dos métodos: instalaciones de aspiración y sistemas de sedimentación. Las primeras dan contenidos en un volumen de aire en condiciones alteradas del medio; las segundas dan tasas de deposición que manifiestan una estrecha vinculación con la dinámica natural del ambiente. Este último procedimiento es el usado en sedimentología por autores como Rabenhorst *et al.* (1984), Pye (1992) y Drees *et al.* (1993) entre otros, y es el seguido en este trabajo.

El objeto de este estudio es conocer los valores del fondo regional de partículas sólidas en suspensión (polvo atmosférico), determinar la proporción relativa del contaminante industrial y del componente natural en este fondo, y discriminar su procedencia en la medida de lo posible. Para ello se realizó, durante el año 1992, un seguimiento sistemático de la tasa de deposición de polvo atmosférico en la Depresión de Granada.

Material y métodos

El punto de muestreo se encuentra en la Depresión de Granada, en las coordenadas geográficas 37°10'N-3°31'W, a 640 m.s.n.m. Los relieves béticos son de naturaleza heterogénea (calizos-dolomíticos y silíceos), y los subbéticos son carbonatados (fig. 1). La disposición de estos relieves en torno a la Depresión condiciona el régimen de vientos. El Observatorio de La Cartuja (Granada capital) registra 459,7 mm de precipitación media anual secular y una temperatura media anual de 15,3° C. Desde 1980 hasta 1992 inclusive, la precipitación anual ha sido inferior a la media secular.

El área es predominantemente agrícola, con regadíos en las proximidades de la estación de seguimiento y olivar de secano y aprovechamientos forestales en áreas más distantes. El grado de industrialización de la zona es bajo, con actividades ligadas principalmente al sector agroalimentario.

Existen diferentes sistemas de recolección de polvo por sedimentación: colectores de vía seca (de bolas, de superficie seca) y de vía húmeda (colector de agua, colector de humectación), entre otros. Goossens *et al.* (1994) evalúan comparativamente la eficiencia de estos sistemas y establecen que la diferencia entre el más y el menos eficiente en deposición es del orden del 10 %. Los colectores de polvo utilizados en este trabajo fueron del tipo de vía seca. Consistieron en dos tipos de bandejas rectangulares de plástico, de 0,1898 y 0,1380 m² respectivamente y 10 cm de profundidad cada una.

De los diferentes mecanismos de transporte eólico [rodadura,

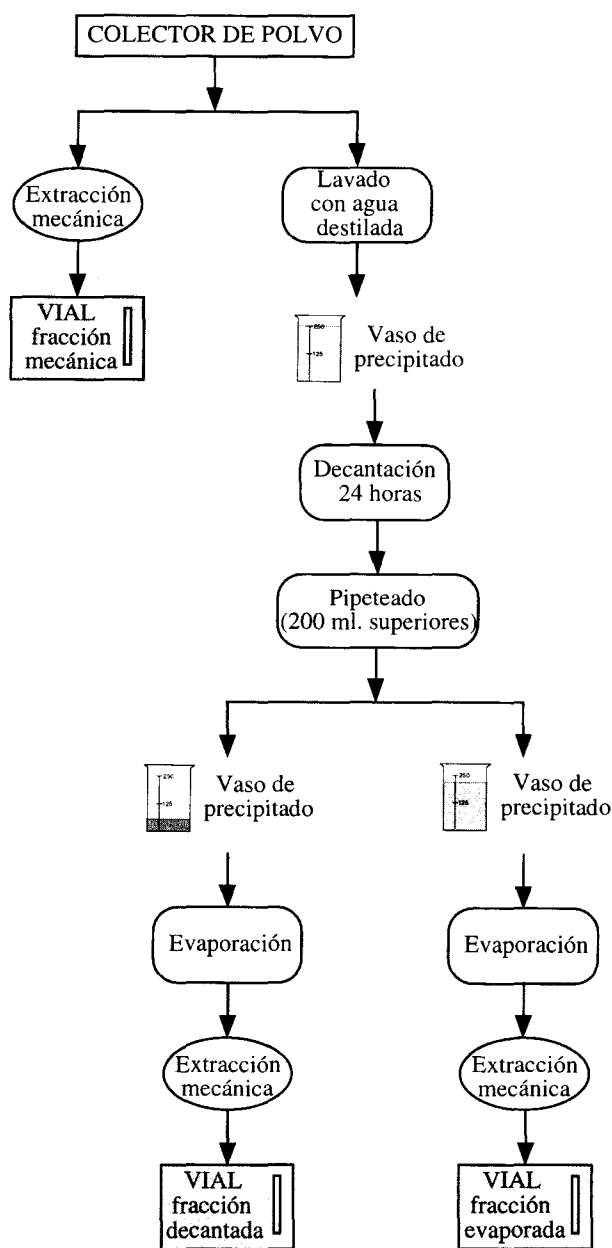


Fig. 2.—Proceso de recuperación del polvo.

reptación, saltación y suspensión (Tsoar *et al.*, 1987; Mainguet, 1992)], sólo el último da lugar a material suspendido en la atmósfera, al ser la saltación un proceso intermedio hacia la suspensión. Por tanto hay que evitar la contribución de las partículas del suelo inmediato, por mecanismos en especial de rodadura y de reptación, al valor de la tasa de deposición. Con esta finalidad, las bandejas se colocaron en el centro de una terraza situada a 8 m sobre la superficie del terreno, ajena a la influencia que otros edificios pudieran ejercer en las condiciones del viento, y provista de un murete perimetral de 1 m de altura (Offer *et al.*, 1994; Frank *et al.*, 1994). Al disponer el suelo de la terraza de una base rugosa de grava de 20-35 mm de diámetro se evitó la reincorporación, por mecanismos de rodadura y reptación, de partículas depositadas en la terraza (Goossens, 1994).

Las bandejas se retiraron con periodicidad semanal, excepto por circunstancias imprevistas de vuelco o precipitación, rigurosamente controladas.

Con objeto de determinar con precisión la cantidad de polvo depositada, en primer lugar se recogió el polvo de la bandeja con pincel y se almacenó en viales (Drees *et al.*, 1993). Posteriormente, se lavó la bandeja con 250 cm³ de agua destilada y se dejó decantar. Después de veinticuatro horas se pipetearon cuidadosamente los 200 cm³ superiores y se llevaron a evaporación ambas muestras. Tras extraer cada residuo con pincel se almacenaron separadamente. En la figura 2 se esquematiza todo el proceso seguido.

Después de anotar fecha y hora de colocación y retirada de la bandeja, cada vial se pesó con precisión de 0,1 mg. El peso total de las fracciones mecánica, decantada y evaporada proporcionan el valor de la tasa para el correspondiente período de muestreo. La ausencia de datos por circunstancias imprevistas, se completó con la tasa media obtenida a partir de los datos anteriores y posteriores más próximos.

En este tipo de investigaciones es frecuente emplear períodos de muestreo largos e inevitablemente irregulares. Por ejemplo, Pye (1992) realizó prospecciones con períodos que oscilan entre quince días y seis meses, Drees *et al.* (1993) hacen muestreos sistemáticos cada tres meses, Buat-Ménard *et al.* (1989) muestrean según períodos entre una y dos semanas distribuidos irregularmente, etc. En nuestro caso, al efectuar los muestreos sobre una base semanal, la tasa media se expresó en mg·m⁻²·d⁻¹ para cada semana. Posteriormente las muestras se examinaron con lupa binocular a diferentes aumentos. La escasez de muestra obtenida (ver tabla 2) limitó de modo importante las posibilidades de efectuar análisis posteriores.

Al influir directamente las condiciones aerodinámicas en el fenómeno de deposición de polvo, resultó necesario conocer los parámetros climáticos del área donde se ubica la estación. Para ello se aceptaron los datos del Instituto Nacional de Meteorología para el aeropuerto de Granada dada su proximidad a la estación de muestreo (ver fig. 1). Las variables utilizadas fueron: temperatura (medida a 1,5 m del suelo), velocidad y dirección del viento (medida a 5 m del suelo) y precipitación, que se agruparon en los mismos períodos semanales que las tasas. Los datos de viento mostraron un elevado porcentaje anual de horas de calma (alrededor del 63 %), y por ello se procedió a evaluar la magnitud real de la acción del viento mediante el índice semanal \bar{v}_s (velocidad media semanal del viento en m·s⁻¹)

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^{i=7} R_i}{\sum_{j=1}^{j=7} h_j}$$

donde, para cada semana, R_i es la distancia recorrida por el viento (en metros) el día i , y h_j es el tiempo efectivo de viento (en segundos) el día j .

Resultados

Para comparar las direcciones predominantes de viento (en frecuencia e intensidad) con las direcciones más «polvoriantes», se realizaron los diagramas de la figura 3 basados en los métodos de Lee *et al.* (1994). Los cálculos se efectuaron con base semanal, para lo cual fue necesario asignar una dirección de viento predominante a cada semana del año. Con los datos disponibles, el criterio seguido consistió en identificar la dirección de la racha máxima diaria

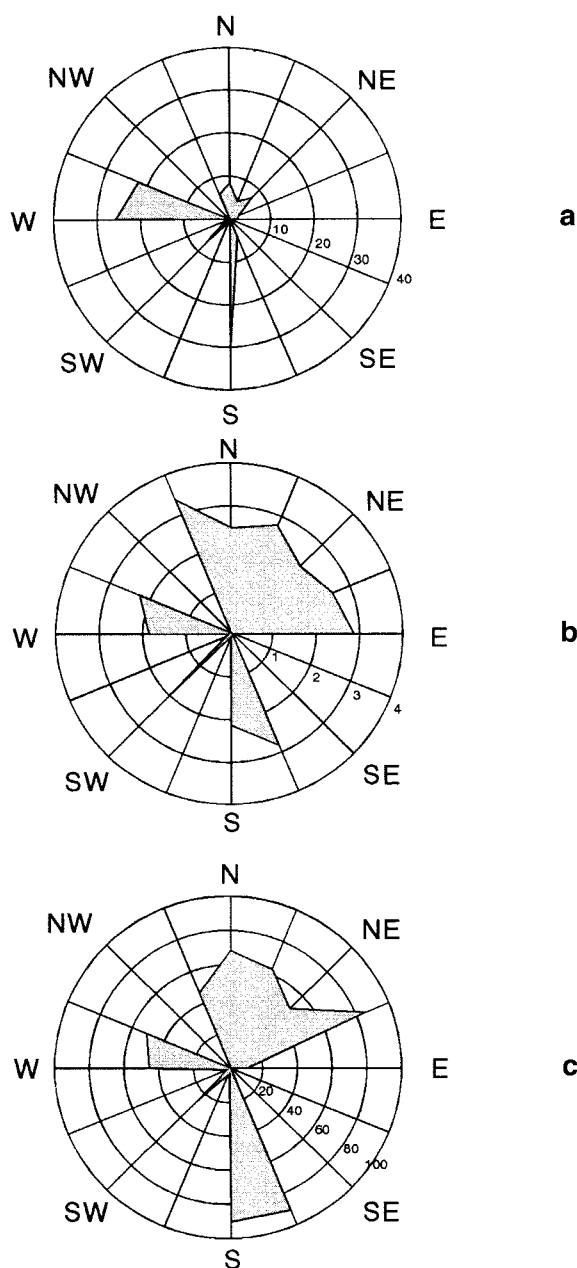


Fig. 3.—Relación entre parámetros de viento y tasas de polvo: a) Direcciones y frecuencia anual del viento (%). b) Direcciones y velocidad media anual del viento (m·s⁻¹). c) Direcciones asociadas a la tasa media de deposición de polvo, computada para todo el año (mg·m⁻²·d⁻¹).

más frecuente a lo largo de los siete días.

La figura 3a muestra direcciones y frecuencias anuales de viento en porcentaje; se obtuvo agrupando las semanas de acuerdo con el viento predominante y calculando su peso relativo en relación al número de semanas anuales.

La figura 3b señala direcciones y velocidad

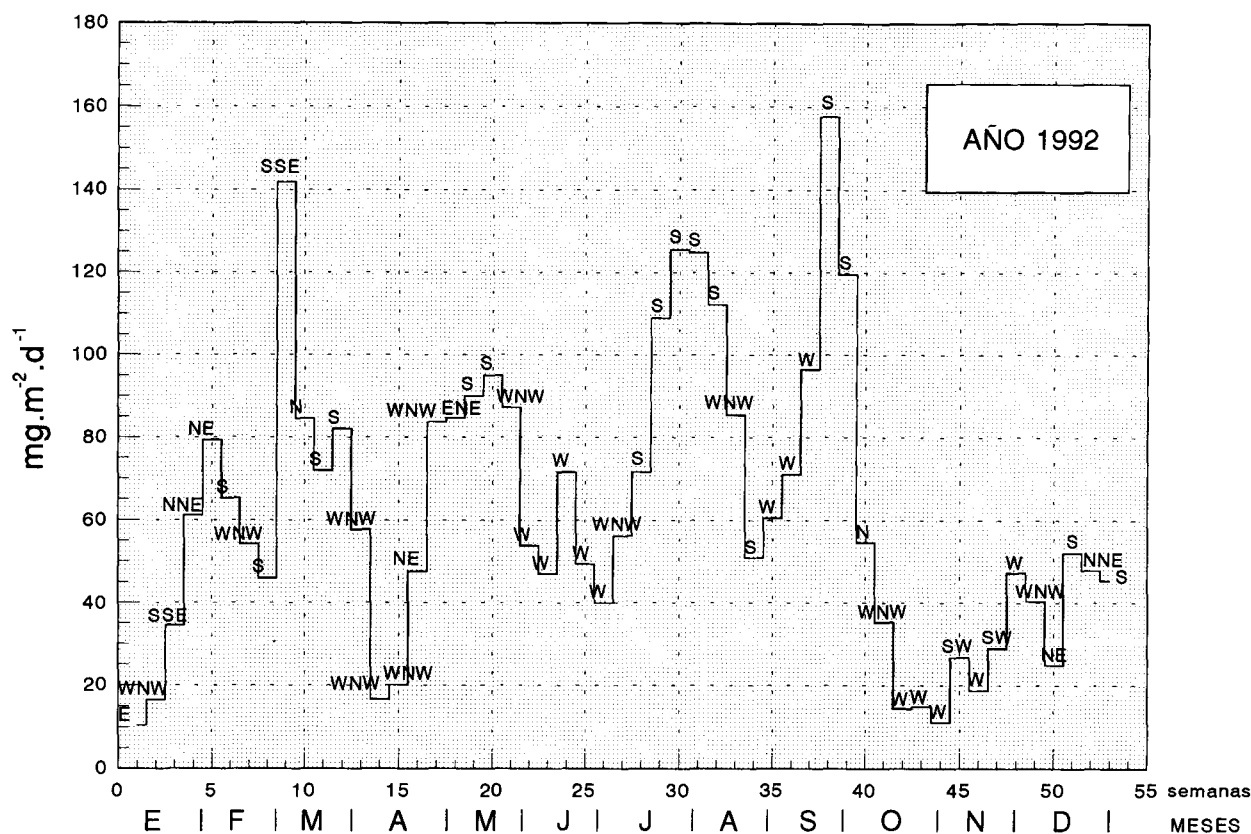


Fig. 4.—Tasas de deposición de polvo atmosférico en base a observaciones semanales durante el año 1992.

media anual de viento expresada en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; representa la velocidad media de grupos de semanas con la misma dirección de viento predominante.

La figura 3c indica las direcciones de viento asociadas a la tasa media de deposición de polvo para el año completo en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; este concepto constituye la tasa de deposición media de grupos de semanas que tienen la misma dirección de viento predominante.

El registro resultante de las tasas, distribuido a lo largo del año, se puede observar en la figura 4, así como sus direcciones asociadas.

La tabla 2 detalla los días que componen cada uno de los 52 períodos muestrales, así como el cómputo total en horas. Además expresa, en miligramos, las cantidades totales (fracción mecánica + fracción decantada + fracción evaporada) de deposición de polvo atmosférico obtenido. El color en seco de cada muestra está expresado con el Hue de la notación Munsell (USDA, 1994).

El examen con lupa binocular permitió distinguir entre componentes mayoritarios y minoritarios, según una estimación de sus cantidades relativas. Los componentes mayoritarios encontrados fueron: minerales (cuarzo, micas y carbonatos) y esférulas

ricas en carbono (ERC). Se distinguieron los siguientes aportes minoritarios: restos carbonosos no vegetales (RCNV), filamentos y restos vegetales (RV), entre los que se distinguen los restos vegetales quemados (RVQ) y los no quemados (RVNQ).

Las denominadas ERC consisten en esférulas negras, birrefringentes, huecas y porosas, resistentes al ataque en caliente con agua oxigenada, aunque en muchos casos se obtenía una fina fragmentación. Consideramos, junto con Del Monte *et al.* (in Pye, 1992), que se trata de restos de combustibles derivados del petróleo, quemados de forma incompleta. Los restos vegetales quemados (RVQ) se caracterizan por su color negro y por conservar una estructura vegetal brillante. Los restos carbonosos no vegetales (RCNV) se distinguen de los dos anteriores por tener formas angulosas, carecer de brillo, no presentar formas esféricas ni conservar estructura vegetal; presentan color negro y baja densidad.

Los filamentos y los restos vegetales no quemados (RVNQ) son materiales de origen biológico procedentes del entorno.

En la tabla 3 se muestran los valores mensuales de las tasas de deposición de polvo atmosférico en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$.

Tabla 2.—Intervalo de recogida de muestras durante 1992 y peso total obtenido.

Período muestral	N.º horas	Peso (mg)	Color seco	Componentes mayoritarios								Componentes minoritarios		
				Minerales				ERC				RV		
				Q	M	K	%	Tamaños (um)			RCNV	Filamentos	RVQ	RVNQ
								máx.	moda	mín.				
911227 920109	314,00	18,8	2,5Y 3,5/2	X	X		a	190	60	40	X	q	X	
920113 920123	243,00	67,7	2,5Y 3/2	X	X	X	a	120	60	40	X	p	X	
920123 920128	120,00	60,9	10YR 3,5/1	X	X	X	b	140	80	40	X	r	X	
920128 920129	20,50	17,8	10YR 4/2	X	X	X	b	160	80	40	X	s		
920129 920207	213,00	85,5	2,5Y 4/1	X	X	X	a	170	80	40	X	p	X	
920207 920214	170,67	77,2	2,5Y 3,5/2	X	X	X	b	160	80	20	X	r	X	
920214 920219	115,08	32,0	10YR 3/2	X	X	X	a	180	80	30	X	q	X	
920219 920220	24,25	15,4	2,5Y 3/2	X	X	X	a	180	80	30		s		X
920220 920224	90,00	23,7	2,5Y 4/2	X	X	X	a	160	80	20	X	p	X	
920224 920225	24,00	14,4	10YR 2/1	X	X		a	160	100	30	X	s	X	X
920227 920302	97,15	128,4	10YR 6/3,5		X		d	120	80	30		s		
920302 920310	186,00	113,4	10YR 5/3		X		c	180	80	20	X	r		
920310 920316	149,68	60,8	2,5Y 6/2	X	X	X	c	160	80	20		r		
920316 920323	168,16	110,5	2,5Y 6,5/3	X	X	X	c	170	60	30		t	X	
920323 920325	42,16	18,1	2,5Y 5/2,5	X	X	X	c	160	80	20	X	p	X	
920325 920331	140,50	52,6	2,5Y 5/2	X	X	X	b	200	80	30		q		
920401 920403	52,25	1,6	2,5Y 3/2	X	X	X	c	140	80	40	X	s		
920403 920406	67,25	2,5	7,5YR 2,5/1	X	X	X	a	120	80	30		p	X	
920407 920409	43,50	4,1	7,5YR 2,5/1	X	X	X	b	180	100	20	X	s	X	X
920409 920415	140,00	29,9	2,5Y 5/3	X	X	X	c	140	60	20	X	p	X	X
920415 920422	169,25	57,7	10YR 4,5/2	X	X	X	c	140	80	20		s		
920422 920424	42,25	42,7	2,5Y 5/3	X	X	X	b	140	80	20		p	X	
920424 920429	120,09	52,4	2,5Y 5/2	X	X	X	b	140	100	40		p		
920515 920520	120,25	71,9	10YR 5/2	X	X	X	c	150	70	30	X	r		
920525 920601	174,00	72,2	2,5Y 6/3	X	X	X	c	160	80	30		r		
920601 920609	187,00	50,2	2,5Y 6/3	X	X	X	b	160	80	20	X	p	X	X
920609 920615	144,50	88,8	10YR 6/3	X	X	X	b	180	80	20	X	q	X	
920619 920622	71,33	14,0	2,5Y 5/3	X	X	X	a	190	80	20		p		
920624 920630	142,50	46,7	2,5Y 6/3	X	X	X	b	180	80	20	X	p		X
920708 920715	167,93	104,1	10YR 5/3	X	X	X	b	170	80	20	X	p	X	X
920715 920722	169,15	123,0	10YR 5/3	X	X	X	d	140	80	30	X	s		X
920722 920805	335,00	330,6	10YR 5,5/3	X	X	X	d	120	80	20		t	X	X
920805 920814	214,00	177,4	10YR 6/3	X	X	X	b	160	90	30	X	r		
920814 920824	242,00	97,3	10YR 6/3	X	X	X	d	140	70	20	X	t	X	
920831 920907	167,75	95,4	2,5Y 5/3	X	X	X	b	160	80	40		q	X	
920907 920914	168,25	131,3	10YR 6/3	X	X	X	b	160	90	30	X	s	X	X
920914 920921	164,75	154,3	10YR 6/4		X		d	140	80	30		s		
920921 920926	119,50	122,0	10YR 6/3		X		d	140	90	40		s		
920927 921004	176,50	76,6	2,5Y 5/3	X	X	X	c	160	90	20	X	s		
921004 921009	113,50	42,7	2,5Y 4/2	X	X	X	a	140	100	20	X	p	X	
921009 921016	167,00	18,1	2,5Y 4/2	X	X	X	a	150	90	40	X	p	X	X
921020 921023	72,00	10,0	10YR 3/1	X	X	X	a	240	120	30	X	p	X	X
921023 921102	234,00	20,5	2,5Y 4/1	X	X	X	b	150	80	20	X	p	X	X
921102 921109	167,25	26,4	2,5Y 3,5/2	X	X	X	a	140	80	30	X	p		X
921109 921110	24,00	1,9	2,5Y 3/1	X	X	X	a	180	100	20		s	X	X
921116 921123	167,92	39,0	10YR 2/2	X	X	X	a	160	100	30	X	q	X	
921123 921130	168,00	64,0	2,5Y 3/1	X	X	X	a	220	100	40		r	X	X
921130 921207	172,00	54,3	10YR 2/1	X	X	X	a	380	100	40		r	X	X
921207 921215	190,83	35,6	10YR 2/1	X	X	X	a	220	120	40		p	X	X
921215 921216	24,50	3,9	10YR 2/1	X	X		b	100	80	40		s		
921216 921221	125,60	49,6	10YR 3/1	X	X	X	a	740	120	20		r	X	
921221 921231	236,15	84,8	10YR 3/1	X	X	X	a	720	110	20	X	s	X	
Polvo Sahara: 940603 940603		77,2	10YR 6/4		X		d	100	80	40		s		

Las características indicadas se refieren a la fracción de polvo obtenida por vía mecánica. El código de colores empleado es el de las tablas Munsell. Los vacíos indican no observación a 50 aumentos. X indica observación a 50 aumentos.

Abreviaturas:

Minerales: Q = cuarzo; M = micas; K = carbonatos.
 ERC = Esférulas ricas en carbono.
 RV = Restos vegetales.
 RVQ = Restos vegetales quemados.
 RVNQ = Restos vegetales no quemados.
 RCNV = Restos carbonosos no vegetales.

Cantidades relativas:

Esférulas:
 a >25 %
 b 15-25 %
 c 5-15 %
 d <5 %

Filamentos:

p >10 %
 q 5-10 %
 r 3-5 %
 s 1-3 %
 t <1 %

Tabla 3.—Valores mensuales de deposición de polvo en la Depresión de Granada durante 1992.

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tasas (g/m ²)	1,24	2,18	2,26	1,49	2,55	1,58	3,06	2,49	3,22	0,75	0,92	1,32

Discusión

El seguimiento realizado en este trabajo está enfocado a la obtención de una magnitud que dimensionalmente se expresa como unidad de masa dividida por unidad de superficie. El empleo de estas magnitudes es frecuente en el ámbito de la sedimentología, pero inusual como índice de contaminación, ya que éste se obtiene mediante métodos de medida volumétricos.

Goossens *et al.* (1994) hacen distinción entre las medidas de deposición y las medidas de acumulación en el estudio de la sedimentación de polvo atmosférico: deposición es la cantidad total de partículas que se asientan en una superficie de modo continuo; acumulación es la cantidad de partículas que permanecen en la superficie después de un período de tiempo. La diferencia entre ambas estriba en la reincorporación de partículas a la atmósfera.

En rigor, todos los métodos y medidas realizados hasta el presente en condiciones naturales, dan lugar a tasas de acumulación. Sin embargo, el empleo de períodos de muestreo relativamente cortos (una semana) permite asimilar las tasas de deposición a las de acumulación. Por ello, el método empleado en nuestro caso en la recolección de partículas permite usar el término tasas de deposición. Períodos de muestreo inferiores a una semana son difícilmente viables por las condiciones de trabajo requeridas, además del error inherente que provoca la escasa cantidad de muestra recogida; por otro lado, períodos superiores al semanal generan tasas más cercanas a la acumulación que a la deposición.

Otra ventaja adicional de la semana como período de muestreo es que permite discriminar entre pulsos y flujos al determinar la tasa de deposición, como se puede deducir comparando la figura 4 y los valores contenidos en la tabla 3.

Dado que los colectores usados recogen todo el espectro de tamaños de partículas, la recuperación del polvo sedimentado requiere el cuidadoso proceso indicado en la metodología. Por término medio, la fracción obtenida por vía mecánica representa el 58 % del polvo total recolectado, mientras que las fracciones obtenidas por decantación y evaporación representan el 32 % y el 10 % respectivamente. Existen altos coeficientes de correlación entre estas tres fracciones. Las metodologías disponibles en la bibliografía (Drees *et al.*, 1993; Pye, 1992, entre

otras) no mencionan las fases de decantación y de evaporación en el proceso de recuperación del polvo. Los porcentajes expuestos para cada fracción indican que la omisión de los procesos de decantación y evaporación puede originar errores importantes.

La observación microscópica puso de manifiesto la ausencia de contaminantes en las fracciones decantada y evaporada, y por el contrario la presencia de contaminantes en la fracción obtenida por vía mecánica. De esta forma hemos constatado la existencia de contaminantes en el fondo regional de partículas en suspensión, y estimamos su importancia en un 5 % en peso, a raíz de los datos expuestos en la tabla 2 y de los porcentajes de cada fracción.

La tasa total de polvo depositado fue, durante el año 1992, de 23,06 g·m⁻²·año⁻¹. Este valor se refiere a la deposición registrada a lo largo de todo el año, incluyendo la deposición producida a través del agua de lluvia (deposición seca + deposición húmeda según algunos autores). Aunque los datos disponibles son escasos, esta evaluación entra en el rango de tasas obtenidas por otros investigadores en el área mediterránea (Loÿe-Pilot *et al.*, 1986; Pye, 1992; Bücher, 1994, etc.) (ver tabla 1).

En la figura 4 se aprecia que la distribución de esta tasa a lo largo del año no es uniforme, sino que presenta marcadas oscilaciones: las tasas más altas corresponden en general a semanas en las que los vientos predominantes son de componente S o SSE.

El polvo recogido en el período de muestreo correspondiente a las semanas 9, 30-31 y 38-39 presenta un Hue de tipo YR (ver tabla 2) similar al del polvo depositado durante un episodio de lluvia de barro en junio de 1994. Este fenómeno, conocido en toda la cuenca mediterránea (Loÿe-Pilot *et al.*, 1986; Bücher, 1994), está causado por transporte eólico de polvo del Sahara en condiciones meteorológicas de bajas presiones relativas sobre el N de Africa. Este hecho coincide con las direcciones de vientos S o SSE predominantes durante estas semanas (ver fig. 4), y con los mapas de isobaras de superficie.

Se realizaron análisis de regresión con objeto de relacionar las tasas de deposición con diversas variables meteorológicas a nivel del suelo. De igual forma que Loÿe-Pilot *et al.* (1986) y Goossens (1988), se ha constatado en nuestro caso que la lluvia provoca un aumento inmediato de la tasa de deposición. Sin embargo, al considerar períodos

Tabla 4.—Coeficientes de correlación entre tasas y temperaturas según direcciones*.

r	Según todas las direcciones	S	W	WNW
T _{med}	0,56	0,70	0,75	0,72
T _{max}	0,60	0,70	0,80	0,80

* No hay suficientes datos para agrupar en otras direcciones.

semanales, las tasas medias no reflejan estos incrementos; es decir, las precipitaciones pueden producir un aumento instantáneo de la deposición de polvo (deposición húmeda), pero no distorsionan el valor medio de la tasa. Por tanto, las lluvias de barro se originan al producirse una precipitación durante un período de altas tasas de deposición de polvo sahariano.

No se encontraron buenas correlaciones entre las tasas de deposición y la velocidad media semanal del viento. Por el contrario la tabla 4 muestra correlaciones lineales aceptables entre las tasas de deposición y las temperaturas medias semanales (T_{med}). Dicha tabla evidencia también las mejoras obtenidas en el coeficiente de correlación al considerar la temperatura máxima media a lo largo de la semana (T_{max}) y agrupar los datos de tasas y temperatura según la dirección del viento predominante. Estas correlaciones no implican una relación causal directa entre ambas variables, sin embargo la temperatura puede influir en la tasa de deposición a través de otros factores como la turbulencia del aire o la humedad relativa del suelo (Goossens, 1988; Lee *et al.*, 1994; Bücher, 1994).

No fue posible separar ni cuantificar los componentes de origen autóctono y alóctono del polvo. Sin embargo al contrastar la figura 4 y la tabla 2 se deduce la presencia de componentes alóctonos de origen sahariano en base al color y a la general disminución del tamaño de las partículas y del contenido en ERC. En otros casos, las partículas de carbonatos y cuarzo de tamaño apreciable indican la presencia de componentes autóctonos.

Conclusiones

Se obtiene para el año 1992 una tasa de 23,06 g·m⁻²·año⁻¹. La distribución semanal de esta tasa refleja importantes oscilaciones a lo largo del año, relacionadas con aportes de polvo de origen sahariano en situaciones atmosféricas de bajas presiones relativas en el N de Africa.

Durante el muestreo las precipitaciones fueron inferiores a la media secular. Dicho muestreo estuvo precedido por un período de sequía de varios años.

Por ello la tasa obtenida puede ser algo superior al valor típico en un año medio, por el aumento de los componentes autóctonos de origen no antrópico.

La evaluación de partículas sólidas en suspensión en la baja troposfera en la Península Ibérica se ha venido enfocando desde el punto de vista de la contaminación atmosférica. Los datos generados de este modo por las redes creadas (los únicos disponibles) no permiten obtener valores de tasas de deposición de polvo atmosférico.

Ante la gran escasez de datos, se deben multiplicar estas determinaciones, especialmente en el ámbito mediterráneo, mediante una metodología homogénea, sencilla y adecuada al caso, que facilite el contraste entre puntos distantes en el tiempo y en el espacio, y permite obtener la máxima información del material recogido.

Las tasas de deposición de polvo atmosférico son de interés y utilidad para evaluar el fondo regional de partículas en suspensión, sus efectos en los procesos edafogenéticos, y la proporción de contaminantes industriales incorporados.

AGRADECIMIENTOS

Reconocemos los útiles comentarios al presente trabajo realizados por los Dres. E. Barahona, J. Linares y J. J. Ibáñez, y el apoyo prestado por el COITI de Granada.

Referencias

- Buat-Ménard, P., Davies, J., Remoudaki, E., Miquel, J. C., Bergametti, G., Lambert, C. E., Ezat, U., Quétel, C., La Rosa, J., y Fowler, S. W. (1989). Non-steady-state biological removal of atmospheric particles from Mediterranean surface waters. *Nature*, 340, 131-134.
- Bücher, A. (1994). Etude en Europe des retombées de poussières d'origine saharienne. *Rév. de Géomorphol. Dynam.*, 43, 23-25.
- Drees, L. R., Manu, A., y Wilding, L. P. (1993). Characteristics of aeolian dusts in Niger, West Africa. *Geoderma*, 59, 213-233.
- Frank, A., y Kocurek, G. (1994). Effects of atmospheric conditions on wind profiles and aeolian sand transport with an example from White Sands National Monument. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 735-745.
- Gile, H., Peterson, F. F., y Grossman, R. B. (1966). Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. *Soil Science*, 5, 347-360.
- Goossens, D. (1988). The effect of surface curvature on the deposition of loess: a physical model. *Catena*, 15, 179-194.
- Goossens, D. (1994). Effect of rock fragments on eolian deposition of atmospheric dust. *Catena*, 23, 167-189.
- Goossens, D., y Offer, Z. Y. (1994). An evaluation of the efficiency of some eolian dust collectors. *Soil Technology*, 7, 25-35.

- Jaenicke, R., y Schütz, L. (1978). Comprehensive study of the physical and chemical properties of the surface aerosols in the Cape Verde Islands region. *J. Geophys. Res.*, 83, 3583-3599.
- Lee, J. A., Allen, B. L., Peterson, R. E., Gregory, J. M., y Moffett, K. E. (1994). Environmental controls on blowing dust direction at Lubbock, Texas, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 437-449.
- Loÿe-Pilot, M. D., Martin, J. M., y Morelli, J. (1986). Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature*, 321, 427-428.
- Mainguet, M. (1992). Système expert pour l'évaluation de la dynamique éolienne et la protection contre les effets traumatisants du vent. *Rév. de Géomorphol. Dynam.*, 113-136.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU) (1990). Medio ambiente en España. 1989, 699 págs.
- Offer, Z. Y., y Goossens, D. (1994). The use of topographic scale models in predicting eolian dust erosion in hilly areas: field verification of a wind tunnel experiment. *Catena*, 22, 249-263.
- Prospero, J. M. (1982). Eolian transport to the world ocean. En: C. Elimiani (ed.), *The Oceanic Lithosphere, 7 The Sea*, Wiley-Interscience, Nueva York, 801-874.
- Prospero, J. M., Bonatti, E., Schubert, C., y Carlson, T. N. (1970). Dust in the Caribbean atmosphere traced to an African dust storm. *Earth Planet Sci. letter*, 9, 287-293.
- Pye, K. (1992). Aeolian dust transport and deposition over Crete and adjacent parts of the Mediterranean sea. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 271-288.
- Rabenhorst, M. C., Wilding, L. P., y Girdner, C. L. (1984). Airborn dusts in the Edwards Plateau region of Texas. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 48, 621-627.
- Schlesinger, W. H. (1982). Carbon storage in the caliche of arid soils: a case of study from Arizona. *Soil Science*, 133, 247-255.
- Schlesinger, W. H. (1985). The formation of caliche in soils of the Mojave Desert, California. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 57-66.
- Smith, R. M., Twiss, P. C., Krauss, R. K., y Brown, M. J. (1970). Dust deposition in relation to site, season, and climatic variables. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 34, 112-117.
- Simonson, R. W. (1995). Airborne dust and its significance to soils. *Geoderma*, 65, 1-43.
- Tsoar, H., y Pye, K. (1987). Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology*, 34, 139-153.
- United States Department of Agriculture (USDA) (1994). Munsell Soil Color Charts. *Handbook 18 - Soil Survey Manual*.
- Yaalon, D. H. (1997). Soils in the Mediterranean region: what makes them different? *Catena*, 28, 157-169.

Recibido el 24 de febrero de 1997.
Aceptado el 21 de octubre de 1997.