

# Las lluvias de barro y el transporte y deposición de material sahariano sobre el nordeste de la península Ibérica

Anna Àvila

Universitat Autònoma de Barcelona. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals  
08193 Bellaterra (Barcelona). Spain

Manuscrito recibido en marzo de 1999

## Resumen

Se describe la composición mineralógica y elemental del contenido particulado de las lluvias de barro recogidas en el Montseny (nordeste península Ibérica) desde 1983 a 1998. Se han identificado 3 áreas-fuente en el norte de África: el Sahara occidental, el Atlas marroquí y el Sahara central. Entre zonas, se han hallado diferencias significativas en la mineralogía y contenido elemental del material particulado. Se ha analizado la frecuencia de las lluvias de barro, que presentan alta variabilidad interanual. De hecho, dos episodios aportaron el 60% del total depositado en 15 años. Estacionalmente, las lluvias de barro predominaron en primavera y otoño. Las aportaciones de cationes básicos y P de las lluvias de barro constituyen porcentajes de entre 60-100% en las entradas totales atmosféricas. Referido a la circulación de nutrientes en el ecosistema forestal, la deposición de  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$  por las lluvias de barro aporta el 27%, 45% y 84% respectivamente de las necesidades nutritivas de este encinar.

**Palabras clave:** polvo sahariano, composición del aire, aportación de nutrientes, situaciones meteorológicas sinópticas, nordeste español, bioquímica del bosque.

**Summary.** *Red rains and the transport and deposition of saharan dust over the northeastern Iberian peninsula*

The African dust frequency, dust content, dust mineralogy and elemental composition have been analyzed for a site in the Montseny mountains (northeastern Spain) for the period 1983-1998. Three source regions in North Africa have been identified for the dust loaded red rains: Western Sahara, Moroccan Atlas and central Sahara. Significant differences in mineralogy have been found between source areas. The occurrence of red rains is highly variable: two events accounted for 60% of total deposition in 15 years. Spring and autumn presented maximum number of red rain events and maximum dust deposition compared to other seasons. Element inputs in red rains accounted for 60-100% of total atmospheric inputs. These african inputs were important contributors to the holm oak forest needs at Montseny, by providing 27%, 45% and 84% respectively for  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$  and  $Mg^{+2}$  fluxes needed for the annual increment of the aboveground biomass.

**Key words:** Saharan dust, aerosol composition, nutrient inputs, meteorological synoptic situations, northeastern Spain, forest biogeochemistry.

## 1. Introducción

Esporádicamente, la lluvia que cae en la península Ibérica lleva incorporado polvo procedente de las regiones áridas del norte de África. Por este motivo, estas precipitaciones son conocidas como lluvias de barro (*red rains* en la literatura internacional). El levantamiento y mantenimiento de polvo en suspensión en el aire se define, en términos meteorológicos, como un litometeor (OMM, 1956). Se trata de un fenómeno relativamente frecuente en zonas áridas con poca vegetación pero que en la península Ibérica muestra una intensidad variable dependiendo de condiciones meteorológicas específicas (Martín Vide y Llasat, 1991).

Desde finales de los años setenta, el estudio del contenido en elementos químicos de la lluvia ha suscitado gran interés por dos motivos principales: 1) la lluvia ácida provoca graves efectos sobre los ecosistemas, terrestres o acuáticos (Hutchinson & Havas, 1980), y 2) la lluvia constituye una vía de entrada de nutrientes relevante en los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas terrestres y acuáticos (Hedin et al., 1995; Likens et al., 1995).

El contenido soluble y particulado de la lluvia depende de la existencia de fuentes de emisión en el recorrido de las masas de aire, la capacidad de «scavenging» de las gómulas, la cantidad de lluvia, etc. La atmósfera contiene gases y partículas de origen natural o antropogénico que, tras un tiempo más o menos largo de residencia, son finalmente depositadas en la superficie terrestre por medio de la precipitación húmeda o por vía seca. La acidez de la lluvia dependerá del balance en solución entre las sustancias ácidas y alcalinas. Las sustancias ácidas o los precursores de ácidos provienen mayormente de emisiones antropogénicas (combustión de fueles fósiles, procesos industriales, reacciones en el motor de explosión de los coches). Las sustancias alcalinas neutralizantes pueden tener un origen antrópico, debido a actividades como las fábricas de cemento, la siderometalurgia o las centrales térmicas (Semb et al., 1995), pero la procedencia de fuentes naturales por levantamiento de polvo edáfico es muy superior en zonas a sotavento de zonas áridas (Chester et al., 1996). Sin embargo, la reciente modificación de los usos del suelo y la deforestación en África subsahariana ha provocado un aumento de esta procedencia «natural» (Tegen y Fung, 1995), lo que confunde la distinción entre el origen natural o el antrópico para las partículas alcalinas.

El desierto del Sahara y las regiones áridas circundantes en el norte de África constituyen una de las zonas de emisión más importantes de polvo mineral a la atmósfera. Este material es transportado a grandes distancias por los vientos alisios hacia el Atlántico Norte (Arimoto et al., 1995; Prospero y Carlson, 1972; Prospero, 1996), América central y el Caribe (Prospero et al., 1987) y América del sur (Reichholf, 1986; Swap et al., 1992).

Aunque el transporte principal de polvo sahariano es hacia el oeste, bajo determinadas condiciones meteorológicas también se produce transporte hacia Europa, la magnitud del cual se ha estimado en  $100(\pm 20) \cdot 10^6 \text{ t año}^{-1}$  (D'Almeida, 1986). Por otro lado, Jaenicke y Schütz (1978) calcularon que el 70% del polvo transportado hacia el Atlántico se depositaba en los primeros 2000 km recorri-

dos. Si este porcentaje se mantiene también en la trayectoria hacia Europa, entonces la península Ibérica, situada entre 2000 y 3000 km al norte de África, podría recibir una deposición del orden de decenas de millones de toneladas de polvo sahariano al año.

En los países del entorno mediterráneo el fenómeno de las lluvias de barro ha llamado la atención desde la antigüedad, pero las descripciones más detalladas surgen a partir del 1900 (Bücher y Lucas, 1984). Se han publicado muchos estudios de aspectos específicos, como la frecuencia de las lluvias de barro (Bücher, 1986; DeAngelis y Gaudichet, 1991; Dessens y Van Dinh, 1990; Wagenbach y Geiss, 1989), su contenido mineral y elemental (Bergametti et al., 1989 a y b; Coudé Gausson et al., 1987; Chester et al., 1991, 1996; Ganor y Mamane, 1982), las situaciones meteorológicas responsables de su formación (Bergametti et al., 1989b; Bücher et al., 1983; Prodi y Fea, 1979; Yaalon y Ganor, 1979), y su influencia en los ecosistemas receptores (Loye Pilot et al., 1986). Especial atención han merecido las lluvias de barro sobre Córcega (Bergametti et al., 1989 a y b; Loye-Pilot et al., 1986, 1996) y Cerdeña (Le Bolloch et al., 1996; Caboi et al., 1992; Guerzoni et al., 1995), islas que por su proximidad al norte de África resultan especialmente afectadas. Sin embargo, también se han publicado descripciones de lluvias de barro en el Reino Unido (Burt, 1991; Wheeler, 1986), Países Bajos (Reiff et al., 1986) y Escandinavia (Franzén et al., 1994).

En la península Ibérica, Pardillo (1932) estudió la mineralogía de 2 episodios de excepcional deposición de polvo sahariano en octubre de 1926 y noviembre de 1930. Estudios más recientes han abordado la frecuencia temporal del fenómeno (Martín Vide y Moreno, 1985; Martín Vide y Llasat, 1991; Quereda et al., 1996), la composición mineral del polvo africano (Queralt et al., 1993; Àvila et al., 1997), su composición elemental soluble (Rodà et al., 1993) y la de material particulado (Àvila et al., 1998). Estos estudios tratan de aspectos particulares del fenómeno, pero hasta la fecha no se ha hecho un trabajo de síntesis en la península Ibérica para la mejor comprensión de los procesos que originan el fenómeno y las repercusiones que éste tiene en los lugares de recepción. Ello podría tener un especial interés por el probable aumento de su frecuencia en conexión con modificaciones en el clima por el calentamiento global y por los cambios en el uso del suelo en extensas regiones africanas (Àvila y Peñuelas, 1999).

Este artículo sintetiza la información recogida durante 15 años de muestreo de la lluvia (1983-1998) en una estación rural del Montseny (Barcelona) con el objetivo de dar a conocer, sobre las lluvias de barro: 1) sus pautas estacionales e interanuales, 2) sus causas meteorológicas, 3) la cantidad depositada de material particulado, su composición mineralógica y composición elemental soluble e insoluble, y 4) qué efectos tienen sobre los ecosistemas forestales propios del nordeste peninsular.

## 2. Área de estudio

El Montseny se halla a 45 km al NE de Barcelona y a 25 km al oeste del Mar Mediterráneo. El macizo se halla principalmente cubierto de encinares, con

hayedos y landas en las partes culminales (1500-1700 m s.n.m.). La estación de muestreo se halla en un claro abierto en el encinar denso que cubre la cuenca del Torrent de la Mina, a 700 m s.n.m. La litología de la cuenca está formada por esquistos metamórficos, con clorita, cuarzo, muscovita y albita como principales minerales. Los suelos muestran una elevada heterogeneidad espacial, con una profundidad media en la cuenca del Torrent de la Mina de 60 cm. Los suelos se clasifican como Entisols (lithic Xerorthents) o Inceptisols (Hereter y Sánchez, 1999).

El clima es mediterráneo montano, con una precipitación media para el periodo 1983-1998 de 930 mm año<sup>-1</sup>. La precipitación nivosa sólo representa el 3% del total. Una descripción más detallada del área y de los estudios realizados en el Montseny se puede hallar en Rodà et al. (1999).

### 3. Métodos

La lluvia se recogió semanalmente con 4 colectores de deposición global. El término *lluvia de barro* se ha utilizado para describir episodios de lluvia semanales que dejaron señales de manchas rojizas sobre la superficie blanca de los colectores de precipitación o en los filtros usados en la filtración de la muestra de lluvia. El mismo criterio se ha aplicado a lo largo de los 15 años de estudio (1983-1998, años hidrológicos definidos del 1 de agosto hasta el 31 de julio). La lista completa de los episodios semanales con lluvia de barro se da en la tabla 1. Esta lista se completa con otros eventos que produjeron tan poca precipitación (< 2mm) que no fue suficiente para la determinación química, pero que se han incluido para los cálculos de frecuencias de lluvias de barro. Se trata de 12 episodios, recogidos el 3 de septiembre de 1983, 16 de abril de 1984, 19 de julio de 1985, 29 de julio de 1986, 20 de noviembre de 1986, 30 de abril de 1987, 12 de agosto de 1987, 10 de septiembre de 1987, 4 de julio de 1988, 23 de abril de 1990, 21 de mayo de 1990, 2 de julio de 1990.

La deposición global recoge la deposición húmeda más la sedimentación gravitatoria de partículas (Eriksson, 1953). En el Montseny, la contribución de la fracción depositada como sedimentación gravitatoria se evaluó en un 0.2-12 % de las concentraciones iónicas medias (Àvila y Alarcón, 1999) dependiendo de los elementos. Estos porcentajes son pequeños y permiten suponer que la deposición seca de partículas sedimentadas por gravedad no influye de manera notoria en la composición química de la lluvia. Las muestras de lluvia se trasladaban al laboratorio en el mismo día de recogida y inmediatamente eran analizadas para la conductividad, pH y alcalinidad. Una alícuota se filtraba (filtros Millipore 0.45 µm) y se congelaba a -25°C para posteriores análisis. Los cationes principales (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup>) se analizaron por absorción atómica, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se analizó por colorimetría en un FIA-Tecator y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> por cromatografía líquida con un DIONEX-100. La descripción completa del protocolo de muestreo y análisis se puede encontrar en Àvila (1996). Se ha analizado la fracción soluble en el agua de lluvia, lo que sirve de base para calcular los aportes de nutrientes en solución por la lluvia. Estos se calculan como el producto de la concentración iónica del

elemento en cuestión por la cantidad de precipitación en cada evento, y se suman estos productos para el periodo anual.

La deposición de polvo aquí considerada se refiere a la cantidad de material particulado depositado en las lluvias de barro. El material particulado recogido en los filtros se pesó y almacenó para posteriores análisis. La mineralogía se analizó en 17 filtros correspondientes a 13 eventos saharianos (con 4 filtros replicados) mediante difracción por rayos X con un difractor Siemens D500 dotado de un tubo de Cu y un monocromador de grafito (Àvila et al., 1997).

La composición elemental del material particulado se analizó por ICP OS, en los Servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Barcelona. Se analizaron 5 muestras que correspondían a 3 zonas fuente en el norte de África. Para el cálculo de los aportes de elementos de forma particulada, se obtuvo primero la media ponderada para cada zona fuente y luego, se calculó el producto de las concentraciones medias ponderadas por la cantidad de polvo por zona, lo que proporciona los aportes particulados totales.

Hay que tener en cuenta que podría haber una cierta contribución de material particulado aportado por las demás lluvias (no africanas) no contabilizada. De todos modos, según cálculos aproximados ésta debe ser muy inferior a las cantidades aportadas por las lluvias de barro (Àvila et al., 1998).

Para la identificación de las zonas fuente, en todos los eventos de lluvia de barro se buscó la procedencia de la trayectoria de las masas de aire, bien mediante el cálculo de retrotrayectorias, bien mediante la observación de la situación sinóptica según el Boletín Meteorológico Nacional o el Deutsche Wetterbericht (Àvila et al., 1998; Àvila y Alarcón, 1999). Se han identificado 3 regiones principales de procedencia de las intrusiones africanas hacia el NE de la península: el Sahara occidental (SO), el Atlas marroquí (AM) y el Sahara central (SC).

## 4. Resultados

### 4.1. Análisis de las frecuencias

En episodios de intrusión sahariana, la deposición ocurre tanto en forma seca como en forma húmeda vía las lluvias de barro. A pesar de que faltan estudios sobre el papel de la vía seca frente a la húmeda en la deposición de polvo africano, varios autores han señalado la dominancia de la vía húmeda (Prodi y Fea, 1979; Le Bolloch et al., 1996; Loye Pilot et al., 1996).

La llegada de polvo sahariano sobre la península Ibérica ocurre en episodios puntuales, esporádicos y muy irregulares. En el Montseny, entre el 1 de agosto de 1983 al 31 de julio de 1998 se detectaron 58 semanas con lluvia de barro, en 46 de las cuales se analizó la composición química soluble (tabla 1). Ello nos da una media de 4.1 semanas con lluvia de barro al año (s.e.  $\pm 0.57$ ). Este valor es algo superior al que obtuvieron Martín Vide y Llasat (1991) en un análisis de una serie de 43 años de datos diarios de lluvia de barro (1944 a 1986, ambos inclusive) en el observatorio Fabra, de Barcelona, que fue de 2.98 (s.e.  $\pm 1.1$ ). Esta diferencia probablemente se agrandaría si en el Montseny se

**Tabla 1.** Lista de las lluvias de barro detectadas en La Castanya (Montseny, NE de la península Ibérica) en el período 1 de agosto de 1983 - 31 de julio de 1998, con las cantidades de lluvia y la aportación de material particulado correspondientes. Áreas-fuente: AM = Atlas marroquí, SO = Sahara occidental, SC = Sahara central.

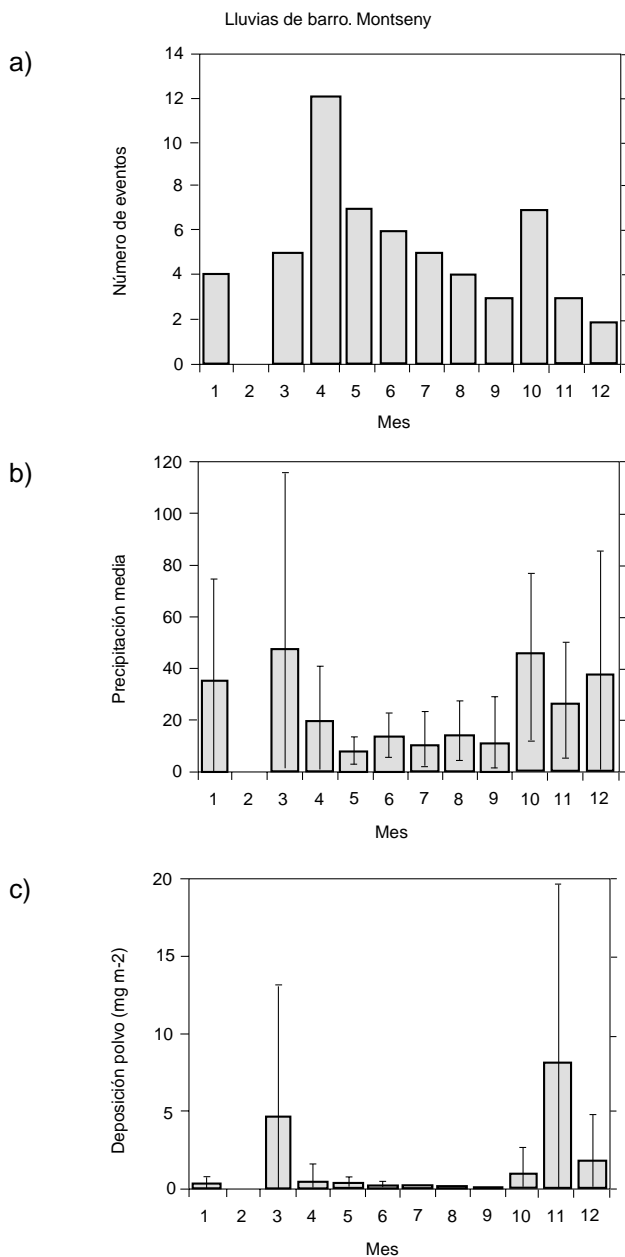
Día de muestreo d-m-año	Día de la lluvia d-m-año	Lluvia mm	Deposición mat. part. mg m <sup>-2</sup>	Área fuente
2-5-84	29-4-84	3.4	–	AM
6-5-84	2-5-84	4.1	–	AM
25-6-84	18/19-6-84	5.2	–	AM
12-11-84	9/11-11-84	49.7	16356	AM
25-4-85	21-4-85	30.8	3631	AM
2-5-85	25/26-4-85	3.4	–	AM
21-6-85	19-6-85	9.2	–	SO
8-1-86	5-1-86	3.5	–	–
10-4-86	6/7-4-86	30.1	–	SO
24-4-86	18-4-86	9.9	–	SO
6-5-87	3-5-87	6.9	–	AM
26-8-87	24-8-87	6.3	–	–
4-11-87	28-10-87	42.5	1013	SO
5-12-87	4-12-87	70.9	3989	SO
10-12-87	9-12-87	2.5	–	AM
5-4-88	4/5-4-88	57.6	–	AM
9-5-88	7/8-5-88	5.3	1402	SO
27-6-88	23-6-88	14.3	731	SO
22-8-88	21-8-88	32.6	132	–
19-10-88	18-10-88	66.1	255	SC
31-3-89	30-3-89	16.1	57	SC
13-4-89	10-4-89	20.0	148	AM
27-4-89	24/26-4-89	56.3	30	SO
6-7-89	6-7-89	21.5	212	AM
2-11-89	27-10-89	18.4	128	SO
12-3-90	8-3-90	3.1	63	AM
15-10-90	11/13-10-90	105.0	776	SC
23-10-90	15-10-90	26.1	620	SO
11-3-91	5-3-91	26.9	2958	AM
28-3-91	25-3-91	169.0	19435	AM
17-4-91	15-4-91	2.0	–	AM
19-6-91	16-6-91	11.0	–	SO
16-10-91	11-10-91	15.4	4731	AM
11-3-92	4-3-92	22.6	1130	SC
30-9-92	–	32.1	32	–
13-10-92	7/10-10-92	47.4	47	AM
26-5-93	26-5-93	14.3	–	AM
4-11-93	1-11-93	28.8	–	AM
14-8-95	14-8-95	15.2	–	AM
22-1-96	22-1-96	30.7	217	SO
29-1-96	24-1-96	91.7	518	AM
27-1-97	24/25-1-97	14.5	540	AM
21-5-97	13/14-5-97	7.2	25	AM
26-5-97	23-5-97	16.5	50	AM
10-6-98	6/7-6-98	31.0	155	AM
19-6-98	11/15-6-98	12.5	63	SC
suma AM		679.1	48869(82%)	25(54%)
suma SO		324.7	8130(14%)	12(26%)
suma SC		222.3	2281 (4%)	5(11%)
indeterminado		74.5	164(0.3%)	4 (9%)
<b>Total 15 años</b>		<b>1300.6</b>	<b>59444</b>	<b>46</b>

hubiera recogido la lluvia diaria en lugar de semanal, dado que, tal como demuestran Martín Vide y Moreno (1985), los días con lluvia de barro tienen una distribución contagiosa, con una probabilidad alta (14%) de que un día de lluvia de barro vaya seguido por otro evento de este tipo. Así, en nuestro sistema de muestreo es muy probable que en la misma semana se hayan recogido más de un día de lluvia de barro, y que en cambio sólo sea considerado como una ocurrencia. En resumen, la comparación de estas dos series de observaciones en el nordeste peninsular parece indicar que hay una tendencia a aumentar la frecuencia de las lluvias de barro en épocas recientes. Àvila y Peñuelas (1999) han comparado también las frecuencias de lluvias de barro en los periodos 1944-1974 en el observatorio Fabra y 1983-1998 en el Montseny. Las diferencias son en el mismo sentido: 2.3 eventos año<sup>-1</sup> (s.e.±0.23) y 5.6 (s.e. ±1.1) respectivamente, pero la magnitud de la diferencia es mayor porque se contabilizaron las lluvias de barro en el Montseny por su señal química en lugar de por detección visual de material particulado.

La repartición de las lluvias de barro dentro del año no fue homogénea: las lluvias de barro predominaron en primavera (abril y mayo) y otoño (octubre) tanto en número de episodios contabilizados, como en las cantidades de precipitación y material particulado aportadas (figura 1). En verano se produjeron algunas lluvias de barro pero de poca cuantía y con poca deposición de material particulado (figura 1). Aunque se observa una pauta estacional con máximos de primavera y otoño, la irregularidad temporal es muy grande tal como demuestran las barras de desviación típica de la figura 1. De hecho, en las elevadas cantidades de polvo sahariano de marzo y noviembre tienen un gran peso unos únicos episodios excepcionales producidos el 5 de noviembre de 1985 y el 23 de marzo de 1991. En el resto de años la aportación de polvo africano en primavera u otoño es moderada.

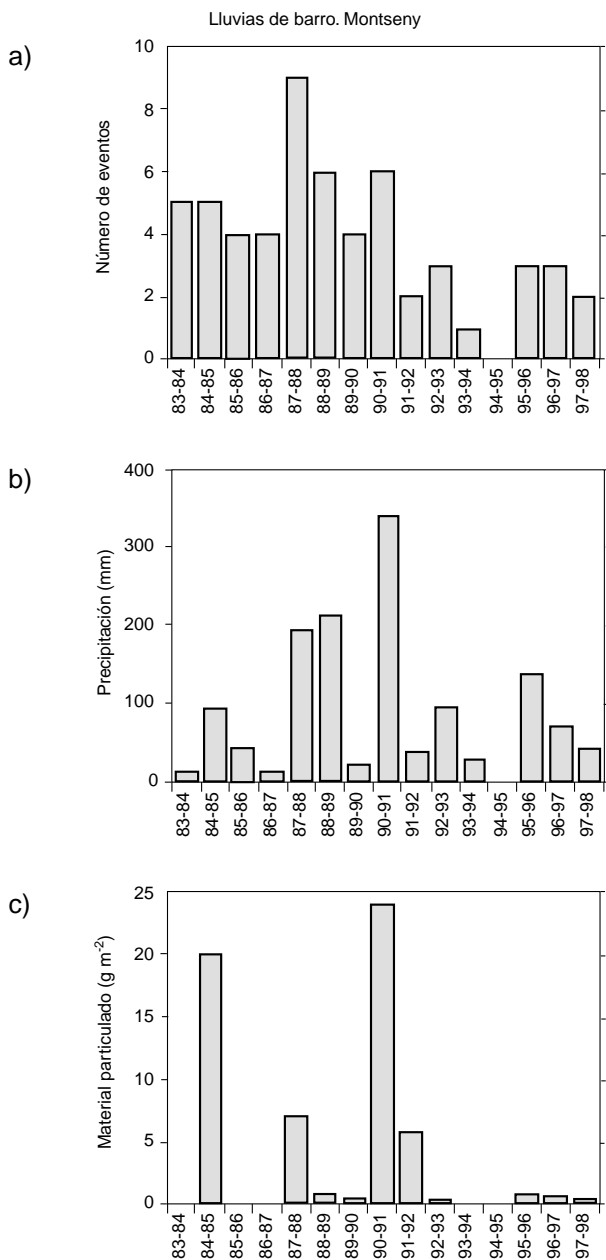
La pauta interanual también muestra el fuerte carácter irregular de estas lluvias (figura 2). En el año 1994-1995 no se produjeron episodios identificables como lluvia de barro. En cambio, años con un número considerable de estas lluvias fueron 1987-88, 1988-89 y 1990-91. Este último año destaca por la cantidad de precipitación asociada a este tipo de lluvias y por su aporte de material particulado. Desde 1992 se han producido algunas lluvias de barro pero la cantidad de material que han depositado es muy pequeña.

Una tendencia similar a la disminución de las lluvias de barro se ha detectado también en Córcega, en un registro de 1983 a 1994 (Loye Pilot et al., 1996). Las lluvias del Montseny coinciden con las de Córcega en presentar altas frecuencias africanas durante 1987-1991. Sin embargo, estas ocurrencias difieren de las observaciones en la concentración de aerosoles de origen sahariano en el Mediterráneo, que indican máximos en 1984 y en 1992 (Dulac et al., 1996). Ello podría reflejar una diferenciación de las pautas temporales entre los procesos de levantamiento y transporte de polvo, y los de deposición por vía húmeda, donde la deposición por vía húmeda iría asociada a la existencia de unas situaciones meteorológicas específicas apropiadas para la formación de precipitación.



**Figura 1.** Evolución estacional de las lluvias de barro en el Montseny: *a)* número de semanas totales en los 15 años de lluvia de barro; *b)* precipitación media mensual ( $\pm$  desviación típica) de lluvias de barro, y *c)* deposición media mensual ( $\pm$  desviación típica) de material particulado aportado por las lluvias de barro.





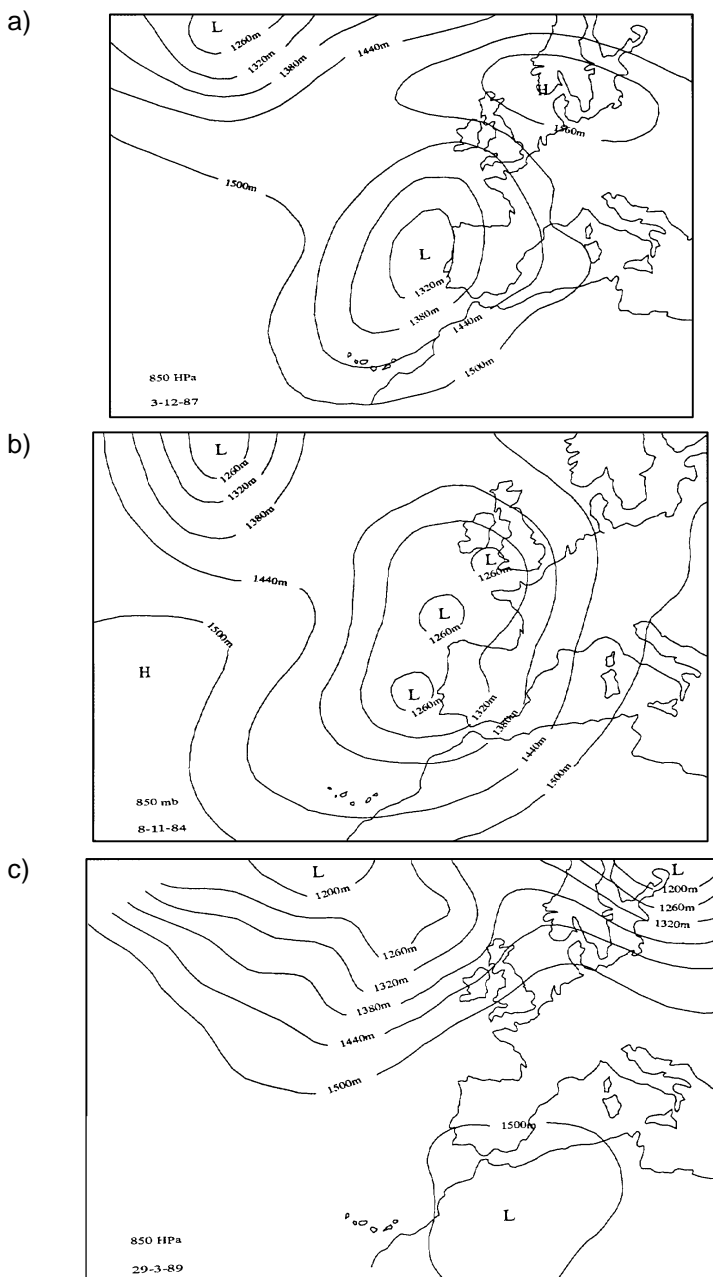
**Figura 2.** Evolución interanual de las lluvias de barro en el Montseny para el período 1983-1998: *a*) número de semanas con lluvia de barro por año; *b*) cantidad de precipitación ( $\text{mm año}^{-1}$ ) aportada por las lluvias de barro por año, y *c*) deposición de material particulado ( $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) aportado por las lluvias de barro.

#### 4.2. Situaciones meteorológicas

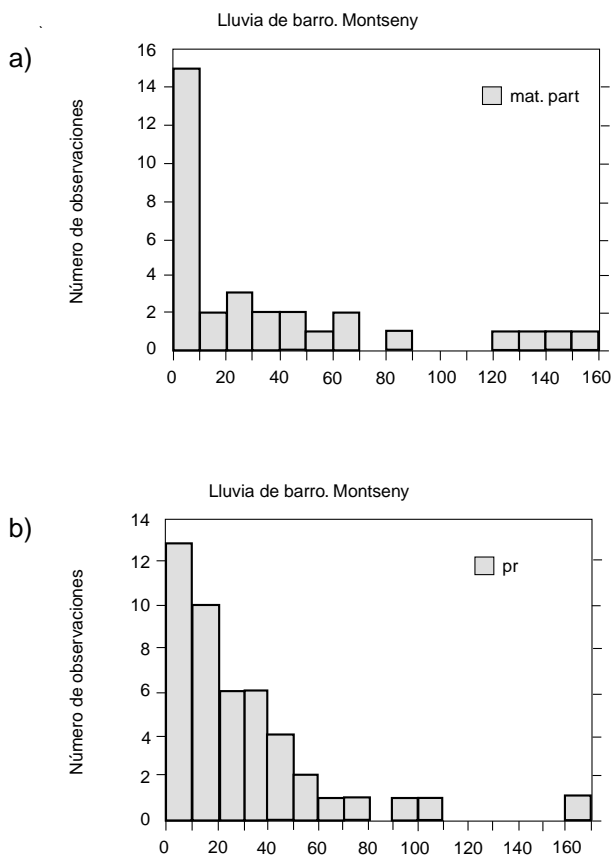
Los flujos de aire de África del norte hacia Europa se hallan normalmente asociados a la presencia de una depresión situada encima de la península Ibérica o en ambos lados, sobre el sur de Portugal o sobre el mar de Alborán (más o menos sobre el paralelo 35°), y ello coincidiendo con un centro de altas presiones en el Mediterráneo occidental o en el centro de Europa. Con estas configuraciones sinópticas, se crea una advección del sur con desplazamiento de masas de aire que han pasado sobre el norte de África. Estas depresiones acostumbran a tener un trayecto de oeste a este, con lo cual realizan un «barrido» del norte de África, y a nuestras costas llegan materiales edáficos cuyo origen puede estar en algún punto entre las costas occidentales de África y el golfo de Libia. En la figura 3 se muestran ejemplos de las situaciones meteorológicas características de los flujos de las masas de aire originados en el Sahara Occidental, el Atlas marroquí y el Sahara central, respectivamente. Además, para que se forme la lluvia de barro, el paso de la depresión debe coincidir con el levantamiento de polvo desde el suelo. Los mecanismos locales de levantamiento del polvo sahariano han sido descritos en Morales (1979) y Coudé-Gausson y Rognon (1983), entre otros. Normalmente, el levantamiento se produce a consecuencia de un fuerte calentamiento diurno que provoca turbulencias verticales. Las tempestades de viento empiezan con una multiplicación de los remolinos que se desplazan en la dirección del viento. El viento se halla normalmente precedido por una discontinuidad atmosférica, de suerte que hay un frente que separa dos masas de aire de distinta naturaleza. La parte anterior de la tempestad puede aparecer como una gran muralla: las partículas edáficas se elevan hasta 1000-2000 m de altura y hay una gran disminución de la visibilidad. Se ha estudiado con bastante detalle el fraccionamiento granulométrico de las partículas. Arimoto et al. (1997) muestran que, una vez situadas en las capas altas de la atmósfera (> 1000 m) incluso las partículas mayores permanecen en suspensión y pueden ser transportadas a grandes distancias. El polvo forma los núcleos de condensación a partir de los cuales crecerán las gotas (Levin y Ganor, 1996). Así pues, el polvo aportado por estas masas de aire procede de las regiones de África donde se ha producido la tempestad de viento. El análisis de los contenidos minerales del polvo recogido en nuestras latitudes permite distinguir los lugares de procedencia, tal como discutimos en el apartado 3.4.

#### 4.3. Deposición de material particulado

La concentración de material particulado en las lluvias de barro fue enormemente variable: de 0.5 a 3060 mg L<sup>-1</sup>. La media por lluvia fue de 94 mg L<sup>-1</sup>, pero la mediana fue sólo de 3.7 mg L<sup>-1</sup>. Hubo una gran dominancia de los episodios de poca concentración (clase de 0 a 20 mg L<sup>-1</sup>) y en cambio, muy pocos episodios de concentraciones importantes (figura 4). En particular, durante el periodo de 1983 a 1998 destacaron dos lluvias de barro (el 4 de noviembre de 1984 y el 21 de marzo de 1991) con una importante concentración de material particu-



**Figura 3.** Situaciones meteorológicas responsables del transporte africano: a) transporte desde el Sahara occidental (SO); b) transporte desde el Atlas marroquí (AM), y c) transporte desde el Sahara central (SC).



**Figura 4.** Histogramas de: *a*) concentración de material particulado por lluvia de barro ( $\text{mg L}^{-1}$ ), y *b*) cantidad de precipitación (mm).

lado: 329 y 115  $\text{mg L}^{-1}$ , respectivamente. Como además en estos episodios llovió abundantemente, las aportaciones de estas dos lluvias fueron de 16.4  $\text{g m}^{-2}$  y 19.4  $\text{g m}^{-2}$ , respectivamente, lo que representa el 60% de la deposición total de polvo sahariano (59  $\text{g m}^{-2}$ ) en los 15 años. La magnitud de estas deposiciones de polvo africano por vía húmeda es comparable a las publicadas para principios de siglo en Barcelona, con 8.4  $\text{g m}^{-2}$  el 30-31 de octubre de 1926 y 32.8  $\text{g m}^{-2}$  el 27 de noviembre de 1930 (Pardillo, 1932). Desgraciadamente, la falta de continuidad de los registros desde aquellas fechas hasta la actualidad impide apreciar mejor las pautas interanuales.

El total de material particulado depositado en los 15 años de registro fue de 59.5  $\text{g m}^{-2}$ , lo que resulta en una deposición media anual de polvo africano de 4  $\text{g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ . Este resultado es algo inferior al publicado anteriormente para

el Montseny basado en el registro de lluvias hasta 1994 ( $5.3 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , Àvila et al., 1997) y se debe a la disminución de las lluvias de barro a partir de este año.

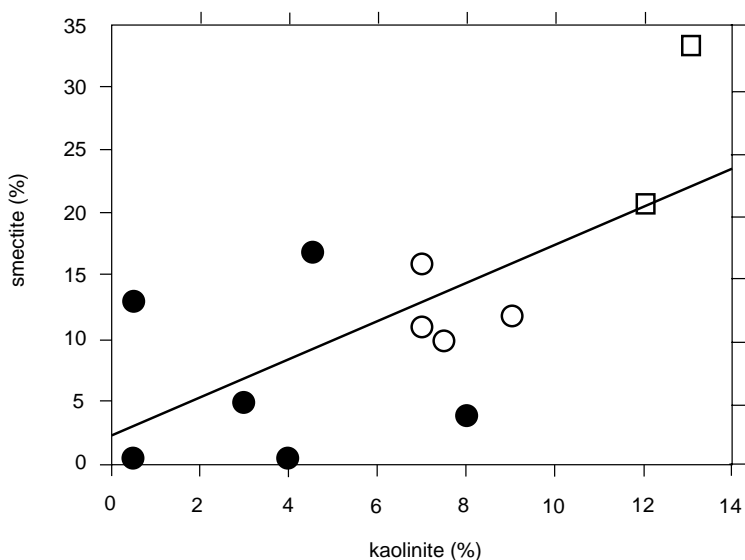
Tras la identificación de las zonas de origen de todas las muestras recogidas, se puede contabilizar la contribución de las distintas zonas en los aportes totales de material particulado. En nuestro registro hemos observado un predominio del Atlas marroquí como área-fuente con el 82% del total depositado por las lluvias de barro, seguido del Sahara Occidental con el 14%, y el centro del Sahara con el 4% (tabla 1). Siendo que la ordenación sigue distancias crecientes, parece deducirse que la aportación de polvo está inversamente relacionada con la distancia de la zona-fuente.

#### 4.4. Mineralogía del material particulado y zonas de origen

El análisis mineralógico del material particulado depositado por las lluvias de barro ha mostrado la presencia de arcillas, como la illita, kaolinita, palygorskita, y de otros minerales (como la calcita, dolomita, cuarzo) con la siguiente ordenación de abundancias: illita > cuarzo > esmectita > palygorskita > kaolinita > calcita > dolomita > feldspatos. La palygorskita es una arcilla típicamente formada en ambientes desérticos y se ha citado como indicadora de origen sahariano (Coudé Gaussen et al., 1987; Chamley, 1988). En todas las muestras de polvo de las lluvias de barro muestreadas en nuestro estudio se ha encontrado palygorskita, con porcentajes entre el 5 y 11% del total, lo que corrobora la procedencia africana de este material. Por otra parte, se ha visto la existencia de una diferenciación en la mineralogía dependiendo de la zona de origen en África (tabla 2). El ANOVA pone de manifiesto que el polvo de la zona central del Sahara tiene menos cuarzo y dolomita y un mayor contenido en esmectita y kaolinita que el del Sahara occidental o del Atlas marroquí. Estas diferencias mi-

**Tabla 2.** Composición mineralógica del polvo africano por área-fuente (% de minerales identificados). Sm = esmectita, Pk = palygorskita, Il = illita, Ka = kaolinita, Qz = cuarzo, Fd = feldspato, Cc = calcita, Do = dolomita. Se indican las diferencias significativas entre grupos ( $p < 0.05$ , indicado por letras a, b y c).

Área-fuente	Sm	Pk	Il	Ka	Qz	Fd	Cc	Do
<b>Atlas marroquí</b>								
media	<b>6.7b</b>	<b>10.1</b>	<b>39.4</b>	<b>3.5b</b>	<b>20.6a</b>	<b>3.6</b>	<b>11.8</b>	<b>5.4a</b>
des. típica	6.8	2.0	14.2	2.6	3.0	2.6	8.6	2.7
<b>Sahara occidental</b>								
media	<b>12.3a</b>	<b>7.3</b>	<b>41.0</b>	<b>7.6a</b>	<b>17.4a</b>	<b>3.4</b>	<b>7.0</b>	<b>5.0a</b>
des. típica	2.6	2.2	6.2	0.9	3.0	2.6	2.3	0.8
<b>Sahara central</b>								
media	<b>27.3c</b>	<b>8.3</b>	<b>34.5</b>	<b>12.5c</b>	<b>14.5b</b>	<b>2.5</b>	<b>1.2</b>	<b>0.9b</b>
des. típica	8.8	1.8	9.5	0.7	2.1	2.8	0.9	0.6



**Figura 5.** Contenido en esmectita y kaolinita del material particulado aportado por las lluvias de barro. Círculos oscuros = procedencia de AM, círculos claros = procedencia de SO, cuadrados claros = procedencia de SC.

neralógicas corresponden a diferencias litológicas en las zonas africanas. La cordillera del Atlas está formada por depósitos jurásicos, cretácicos y terciarios ricos en calcáreas y margas, con afloramientos graníticos precámbricos en la parte culminal (FAO, 1976). Por otro lado, la depresión que se extiende entre el Atlas y las montañas del Hoggar está formada por depósitos del cámbrico, con anhidritas y gres arcilloso (FAO, 1976). Por meteorización de estas arcillas se producirían los minerales (kaolinita y esmectita) hallados en las muestras procedentes del centro del Sahara. Como ejemplo, en la figura 5 puede verse la distribución de las muestras identificadas según su zona de procedencia en África para los ejes de contenido de esmectita y cuarzo, en la que se constata la diferenciación mineralógica por zonas geográficas.

#### 4.5. Composición química del material particulado

Se analizó la composición elemental de 5 lluvias de barro correspondientes a las tres zonas de origen en el norte de África; con 2 muestras del Sahara occidental y del Atlas marroquí respectivamente, y una del Sahara central. La composición química por zona de origen se muestra en la tabla 3. Los contenidos elementales de este material particulado corresponden a un origen «crustal». Se calcularon los factores de enriquecimiento respecto a Al como indicador de re-

**Tabla 3.** Composición elemental del material particulado por áreas-fuente de 5 lluvias de barro recogidas en el Montseny (NE de la península Ibérica), 2 correspondientes al Atlas marroquí (AM), 2 al Sahara occidental (SO) y 1 al Sahara central (SC), junto a la media total y desviación típica. Se dan también los factores de enriquecimiento (EF) calculados respecto al Al:  $EF_{Al} = (X/Al)_{aerosol} / (X/Al)_{corteza}$ , donde X = elemento de interés, y los valores de  $(X/Al)_{corteza}$  son de Taylor y McLennan (1985).

Elemento		AM	SO	SC	Media	Des. típica	$EF_{Al}$
Na	%	0.42	0.45	0.11	0.37	0.16	0.2
Mg	%	1.71	1.69	1.36	1.63	0.17	1.7
K	%	1.72	1.97	0.50	1.57	0.62	0.8
Ca	%	6.73	1.36	0.44	3.32	3.14	1.4
Al	%	14.3	15.6	3.07	12.6	9.94	1.0
Ti	%	0.40	0.43	0.15	0.36	0.12	1.5
Fe	%	3.50	4.23	1.55	3.40	1.11	1.4
Li	ppm	30.0	60.8	13.8	39.1	24.7	2.3
P	ppm	624	768	222	601	313	1.1
S	ppm	49.6	67.8	14.0	49.7	25.0	0.2
V	ppm	81.9	109	32.0	82.6	31.8	1.4
Cr	ppm	69.1	84.8	29.8	67.5	23.2	2.5
Mn	ppm	586	647	232	540	182	1.2
Ni	ppm	37.1	39.0	15.5	33.5	12.9	2.2
Cu	ppm	36.9	54.0	14.6	39.3	16.3	2.0
Zn	ppm	133	194	58.0	142	59.4	2.5
Sr	ppm	184	104	51.9	125	57.5	0.5
Zr	ppm	96.9	77.1	32.5	76.0	37.6	0.5
Ba	ppm	435	465	174	395	125	0.9
Pb	ppm	33.1	64.3	59.0	47.4	16.8	2.5

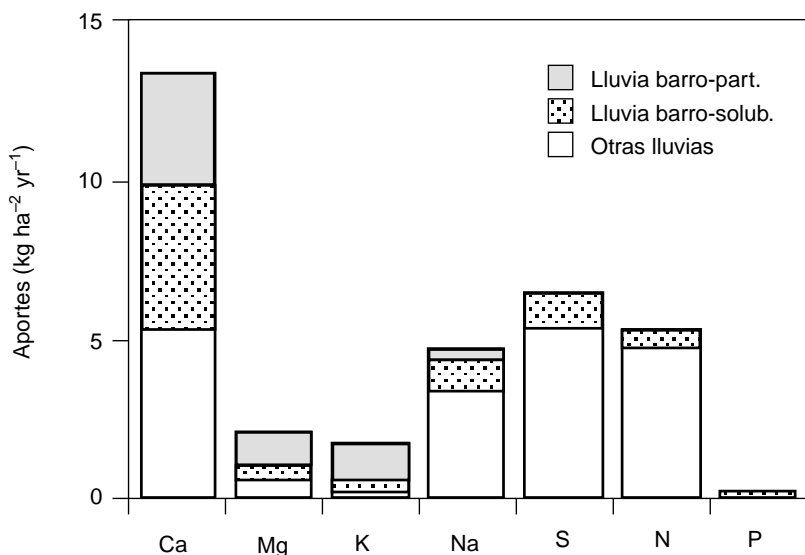
ferencia crustal ( $EF_{Al}$ ), donde  $EF(Al) = (X/Al)_{aerosol} / (X/Al)_{corteza}$ , con X = elemento de interés (expresado en %) y los valores  $(X/Al)_{corteza}$  obtenidos de Taylor (1964). Los valores de EF fueron inferiores a 3 incluso para los elementos indicadores de polución antropogénica como el Pb, Cd, Zn o Cu (tabla 3), lo que indica el carácter limpio de contaminantes de origen industrial de estos aerosoles, y contrasta con los resultados obtenidos en otras zonas circum-mediterráneas. Por ejemplo, Chester et al. (1991) dan valores de EF de 864 para Pb, 147 para Zn y 21 para Cu en aerosoles muestreados en 5 localidades alrededor del Mediterráneo (costa de Francia, de España, en Cerdeña y en el Mediterráneo occidental).

#### 4.6. Aportación de elementos particulados y en solución por parte de las lluvias de barro

La deposición de nutrientes solubles en las lluvias de barro del Montseny ha sido descrita en Àvila y Rodà (1991) y Rodà et al. (1993). Los minerales contenidos en la lluvia de barro sufren procesos de disolución (yeso, calcita, evaporita) o de meteorización (arcillas) mediante los cuales se liberan iones en solución durante el transporte. Este contenido iónico soluble proporciona una señal muy característica al agua de las lluvias de barro, que contrasta fuertemente con la composición de otras lluvias sin estas partículas terrestres (Àvila y Alarcón, 1999; Caboi et al., 1992; Carratalá, 1993; Loye-Pilot et al., 1986; Rodà et al 1993; Sequeira, 1993). Comparando su composición media con la de otros tipos de lluvias, las lluvias de procedencia africana generalmente tienen un pH muy alto, alcalinidad elevada, y concentraciones altas de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+1}$ ,  $\text{Na}^{+1}$  y  $\text{Cl}^{-}$ . El calcio proviene de la disolución de la calcita y la dolomita y el  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^{+1}$ , de la meteorización de arcillas o, para el  $\text{Mg}^{+2}$ , también de la disolución de la dolomita. El elevado contenido en Cl y Na de las lluvias de barro, unas tres veces superior que en las lluvias oceánicas (Àvila y Alarcón, 1999) indica que, además de aerosoles de sales marinas incorporados durante el trayecto sobre el Mediterráneo, las lluvias africanas contendrían Na y Cl procedente de la disolución de evaporitas de los suelos africanos. Estas evaporitas no se han visto en la fracción particulada probablemente debido a su facilidad de disolución, lo que impide observarlas en el análisis por difracción RX.

En la figura 6 se desglosan los aportes anuales medios en la lluvia para los elementos más relevantes en los ciclos biogeoquímicos. Se ha distinguido su procedencia diferenciando los aportes africanos del resto de lluvias, y en los aportes africanos, las cantidades en forma soluble y en forma particulada. Para  $\text{Na}^{+}$ , S y N la mayor contribución a los aportes anuales proviene de las lluvias no africanas, y la aportación africana (en porcentajes de entre el 5-25%) es principalmente en forma disuelta. En contraste, la aportación africana al total de las entradas anuales es muy importante para  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$  y P, en porcentajes que varían del 60% ( $\text{Ca}^{+2}$ ) al 100% (P). Puesto que estos elementos son nutrientes importantes para las plantas, estos resultados ponen de manifiesto la gran importancia del transporte africano en la aportación de nutrientes para los ecosistemas terrestres. En el caso del  $\text{Ca}^{+2}$ , la aportación africana disuelta y la particulada es parecida, aunque predomina la aportación disuelta. Ello indica la rapidez del proceso de disolución de la calcita en la lluvia. En cambio, la aportación africana de  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$  y P se halla dominada por la parte insoluble. La liberación de  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^{+}$  a partir de los minerales (illita, smectita, palygorskita y dolomita) se produciría por reacciones de meteorización cuyas tasas de ataque serían bajas en comparación al tiempo de formación de la lluvia (Sverdrup, 1990). La suma de las entradas de  $\text{Ca}^{2+}$  en las lluvias de barro, en forma disuelta y particulada fue de  $7.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , mucho mayor que las entradas en forma disuelta por parte de las lluvias no africanas ( $5.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). La cantidad de  $\text{Ca}^{+2}$  depositado en forma particulada fue de  $3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Datos obtenidos en un corte de hielo de un periodo





**Figura 6.** Aportes atmosféricos promedio en el Montseny en el período 1983-1998 (en  $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ). Se desglosa la contribución de las llluvias de barro respecto a la de las otras llluvias, y la aportación soluble y particulada de las llluvias de barro.

de 30 años en el Mont Blanc (Alpes franceses) muestran unas entradas de  $\text{Ca}^{+2}$  en partículas saharianas de  $2.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$  (De Angelis y Gaudichet, 1991), cantidad comparable con la del Montseny a pesar de que el total de polvo depositado en el Mont Blanc para el período 1955-1982 fue unas 5 veces inferior al recibido en el Montseny ( $0.8 \text{ g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ ). La deposición de polvo sahariano en el Mont Blanc es coherente con otros datos de la región: en Colle Gnifetti (Alpes suizos) se ha hallado una deposición de polvo sahariano de  $0.4 \text{ g m}^{-2} \text{año}^{-1}$  (Wagenbach y Geiss, 1989) y en el Massif Central (Francia), la deposición de polvo sahariano se ha estimado en  $1 \text{ g m}^{-2} \text{año}^{-1}$  (Bücher y Lucas, 1984), lo que indicaría una mayor concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  en las partículas atrapadas en el hielo del Mont Blanc.

Para el P, la forma predominante de deposición es por vía particulada en las llluvias de barro. No se detectó P en forma soluble (como ortofosfato soluble) en el agua de lluvia, tanto si era de procedencia africana como de otras procedencias. La deposición media en los 15 años fue de  $0.03 \text{ kg P ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ , con gran variabilidad interanual dependiendo de las cantidades anuales de polvo depositadas. Esta tasa de deposición de P particulado es muy inferior a la calculada para la parte oriental del Mediterráneo, que se sitúa en  $0.2\text{-}0.4 \text{ kg P ha}^{-1} \text{año}^{-1}$  (Newman, 1995). Sin embargo, la deposición de polvo sahariano sobre el Medio Oriente es de  $20\text{-}40 \text{ g m}^{-2} \text{año}^{-1}$  (Ganor y Mamane, 1982) mucho más alta que la que llega a nuestra zona de estudio.

En nuestros análisis mineralógicos no se han identificado minerales que contienen fosfatos. Sin embargo, el fósforo podría estar asociado a la calcita formando apatitos, o también se podría hallar formando complejos con los óxidos de hierro o de aluminio (Schwertmann y Taylor, 1989). En ambos casos, el P estaría en formas altamente insolubles, lo que concuerda con la ausencia de fosfatos solubles en el agua de lluvia.

#### *4.7. Relevancia de las entradas saharianas respecto a la circulación de nutrientes en los encinares del Montseny.*

Los ecólogos terrestres tradicionalmente distinguen entre las entradas de nutrientes derivadas de la aportación atmosférica de los procedentes de la meteorización (Likens et al., 1995; Schlesinger, 1996; Chadwick et al., 1999). La dilucidación de las vías de aportación es importante para saber de donde proceden los recursos necesarios para el crecimiento del bosque y de ello derivar conclusiones para una mejora de la gestión.

En el Montseny el funcionamiento biogeoquímico de los encinares se ha estudiado desde 1983 (Rodà et al., 1999). Estos estudios han permitido realizar un balance entre las entradas y las salidas de nutrientes y evaluar las fuentes de nutrientes que han de satisfacer los requerimientos nutritivos de la vegetación en crecimiento (Àvila, 1988; Escarré et al., 1999). En la tabla 4 se presenta el balance entre entradas atmosféricas y por meteorización de la roca y las salidas por exportación de elementos en el agua de drenaje y por absorción por parte de la vegetación. Para la estima de la meteorización se ha aplicado el método de Barth (1961) modificado (Owens & Watson, 1979; Paces, 1985). Este procedimiento considera que todo el  $\text{Na}^+$  en la exportación neta en el agua de drenaje (exportación en el agua arroyo menos las entradas atmosféricas) procede de la meteorización de la roca, ya que el  $\text{Na}^+$  no es retenido por la vegetación. Conociendo el contenido elemental de los minerales que componen la roca de la cuenca se puede calcular la cantidad total de roca meteorizada y las cantidades de los demás elementos procedentes de la roca, principalmente  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ . La litología de las cuencas estudiadas en el Montseny no parece contener minerales del S y P (Àvila, 1988). Hay que tener en cuenta que el método de Barth implica que todos los minerales se meteorizan en tasas parecidas a las de la albita (mineral del  $\text{Na}^+$ ), lo que probablemente no ocurre. Por otro lado, estas tasas de meteorización se obtienen con la premisa de que el suelo no interfiere (por retención o liberación) entre la producción por meteorización de la roca y la liberación en solución. Así pues, las tasas de meteorización se dan a título indicativo y de forma preliminar. De todos modos, nuestros resultados indican que los aportes atmosféricos de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{+2}$  son pequeños en relación a los procedentes de meteorización o liberación del suelo (tabla 4). En cambio, las entradas atmosféricas de  $\text{Ca}^{+2}$  y P son grandes en relación a lo que produce la cuenca (tabla 4). Puesto que las lluvias saharianas tienen un papel preponderante en la deposición de  $\text{Ca}^{+2}$  y P, la deposición de polvo sahariano tiene una contribución muy relevante en el ciclo biogeoquímico de estos dos nutrientes. Si comparamos los aportes saharianos con las cantidades de nutrientes retenidos anualmente en el incre-

**Tabla 4.** Balance biogeoquímico del encinar de La Castanya (Montseny) para el periodo 1983-1998, en kg ha<sup>-1</sup> y r<sup>-1</sup>. Se dan las entradas atmosféricas observadas y las entradas por meteorización de la roca calculadas por el método de Barth (1961). Se consideran las salidas por exportación en el agua del arroyo de la cuenca de TM9 y por retención en el incremento neto de la biomasa del encinar. Se dan los porcentajes de contribución de los aportes atmosféricos africanos a las entradas atmosféricas totales (A/T) y a las necesidades nutritivas del bosque, representadas por la retención en el incremento neto de la biomasa (A/B).

	Entradas				Salidas		
	Atmosféricas			Meteorización	Incremento neto biomasa <sup>1</sup>		
	Africanas	Totales	A/T		Arroyo	A/B	A/B
Na	1.30	4.44	29.3	14.2	18.3	0.06	2167
K	1.36	2.38	57.1	55.0	1.2	5.0	27.2
Ca	7.53	12.9	58.4	2.8	14.7	16.6	45.4
Mg	1.17	1.94	60.3	18.6	5.7	1.4	83.6
S	0.89	5.89	15.1	–	9.3	– <sup>2</sup>	
P	0.032	0.032	100	–	0	1.0	3.2

1. De Escarré et al. (1999).

2. No se da este valor ya que no se analizó el incremento de S en la biomasa.

mento de la biomasa para los encinares del Montseny, obtenemos que para el K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, y Mg<sup>+2</sup> la aportación africana representa el 27%, 45% y 84 % respectivamente de las necesidades nutritivas (tabla 4).

Nuestros resultados muestran una interconexión ecológica entre sistemas muy distanciados geográficamente. Una dinámica similar, con teleconexiones ecológicas entre África y Sudamérica, ha relacionado la productividad amazónica con el transporte y deposición de nutrientes esenciales (P, Ca<sup>+2</sup> y K<sup>+</sup>) procedentes del Sahara (Reichholf, 1986; Swap et al., 1992).

## Conclusiones

De la información presentada se pueden extraer varias conclusiones: 1) La ocurrencia de lluvias de barro sobre el nordeste peninsular tiene una elevada variabilidad interanual y presenta una marcada estacionalidad, con máxima frecuencia de episodios en primavera y otoño. 2) La cantidad de polvo depositado anualmente presenta aún mayor variabilidad. En promedio, obtenemos una deposición de 4 g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>, para el periodo del 1 de agosto de 1983 al 31 de julio de 1998. 3) Se han identificado 3 áreas-fuente en el norte de África, por orden de importancia: el Atlas marroquí (82% de la deposición), el Sahara occidental (14%) y el Sahara central (4%). 4) La composición mineralógica del polvo presenta diferencias significativas entre áreas-fuente, siendo el material

del Sahara central más rico en esmectita y kaolinita y con menor contenido de cuarzo y dolomita comparado con el de las otras dos regiones. 5) Las lluvias de barro aportaron entre 30-100% de los aportes atmosféricos totales (disueltos más particulados) de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y P. Las únicas entradas atmosféricas detectadas de P han sido en forma particulada en el polvo sahariano. 6) Para  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  los aportes saharianos representan el 27%, 45% y 84%, respectivamente, de las necesidades anuales requeridas para el crecimiento del Montseny.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la CAICYT 2129/83, CICYT AMB92-0349 y los proyectos europeos ENCORE y DM2E. La colaboración del Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca y del Departament de Política Territorial i d'Obres Públiques de la Generalitat de Catalunya ha sido esencial para el desarrollo del trabajo. Agradecemos también la colaboración de M. Alarcón, J. Martín Vide, I. Queralt i F. Rodà.

## Bibliografía

- Arimoto, R.; Duce, R.A.; Ray, B.J.; Ellis, W.G. jr.; Cullen, J.D.; Merrill, J.T. 1995. Trace elements in the atmosphere over the North Atlantic. *J. Geophys. Res.* 100: 1199-1213.
- Arimoto, R.; Ray, B.J.; Lewis, N.F.; Tomza, U. 1997. Mass-particle size distributions of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean. *J. Geophys. Res.* 102: 15867-15874.
- Àvila, A. 1988. Balanç d'aigua i nutrients en una conca d'alzinar al Montseny. *Estudis i Monografies*, 13. Diputació de Barcelona. Barcelona.
- 1996. Time-trends in the precipitation chemistry at a montane site in Northeastern Spain for the period 1983-1994. *Atmos. Environ.* 30: 1363-1373.
- Àvila, A.; Queralt, I.; Alarcón, M. 1997. Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain. *J. Geophys. Res.* 102: 21977-21996.
- Àvila, A.; Alarcón, M.; Queralt, I. 1998. The chemical composition of dust transported in red rains-Its contribution to the biogeochemical cycle of a holm oak forest in Catalonia (Spain). *Atmos. Environ.* 32: 179-191.
- Àvila, A.; Alarcón, M. 1999. Precipitation chemistry and related meteorological situations at a rural site in NE Spain for the period 1983-1994. *Atmos. Environ.* 33: 1663-1677.
- Àvila, A.; Peñuelas, J. 1999. Increasing frequency of Saharan rains over northeastern Spain and its ecological consequences. *Sci. Tot. Env.* 228: 153-156.
- Àvila, A.; Rodà, F. 1991. Red rains as major contributors of alkalinity and nutrients to a holm oak forest in the Montseny mountains. *Orsis* 6: 215-229.
- Barth, T.F.W. 1961. Abundance of the elements, areal averages and geochemical cycles. *Geochim. Cosmochim. Acta* 23: 1-8.
- Bergametti, G.; Gomes, L.; Coudé-Gaussen, G.; Rognon, P.; Le Costumer, M.N. 1989a. African dust observed over Canary Islands: source regions identification and transport pattern for some summer situations. *J. Geophys. Res.* 94: 14855-14864.
- Bergametti, G.; Gomes, L.; Remoudaki, E.; Desbois, M.; Martin, D.; Buat-Menard, P. 1989b. Present transport and deposition patterns of African dusts to the Northwestern Mediterranean. *In: M. Leinen & M. Sarnthein (ed.) Paleoclimatology and Paleometeo-*

- rology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport. Kluwer. Dordrecht. p. 227-252.
- Bücher, A. 1986. Recherches sur les poussières minérales d'origine saharienne. These de Doctorat d'Etat-es Lettres et Sciences Humaines. Université de Reims-Champagne-Ardenne.
- Bücher, A.; Lucas C. 1984. Sédimentation éolienne intercontinentale, poussières sahariennes et géologie. Soc. Nat. Elf-Aquitaine 8: 151-165.
- Bücher, A.; Dubief, J.; Lucas, C. 1983. Retombées estivales de poussières sahariennes sur l'Europe. Rev. Geol. Dyn. Geograph. Phys. 24: 153-165.
- Burt, S. 1991. Falls of dust rain within the British Isles. Weather 46: 347-353.
- Caboi, R.; Cristini, A.; Fanfani, L.; Zuddas, P. 1992. Influence of Saharian dust and marine spray on the chemical composition of rain in Sardinia, Italy. In: Kharaka & Maest (ed.) Water-Rock Interaction. Balkema, Rotterdam.
- Carratalà, A. 1993. Caracterización química de la precipitación en la comunidad valenciana. Distribución temporal y espacial. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.
- Coudé-Gaussen, G.; Rognon, P. 1983. Les poussières Sahariennes. La Recherche 147: 1050-1061.
- Coudé-Gaussen, G.; Rognon, P.; Bergametti, G.; Gomes, L.; Strauss, B.; Gros, J.M.; Le Costumer, M.N. 1987. Saharan dust on Fuerteventura island (Canaries): Chemical and mineralogical characteristics, air mass trajectories and probable sources. J. Geophys. Res. 92: 9753: 9771.
- Chadwick, O.A.; Derry, L.A.; Vitousek, P.M.; Huebert, B.J.; Hedin, L.O. 1999. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. Nature 397: 491-497.
- Chamley, H. 1988. Contribution éolienne à la sédimentation marine au large du Sahara. Bull. Soc. Geol. France. 6: 1091-1100.
- Chester, R.; Nimmo, M.; Alarcón, M.; Corcoran, P. 1991. The chemical character of the north western Mediterranean aerosol. In: J.M. Martin & H. Barth (ed.) Water Pollution Research Report 28 EROS 2000.
- Chester, R.; Nimmo, M.; Keyse, S. 1996. The influence of Saharan and Middle Eastern desert-derived dust on the trace metal composition of Mediterranean aerosols and rainwaters: an overview. In: S. Guerzoni & R.Chester (eds) The Impact of African Dust Across the Mediterranean. Kluwer. Dordrecht. p. 253-273.
- D'Almeida, G. 1986. A model for Saharan dust deposition. J. Clim. Appl. Meteor. 25: 903-916.
- De Angelis, M.; Gaudichet, A. 1991. Saharan dust deposition over Mont Blanc (French Alps) during the last 30 years. Tellus, 43B: 61-75.
- Dessens, J.; Van Dinh, P. 1990. Frequent Saharan dust outbreaks north of the Pyrenées a sign of climate change?. Weather 45: 327-333.
- Dulac, F.; Moulin, C.; Lambert, C.E.; Guillard, F.; Poitou, J.; Guelle, W.; Quétel, C.R.; Schneider, X.; Ezat, U. 1996. Quantitative remote sensing of African dust transport to the Mediterranean. In: S. Guerzoni & R.Chester (ed.) The Impact of African Dust Across the Mediterranean. Kluwer. Dordrecht. p. 25-49.
- Eriksson, E. 1953. Composition of atmospheric precipitation: II Sulfur, chloride and iodine compounds. Tellus 4: 280-303.
- Escarrié, A.; Rodà, F.; Terradas, J.; Mayor, X. 1999. Nutrient distribution and cycling. In: F. Rodà, J. Retana, C. Gracia & J. Bellot (ed.) Ecology of a Mediterranean Evergreen Oak Forests. Springer. Berlin. p. 253-269.

- FAO. 1976. Carte Mondiale des Sols. Volume VI. Afrique. Organisation des Nation Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Paris.
- Franzén, L.G.; Hjelmoors, M.; Kallberg, P.; Brorström-Lundén, E.; Juntto, S.; Savolainen, A. 1994. The «yellow snow» episode of Northern Fennoscandia, March 1991- A case study of long-distance transport of soil, pollen and stable organic compounds. *Atmos. Environ.* 22: 3587-3604.
- Ganor, E.; Mamane, Y. 1982. Transport of Saharan dust across the eastern Mediterranean. *Atmos. Environ.* 16: 581-587.
- Guerzoni, S.; Cristini, A.; Caboi, R.; LeBolloch, O.; Marras, I.; Rundeddu, L. 1995. Ionic composition of rainwater and atmospheric aerosols in Sardinia, Southern Mediterranean. *Water, Air and Soil Poll.* 85: 2077-2082.
- Hedin, L.O.; Armesto, J.J.; Johnson, A.H. 1995. Patterns of nutrient loss from unpolluted, old growth temperate forests: evaluation of biogeochemical theory. *Ecology* 76: 493-509.
- Hereter, A.; Sánchez, J.R. 1999. Experimental areas of Prades and Montseny. In: F. Rodà, J. Retana, C. Gracia & J. Bellot (ed.) *Ecology of a Mediterranean Evergreen Oak Forests*. Springer. Berlin. p. 253-269.
- Hutchinson, T.C.; Havas, M. (ed.) 1980. *Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems*. Plenum Press. New York.
- Jaenicke, R.; Schütz, L. 1978. Studien oberen Grenzgröße des natürlichen aerosoles. *Contr. Atmos. Phys.* 40: 129-143.
- LeBolloch, O.; Guerzoni, S.; Molinaroli, E. 1996. Atmosphere-ocean mass fluxes at two coastal sites in Sardinia. In: S. Guerzoni & R. Chester (ed.) *The Impact of African Dust Across the Mediterranean*. Kluwer. Dordrecht. p. 217-222.
- Levin, Z.; Ganor, E. 1996. The effects of desert particles on cloud and rain formation in the eastern Mediterranean. In: S. Guerzoni & R. Chester (ed.) *The Impact of African Dust Across the Mediterranean*. Kluwer. Dordrecht. p. 77-86.
- Likens, G.E.; Bormann, F.H.; Pierce, R.S.; Eaton, J.S.; Johnson N.M. 1995. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. 2nd. Edition. Springer. New York.
- Loye-Pilot, M.D.; Martin, J.M.; Morelli, J. 1986. Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature* 321: 427-428.
- Loye Pilot, M.D.; Martin, J.M. 1996. Saharan dust input to the western Mediterranean: an eleven year record in Corsica. In: S. Guerzoni & R. Chester (ed.) *The Impact of African Dust Across the Mediterranean*. Kluwer. Dordrecht. p. 191-199.
- Martín Vide, J.; Llasat, C. 1991. Las lluvias de barro: análisis estadístico de una serie de 43 años en Barcelona. *Geographicalia* 28: 161-173.
- Martín Vide, J.; Moreno, C. 1985. Les pluges de fang a Barcelona. *Rev. Cat. Geograf.* 1: 60-70.
- Morales, C. (ed.) 1979. *Saharan Dust: Mobilization, Transport, Deposition*. John Wiley. New York.
- Newman, E.I. 1995. Phosphorus inputs to terrestrial ecosystems. *J. Ecol.* 83: 713-726.
- OMM. 1956. *Atlas Internacional de Nubes*. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra.
- Owens, L.B.; Watson, J.P. 1979. Rates of weathering and soil formation on granite in Rhodesia. *Soil. Sci. Soc. Am J.* 43: 160-166.
- Paces, T. 1985. Sources of acidification in Central Europe estimated from elemental budgets in small basins. *Nature*, 315: 31-36.
- Pardillo, F. 1932. Les pluges de pols del 30 d'octubre de 1926 i del 27 de novembre de 1930 a Catalunya. I. Estudi mineralògic. *Serv. Meteorol. Catalunya. Notes Estud.* 50: 35-64.
- Prodi, F.; Fea, G. 1979. A case of transport and deposition of Saharan dust over the Italian peninsula and Southern Europe. *J. Geophys. Res.* 84: 6951-6960.

- Prospero, J.M.; Nees, R.T.; Uematsu, M. 1987. Deposition rate of particulate and dissolved aluminum derived from Saharan dust in precipitation at Miami, Florida. *J. Geophys. Res.* 92: 14723-14731.
- Prospero, J.M. 1996. Saharan dust transport over the north Atlantic ocean and the Mediterranean: an overview. *In: S. Guerzoni & R. Chester (ed.) The Impact of African Dust Across the Mediterranean.* Kluwer. Dordrecht. p. 133-151.
- Prospero, J.M.; Carlson, T.N. 1972. Vertical and areal distribution of Saharan dust over the western equatorial North Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.* 77: 5255-5265.
- Queralt-Mitjans, I.; Domingo, F.; Solé, A. 1993. The influence of local sources on the mineral content of bulk deposition over an altitudinal gradient in the Filabres range. *J. Geophys. Res.* 98: 17671-16768.
- Quereda, J.; Olcina, J.; Montón, E. 1996. Red dust rain within the Spanish Mediterranean area. *Climatic Change*, 32: 215-228.
- Reiff, J.; Forbes, G.S.; Spieksma, F.T.M.; Reynders, J.J. 1986. African dust reaching Northwestern Europe: A case study to verify trajectory calculations. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 25: 1543-1567.
- Reichhoff, J.H. 1986. Is Saharan dust a major source of nutrients for the Amazonian rain forest? *Stud. Neotropical Fauna & Env.* 21: 251-255.
- Roda, F.; Bellot, J.; Àvila, A.; Escarré, A.; Piñol, J.; Terradas, J. 1993. Saharan dust and the atmospheric inputs of elements and alkalinity to mediterranean ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution* 66: 277-288.
- Roda, F.; Retana, J.; Gracia, C.; Bellot, J. (ed.) 1999. *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests.* Springer. Berlin.
- Sequeira, R. 1993. On the large-scale impact of arid dust on precipitation chemistry of the continental northern hemisphere. *Atmos. Environ.* 16: 329-335.
- Semb, A.; Hanssen, J.E.; Francois, F.; Maenhaut, W.; Pacyna, J.M. 1995. Long range transport and deposition of mineral matter as a source for base cations. *Water, Air, Soil Poll.* 85: 1933-1995.
- Schlesinger, W. 1996. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change.* 2nd. Edition. Academic Press. San Diego.
- Schwertmann, U.; Taylor, R.M. 1989. Iron oxides. *In: J.B. Dixon and S.B. Weed (ed.) Minerals in Soil Environments.* 2nd. Edition. Madison. Wisconsin.
- Sverdrup, H. 1990. *The Kinetics of Base Cation Release due to Chemical Weathering.* Lund University Press.
- Swap, R.; Garstang, M.; Greco, S.; Talbot, R.; Kallberg, P. 1992. Saharan dust in the Amazon basin. *Tellus* 44B: 133-149.
- Taylor, S.R. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust. A new table. *Geochim. Cosmochim. Acta* 28: 1237-1285.
- Tegen, I.; Fung, I. 1995. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land source modification. *J. Geophys. Res.* 100: 18707-18726.
- Wagenbach, D.; Geis, K. 1989. The mineral dust record in a high alpine glacier (Colle Gnifetti, Swiss Alps). *In: M. Leinen & M. Sarnthein (ed.) Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport.* Kluwer. Dordrecht. p. 543-564.
- Wheeler, D.A. 1986. The meteorological background to the fall of Saharan dust, November 1984. *The Meteor. Magazine* 115: 1-9.
- Yaalon, D.H.; Ganor, E. 1979. East Mediterranean trajectories of dust carrying storms from the Sahara and Sinai. *In: Morales C. (ed.) Saharan Dust: Mobilization, Transport, Deposition.* John Wiley. New York. p. 187-193.