

El material pulverulento resultante de la meteorización de las rocas corticales puede viajar grandes distancias y acumularse en regiones en las que, como en el norte de África, pueden ser resuspendidos y dispersados sobre superficies de centenares de miles de kilómetros cuadrados. El alcance de la dispersión así como la magnitud de su concentración es función de diversos factores, de entre los que destacan la meteorología y la estacionalidad. La granulometría de las partículas transportadas varía mucho en función del área fuente y de la distancia respecto del foco emisor. De igual modo, su composición es también función del área fuente pero también intervienen aspectos tales como el fraccionamiento granulométrico o la reactividad respecto de los gases y agua atmosférica y con otras sustancias particuladas. Los minerales más frecuentes son, en general, los silicatos (minerales de la arcilla y cuarzo) aunque no son infrecuentes los carbonatos, fosfatos, sulfatos, cloruros y los óxidos e hidróxidos de hierro. Acompañando a los minerales, también suelen formar parte del material particulado los esqueletos de diatomeas, polen, esporas, virus y bacterias. Existe un gran número de estudios epidemiológicos recientes en los que se muestra la influencia negativa sobre la salud de la exposición al material particulado atmosférico: Asma, en el caso de las fracciones más gruesas, y afecciones del sistema respiratorio y cardiovascular, en el de las más finas.

Dusty material originating from the meteorization of crustal rocks can travel long distances and accumulate in regions where, like in the case of the northern part of Africa, it can be resuspended and dispersed over surfaces in excess of hundreds of thousands of square kilometers. The scope of dispersion as well as the magnitude of its concentration depends on a series of factors, being the most relevant meteorology and stationality. The grain size of windblown desert particles is sensitive to the corresponding source area and to the distance to the originating center. Moreover, its composition depends also on the source area but there are additional factors like the grain size fractionation or the reactivity with respect to atmospheric gasses, water and other particles. The minerals more often present among the particulate materials are silicates (clay minerals and quartz) although carbonates, phosphates, sulfates, chlorides and iron oxides and oxyhydroxides are not infrequent. Diatom skeletons, pollen, spore, virus and bacteria are more or less frequent companions of the mineral fraction. There are a great number of recent epidemiological studies where it is shown the negative health effect of the exposition to the atmospheric particulate material: Asthma, the case of the coarse-grained fraction, and affections over the respiratory and cardiovascular system, in the case of the fine-grained fraction.

Impacto de las Emisiones Desérticas de Polvo Africano sobre la Calidad del Aire en España

/ XAVIER QUEROL CARCELLER (1) / ANDRÉS ALASTUEY URÓS (1) / SONIA CASTILLO FERNÁNDEZ (1)
/ SILVIA ALONSO PÉREZ (1) / EMILIO CUEVAS AGULLÓ (2) / SERGIO RODRÍGUEZ GONZÁLEZ (2,3)

(1) Instituto de Ciencias de la Tierra 'Jaume Almera', CSIC. C/ Lluis Solé Sabarís, s/n. 08028 Barcelona

(2) Observatorio de Izaña, Instituto Nacional de Meteorología, Montaña de Izaña. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife

(3) Departamento de Geología. Universidad de Huelva. Campus de El Carmen. 21071 Huelva.

INTRODUCCIÓN

Desde antiguo es conocido que el material cortical (o de la corteza terrestre) norteafricano (acumulado en las zonas desérticas en el norte de África) es transportado a larga distancia, reduciendo notablemente la visibilidad y alterando significativamente la composición de las precipitaciones. Las lluvias y nevadas rojas registradas en multitud de zonas de Europa por procesos de lavado de masas de aire africanas son ampliamente conocidas, y la reducción de visibilidad en zonas del atlántico ecuatorial debido al polvo norteafricano ha sido bien documentada desde hace siglos. Ya en el siglo XIX algunas zonas del atlántico eran conocidas como "mar oscuro" por los navegantes (Darwin, 1845; Ehrenberg, 1862).

Según la evaluación de 2001 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), a escala global, la fracción mineral es el componente mayoritario del aerosol atmosférico (partículas en suspensión). Alrededor

de 3000 millones de toneladas de este material están continuamente flotando en la atmósfera.

El transporte atmosférico del material particulado (PM) procedente de la erosión de los materiales de la corteza terrestre requiere de procesos previos de resuspensión masiva de polvo en zonas áridas, como las presentes en el Norte de África, Oriente próximo o Asia central. En otras zonas desérticas, como en el desierto de Atacama o los desiertos de Australia, estos procesos de resuspensión de polvo y su transporte a larga distancia son de mucha menor importancia. Las áreas exportadoras de partículas minerales tienen como característica común el acumular grandes cantidades de PM crustal de granulometría muy fina (del orden 10^{-1} - 10^2 μm), debido a la erosión de zonas áridas en épocas de lluvia torrencial. En la estación seca este material fino queda expuesto a los procesos de resuspensión.

El Norte de África posee vastas zonas

desérticas donde la lluvia es extremadamente escasa: entre 1 día de lluvia por 100 días a 2 días con lluvia por 1000 días, según desiertos. Estos ambientes de humedad relativa extremadamente baja (~10%) y temperaturas estivales junto al suelo muy altas (60° - 65°C) son escenarios muy favorables para la resuspensión masiva de grandes cantidades de PM. El calentamiento de la superficie durante el día provoca fuertes turbulencias térmicas verticales (que alcanzan altitudes de varios kilómetros) seguidos de periodos de gran estabilidad inducidas por las inversiones térmicas nocturnas. Esta alternancia retarda la sedimentación de las partículas previamente resuspendidas e inyectadas en capas altas, y así alcancen periodos de residencia atmosférica relativamente largos (de hasta 2 semanas). Los continuos procesos de inyecciones de partículas tienen como consecuencia que determinadas regiones del Sur del Sahara y Sahel, y del Sahara occidental en verano, queden cubiertas por la denominada "niebla o bruma seca".

palabras clave:

Material particulado, polvo del desierto, mineralogía, efectos sobre la salud

key words:

Particulated material, windblown desert dust, mineralogy, health effects

Este escenario constituye una fuente muy importante de emisiones de PM crustal, que es posteriormente transportado a largas distancias.

TRANSPORTE DE POLVO NORTEAFRICANO

El transporte de polvo norteafricano hacia el Atlántico Norte tropical y subtropical está asociado a procesos de escala sinóptica y presenta una marcada estacionalidad. Los vientos de componente Este en la baja troposfera libre (por encima de unos 2000 m de altura) sobre el Noroeste de África y el océano Atlántico a latitudes tropicales favorecen el transporte hacia el continente americano. Por el contrario, las intrusiones de polvo norteafricano en el Sur de Europa se producen con menor frecuencia, y están asociadas a situaciones meteorológicas muy específicas (Rodríguez et al., 2001).

Este transporte se produce sobre océanos y continentes principalmente en la troposfera libre, aunque en áreas cercanas al foco emisor la capa límite (capa atmosférica más cercana al suelo) se ve también afectada en determinadas épocas del año. La extensión vertical de la capa de polvo generalmente se desarrolla entre 1 y 4,5 km de altura. El transporte a larga distancia (3000 a 4000 km) se ve favorecido en la troposfera libre por dos factores. El primero es el aumento de la velocidad del viento con la altura, y el segundo es la menor incidencia en altura de los procesos de lavado de las masas de aire por precipitación.

La granulometría de las partículas transportadas por estos procesos varía mucho en función del área fuente (en el caso de el norte de África; los desiertos del Sahel o del Sahara) y de la situación del área receptora respecto al foco emisor. Así, en episodios de transporte de partículas hacia el continente americano, la moda granulométrica dominante es la de acumulación (0,1-1,0 µm), debido a la segregación por deposición de las partículas de mayor tamaño. Sin embargo, los episodios saharianos registrados en el Mediterráneo en verano, o en Canarias en la época invernal, suelen afectar mayoritariamente a la fracción gruesa (1-25 µm). En un caso o en otro es evidente que el parámetro de medida de la calidad del aire en lo referente a partículas en suspensión fijado por la Comisión Europea (PM₁₀, o partículas inferiores a 10 micrómetros, Directiva 1999/30/CE) se ve afectado por estos aportes de material particulado crustal.

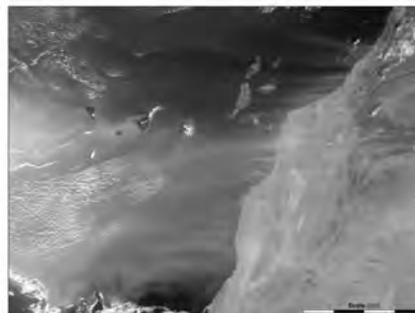
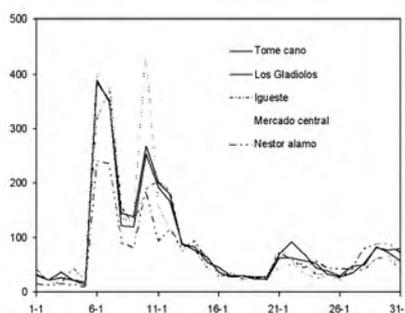


fig 1. Superior: Dos imágenes de Santa Cruz de Tenerife tomadas el 6 de enero de 2002 y una semana más tarde en el mismo lugar y a la misma hora, observándose la gran reducción de visibilidad ocasionada por las partículas en suspensión. Inferior izquierda: Los niveles de PM₁₀ (partículas inferiores a 10 µm) registrados en las redes de calidad del aire del Gobierno de Canarias superaron puntualmente los 400 µg/m³ como media diaria, pero durante un período de 9 a 10 días superaron ampliamente el límite diario de la directiva Europea (1999/30/CE) de 50 µg/m³. Inferior derecha: Imagen satélite facilitada por SeaWiFS Project, NASA GSF y ORBIMAGE, mostrando el episodio de transporte de partículas africanas el 7 de enero de 2002.

En zonas próximas al foco emisor, como el archipiélago canario, los episodios de transporte pueden llegar a ser observados a simple vista ('calimas'). La figura 1 muestra una imagen satélite del SeaWiFS Project-NASA que muestra claramente la extensión y la influencia de la nube de polvo del Sahara sobre Canarias el 7 de enero de 2002. El episodio se inició el día anterior por la tarde. Las fotografías tomadas en Santa Cruz de Tenerife la tarde del 6 de enero y en el mismo lugar una semana más tarde indican la tremenda reducción de la visibilidad como consecuencia de las altísimas concentraciones de partículas gruesas en suspensión. Los niveles de PM₁₀ registrados por las redes de control de calidad del aire del Gobierno de Canarias superaron puntualmente los 400 µg/m³ como media diaria, pero durante un período de 9 a 10 días superaron ampliamente el límite diario de la Directiva Europea 1999/30/CE de 50 µg/m³.

En zonas más alejadas del foco emisor, los procesos de dispersión de la pluma y la mezcla con emisiones locales, dificulta la detección de los episodios, y su impacto en las series locales de registros de niveles de PM₁₀, sean tan evidentes como en el caso expuesto anteriormente.

METEOROLOGÍA Y TRANSPORTE DE POLVO

La fenomenología de los procesos meteorológicos y la frecuencia estacio-

nal del transporte de polvo norteafricano hacia Europa y Canarias se puede resumir en los siguientes tipos de escenarios:

FINALES DE OTOÑO - INICIO INVIERNO:

En esta época la mayor actividad de tormentas de polvo tiene lugar en las cercanías de Bilma (18°N 12°E en Níger) y Faya Lagueau (18°N 19°E en Chad; Kalu, 1979), regiones próximas a la zona de convergencia inter-tropical (ZCIT), región donde se localiza el ecuador térmico y en donde tienen lugar intensos procesos convectivos debido al enorme calentamiento del suelo. En esta época del año la ZCIT se localiza entre 3°N y 12°N. La figura 2 muestra la distribución del índice de aerosoles TOMS-NASA para el periodo octubre-noviembre de 1999, 2000 y 2001, respectivamente. Se puede observar para cada año cómo la región con altas concentraciones de polvo se localiza en bajas latitudes, en regiones muy alejadas de la Península Ibérica y Canarias. En este periodo la concentración de aerosoles atmosféricos es relativamente baja si se compara con los otros dos periodos definidos (figura 2). Sin embargo, bajo determinadas situaciones meteorológicas se pueden producir eventos de resuspensión masiva de PM en el Sahara y Norte de Argelia, afectando a Canarias ó la Península Ibérica. En esta época del año los escasos episodios africanos suelen ir acompañados de lluvia, produciendo lo que se conocen como 'lluvias de barro rojo'.

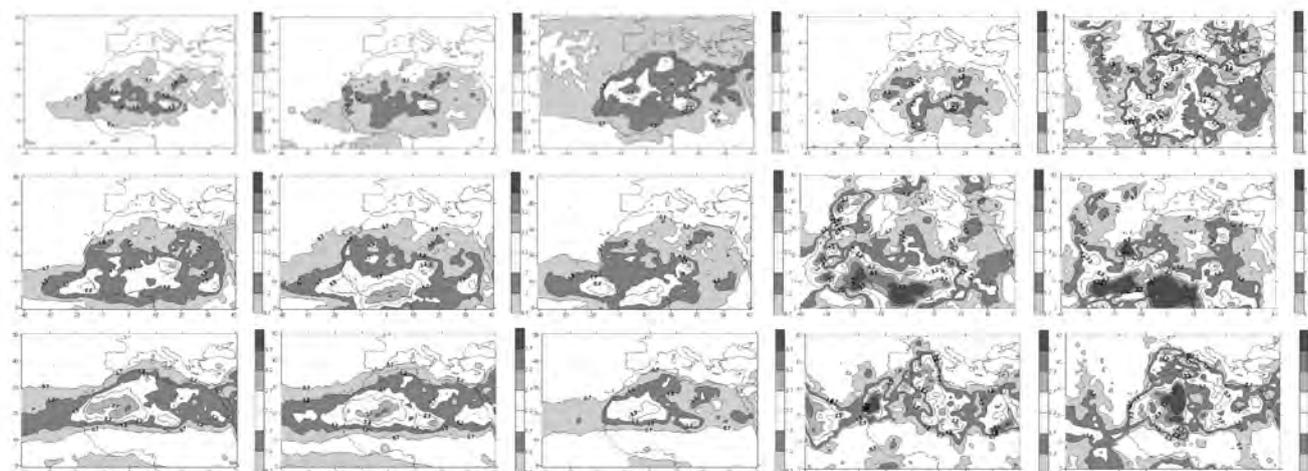


fig. 2. Mapa de distribución de índice de aerosoles (AI) del TOMS (NASA). *Primera fila:* promedios de los meses de octubre y noviembre para los años 1999, 2000 y 2001, y distribución de AI para el 24/10/2000 y el 25/11/2001. *Segunda fila:* promedios de los meses de febrero y marzo para los años 1999, 2000 y 2001, y distribución de AI para el 04/03/1997 y el 09/03/1998. *Tercera fila:* promedios de los meses de agosto y septiembre para los años 1999, 2000 y 2001, y distribución de AI para el 01/09/1998 y el 25/08/1999.

INVIERNO – INICIO PRIMAVERA: Se desarrollan episodios de inyección vertical muy intensos sobre el desierto del Sahel, al sur del Sahara, (ver figura 2), donde el análisis meteorológico evidencia valores mínimos de humedad relativa en esta época del año. La ZCIT se sitúa mucho más al Norte respecto a Noviembre (en torno a los 10°N), provocando la formación de chimeneas cargadas de partículas que se elevan hasta la troposfera libre por encima de la capa de mezcla continental. Una vez inyectadas en la troposfera libre, las masas de aire con altos niveles de partículas son frecuentemente transportadas hacia Canarias (figura 3). Durante este periodo son también muy frecuentes las intrusiones de polvo Africano sobre el Este de la Península Ibérica causadas por la ubicación de una depresión al Oeste de Portugal (Figura 4; Rodríguez et al., 2001). En ocasiones la pluma de polvo alcanza también el Norte de la Península bajo este mismo escenario. Un mecanismo adicional de transporte de polvo es el causado por una situación anticiclónica sobre la Península Ibérica y el Norte de África. Este tipo de episodio se produce con mayor frecuencia en Febrero y/o Marzo. En estos escenarios la masa cargada con polvo entra en el Atlántico por la costa del Sahel, viaja hacia el norte pasando por Canarias hasta alcanzar el Norte de la Península Ibérica. La circulación anticiclónica da lugar a la formación de un arco atlántico de polvo muy definido (ver los eventos de 04/03/1997 y 09/03/1998). Aunque este tipo de episodios anticiclónicos se observa con menor frecuencia (1-2 por año) que los causados por depresiones al Oeste de Portugal (6-9 por año), éstos representan el mecanis-

mo más importante de transporte de polvo hacia el Cantábrico, y dan lugar a superaciones de los valores límites de PM_{10} en las redes de calidad del aire del Norte peninsular y Canarias.

FINALES DE PRIMAVERA – VERANO: En esta época del año se registra un intenso calentamiento de la superficie terrestre sobre el Sahara que provoca la formación de la baja térmica norteafricana y el desarrollo de intensos procesos de inyección vertical de partículas. Una vez inyectadas en la troposfera libre, las masas de aire con altos niveles de partículas son transportadas hacia el Atlántico, pasando sobre Canarias y alcanzando el Caribe y Florida. Bajo determinados escenarios meteorológicos estas masas cargadas de polvo son transportadas hacia la Península Ibérica. Según Rodríguez et al. (2001) las invasiones de polvo sobre la Península Ibérica se producen cuando el anticiclón típicamente ubicado sobre Argelia en altura (figura 5) da lugar a vientos de componente Sur sobre el Norte de África y la Península Ibérica. La ubicación de una depresión, o vaguada, al Oeste de Portugal refuerza el transporte hacia la Península Ibérica en algunos episodios. La figura 2 muestra que en esta época del año (promedios de los meses de agosto-septiembre para los años 1999, 2000 y 2001) las regiones con alto contenido de aerosoles se localizan mucho más al norte, en comparación con los escenarios anteriores. En esta misma figura se muestran dos episodios (09/08/1999 y 01/09/1998) en los que se observan altas concentraciones de aerosoles sobre el norte de África transportándose hacia el Mediterráneo y la Península Ibérica. En estos casos no se desarro-

llan plumas tan definidas como en invierno, sino que las masas de aire se desplazan en dirección norte, pudiendo llegar a cubrir la totalidad de la Península Ibérica.

Los episodios de primavera suelen ir acompañados de precipitación y causar con frecuencia episodios de 'lluvias fango'. En verano los Episodios anticiclónicos aportan el polvo a través de Andalucía, desde donde se desplaza en dirección Norte, y con mayor frecuencia en direcciones Noreste.

Es bien conocido que en los periodos glaciares de la evolución de la Tierra, la variación estacional latitudinal de la ZCIT se reduce a una estrecha franja ecuatorial con un incremento asociado de las precipitaciones. Sin embargo en los periodos interglaciares (o templados), este rango latitudinal estacional de la ZCIT alcanza latitudes muy septentrionales, con la consiguiente diferenciación estacional en cuanto a precipitaciones (Pfefferkorn, 1995). Este segundo escenario podría ser responsable del incremento de eventos de transporte a larga distancia de masas de aire africano sobre Europa. Por otro lado, Prospero y Nees (1986) muestran que las concentraciones de polvo sobre Barbados se incrementaron repentinamente a partir de 1970, justo cuando se registró una intensa y persistente sequía sobre el Sahel, y también que las concentraciones más altas de polvo atmosférico sucedieron a principios de los ochenta cuando esta sequía fue especialmente severa. Por todo lo anterior, una tendencia positiva en la frecuencia anual de intrusiones africanas sobre la Península Ibérica podría ser indicador de una tendencia de cambio

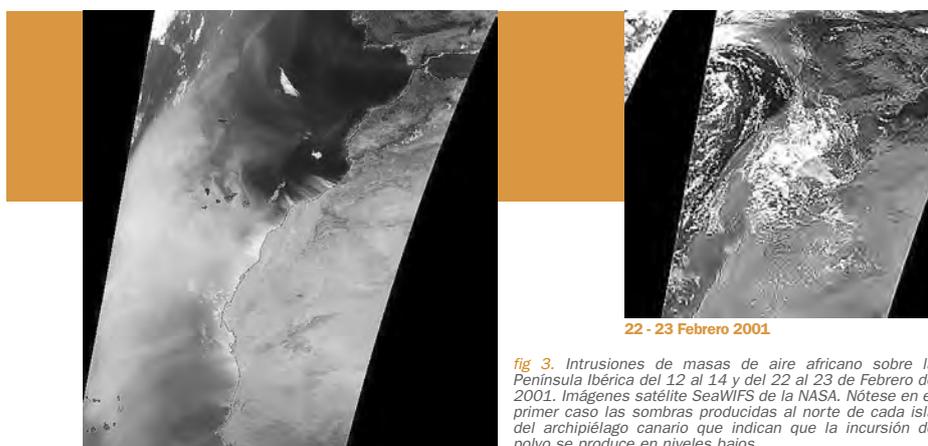


fig 3. Intrusiones de masas de aire africano sobre la Península Ibérica del 12 al 14 y del 22 al 23 de Febrero de 2001. Imágenes satélite SeaWiFS de la NASA. Nótese en el primer caso las sombras producidas al norte de cada isla del archipiélago canario que indican que la incursión de polvo se produce en niveles bajos.

11 - 12 Febrero 2001

22 - 23 Febrero 2001

está constituida por una mezcla de silicatos, como son los minerales de la arcilla y el cuarzo (figura 6). Los granos de cuarzo suelen presentar morfologías redondeadas o angulosas (típicas de la erosión eólica). Los minerales de la arcilla más frecuentes son illita y caolinita, aunque también se pueden identificar otros tipos de arcillas como paligorskita, esmectita y clorita. Las arcillas pueden estar presentes como grandes cristales laminares (>10 µm) o en agregados de microcristales (aprox. 1 µm).

Además de estos minerales mayoritarios también se identifica la presencia, feldespatos y carbonatos, sulfatos, fosfatos, sales, óxidos e hidróxidos de hierro y trazas de minerales pesados como piroxenos y anfíboles. Existe una gradación en función de la latitud de la composición mineralógica del material particulado emitido en el Norte de África que puede ser de utilidad para identificar el área fuente del material atmosférico. De manera simplificada, las zonas Norte y Centro del Sahara se caracterizan por un alto contenido en carbonatos (calcita y dolomita, 20-50%) y un mayor contenido relativo de arcillas de tipo illita, clorita, paligorskita y montmorillonita. Por el contrario, la zona Sur del Sahara y el Sahel se caracteriza por un contenido menor de carbonatos, siendo las arcillas predominantes la caolinita y la montmorillonita y disminuyendo el contenido en illita y clorita. Además de estas partículas minerales se suelen identificar partículas de diatomeas constituidas por esqueletos de sílice, como las del género *Melosira* (M.A. Bárcenas, com. pers.), una diatomea actual de agua dulce muy frecuente en lagos efímeros del Norte de África (figura 6).

climático hacia el calentamiento global.

COMPOSICIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO

La composición del material particulado atmosférico mineral de origen desértico dependerá, entre otros factores, de las

características geológicas del área fuente y de los procesos físico-químicos que tengan lugar durante el transporte (segregación granulométrica, reacción con otros compuestos particulados, gases o con agua atmosférica).

En general, la materia mineral desértica

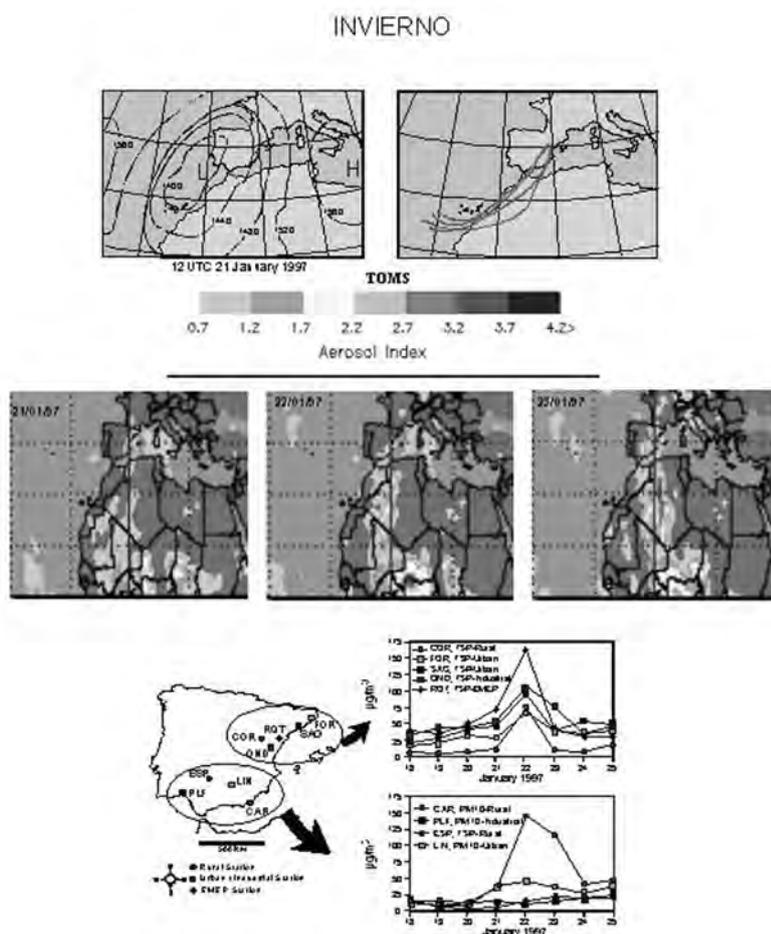


fig 4. Ejemplos de episodios de intrusión de masas de aire africanas, inducidos por bajas presiones, con impacto en los niveles de partículas registrados en las redes de control de calidad del aire del Este de la Península Ibérica. Superior: Mapa de presiones mostrando la borrasca frente al Cabo de San Vicente con las retrotrayectorias calculadas, indicando aporte sahariano. Medio: Mapas de distribución de índice de aerosoles TOMS de la NASA reflejando las plumas de las intrusiones. Inferior: Niveles de partículas registradas en diferentes estaciones mostrando incrementos sincrónicos con las intrusiones. Basados en Rodríguez et al. (2001).

Otro tipo de material particulado asociado al polvo sahariano es el material biogénico, como pueden ser fragmentos vegetales, polen, esporas, o virus y bacterias. Diferentes trabajos han demostrado el transporte de numerosos microorganismos desde el Norte de África hasta la zona del Caribe (Griffin et al., 2001).

Durante el transporte a larga distancia de este material de origen mineral, tienen lugar un proceso de segregación granulométrica que resulta en la deposición preferencial de las fracciones gruesas y en una clasificación mineralógica. En zonas alejadas del área fuente, el material atmosférico de origen norteafricano se caracteriza por una granulometría progresivamente más fina, con diámetro <2,5 µm, y por un incremento en

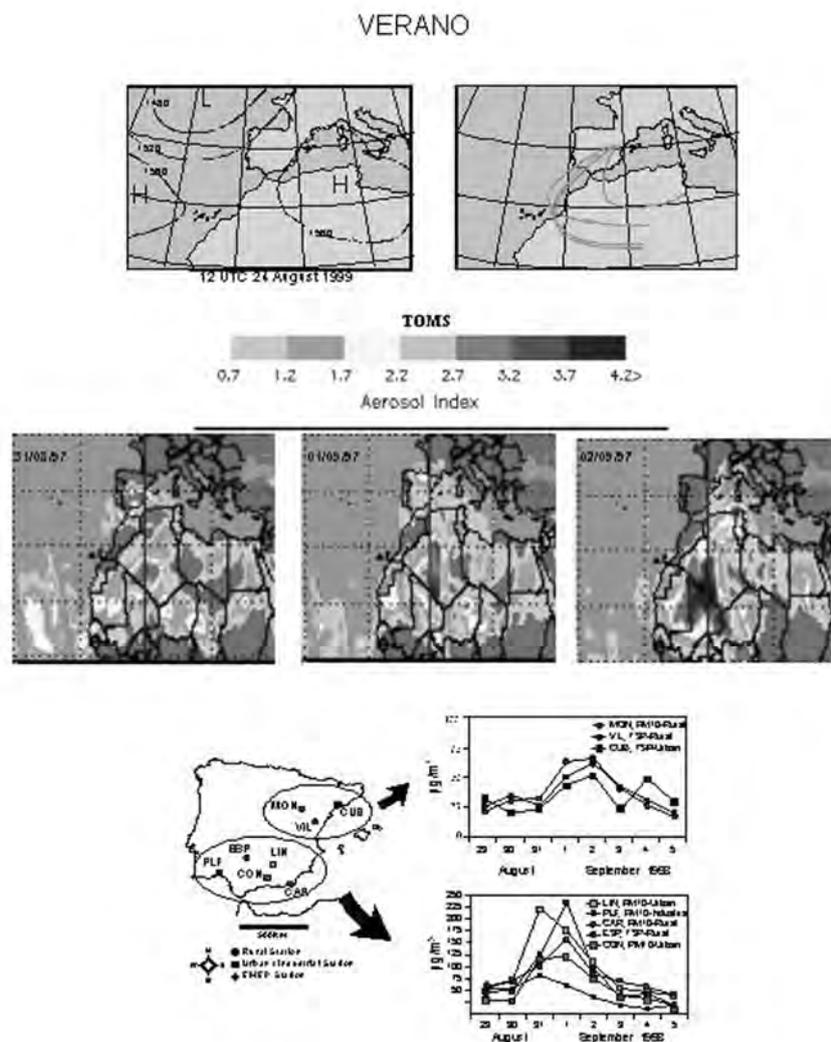


fig 5. Ejemplos de episodios de intrusión de masas de aire africanas, inducidos por el anticiclón norte-africano en altura, con impacto en los niveles de partículas registradas en las redes de control de calidad del aire del Este de la Península Ibérica. Superior: Mapa de presiones mostrando el anticiclón sobre Argelia con las retrotrayectorias calculadas, indicando aporte sahariano. Medio: Mapas de distribución de índice de aerosoles TOMS de la NASA reflejando las plumas de las intrusiones. Inferior: Niveles de partículas registradas en diferentes estaciones mostrando incrementos sincrónicos con las intrusiones. Basados en Rodríguez et al. (2001).

la proporción relativa de arcillas. Durante el transporte, las partículas minerales pueden interactuar con gases o con otras partículas de origen natural, como el aerosol marino, o de origen mayoritariamente antropogénico, como el material carbonoso o los sulfatos secundarios. Las partículas minerales pueden actuar como superficies activas favoreciendo las reacciones químicas entre los compuestos atmosféricos, y por tanto la formación de nuevas partículas secundarias, modificando la partición entre las fases gaseosa y particulada (figura 6).

IMPACTO DEL MATERIAL PARTICULADO SOBRE LA SALUD Y EL CLIMA

Los importantes y frecuentes aportes de material particulado atmosférico del

Norte de África pueden tener un impacto considerable en dos aspectos de gran relevancia y actualidad como son la salud y el cambio climático. Las partículas naturales, como las partículas minerales y el aerosol marino, pueden jugar un papel muy importantes en la atmósfera, teniendo una gran influencia en las propiedades físico-químicas de la troposfera y en los ciclos biogeoquímicos. La cantidad de partículas atmosféricas suspendidas en la atmósfera y su posterior depósito en la superficie terrestre y océanos están en gran parte controlados por procesos climáticos. No obstante, la presencia de partículas en la atmósfera también puede afectar al clima mediante la participación de estas en el balance radiativo terrestre, de modo que se puede producir la reacción o retroalimentación clima-partícula. Por otro lado, las partículas suministran nutrientes que

contribuyen al desarrollo del plancton, los cuales a su vez actúan como fijadores de nitrógeno y carbono.

Los aerosoles naturales pueden dispersar o absorber la radiación solar y terrestre, y por tanto pueden influir en el balance radiativo de la atmósfera. Las propiedades radiativas del material particulado dependen de la concentración, del tamaño y la composición química de las partículas. En general, la materia mineral, al igual que los compuestos sulfatados, dispersa la radiación solar, produciendo un enfriamiento atmosférico, o un forzamiento radiativo negativo. Por otra parte, determinados compuestos particulados como el carbono elemental o la hematitas (óxido de hierro III), puede incrementar la absorción de las longitudes de onda corta (principalmente del espectro visible) resultando en el calentamiento atmosférico. Además de estos efectos directos, estas partículas, pueden actuar como núcleos de condensación, y por lo tanto jugar un papel crucial en la formación de nubes, e indirectamente en sus efectos radiativos. Actualmente existe una gran incertidumbre sobre la magnitud del forzamiento positivo o negativo del material particulado. El forzamiento radiativo de la material particulado emitido en las zonas tropicales y subtropicales de África, en el hemisferio norte, puede tener una gran importancia tanto a escala regional como global. Ello se debe no sólo a la gran cantidad de material mineral emitido, sino también a su contenido en óxidos de hierro y a las emisiones de partículas carbonosas por la quema de biomasa en la zona del Sahel.

Numerosos estudios epidemiológicos recientes han puesto de manifiesto una clara relación entre la exposición al material particulado atmosférico y efectos adversos sobre la salud. Estos estudios demuestran que incrementos de las concentraciones de las partículas finas ($<2,5 \mu\text{m}$) en aire ambiente pueden provocar daños en el sistema respiratorio y cardiovascular. No obstante, las partículas gruesas, de diámetro $>2,5 \mu\text{m}$, como es el caso de la mayor parte de la carga de partículas minerales de origen desértico, pueden tener una influencia decisiva en el desarrollo de enfermedades de las vías respiratorias superiores, como puede ser el asma. Estas patologías pueden tener una gran importancia en el archipiélago canario, e incluso en el sector Sur de la Península Ibérica donde, debido a su proximidad al continente africano, los aportes de polvo de origen sahariano son muy intensos y frecuentes a lo largo del año.

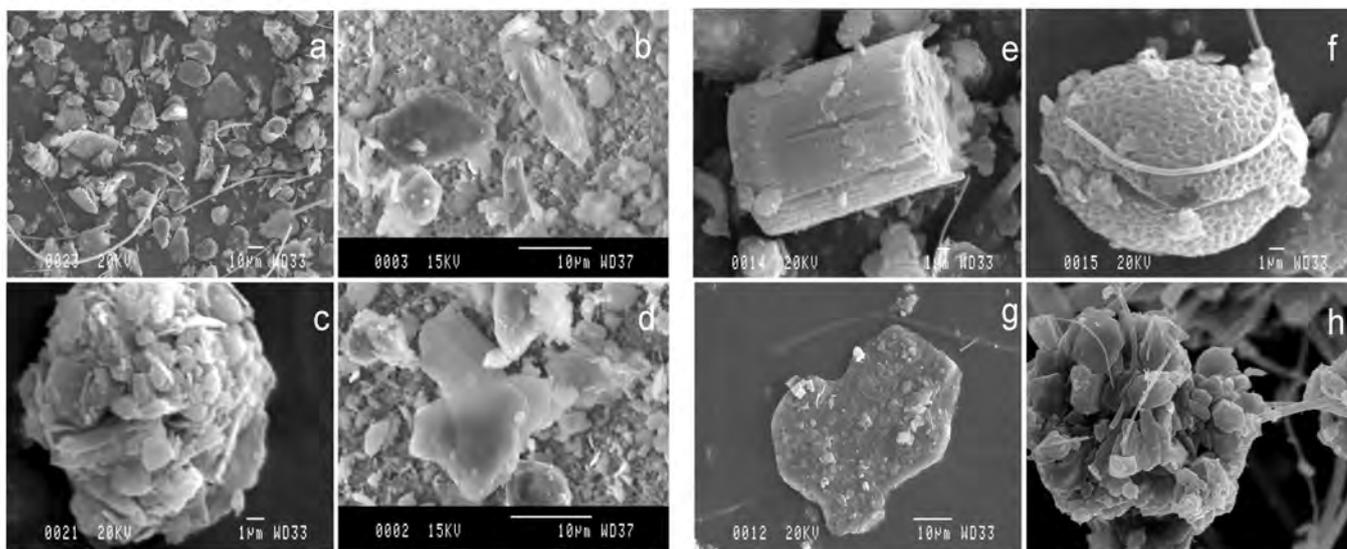


fig 6. Microfotografías obtenidas con microscopía electrónica de barrido de material particulado en suspensión de origen sahariano recogido en Izaña (a-f) y Sta. Cruz (g-h) el 29 de julio de 2002. a) aspecto general del material particulado mineral; b) fragmentos angulosos de cuarzo; c) agregados de microcristales de arcillas; d) cristales laminares de arcilla; e) esqueletos de sílice de diatomeas del genero *Melosira*; f) polen; g) arcilla de origen sahariano con partículas de aerosol marino; h) agregados de microcristales de arcilla asociados a cristales de sulfato cálcico de neoformación resultado de la interacción de las partículas minerales y los productos de oxidación del SO₂.

TENDENCIAS ACTUALES DE INVESTIGACIÓN EN ESTE CAMPO

Como podemos observar el interés que suscitan las invasiones de masas de aire africanas con altos contenidos de partículas es multidisciplinar. Su estudio constituirá una línea de investigación prioritaria, sin duda alguna, en los futuros programas de I+D tanto nacionales como de la Unión Europea y de los Estados Unidos.

El interés científico por las variaciones registradas en el transporte de las masas de aire africanas con altas concentraciones de partículas, como indicador de cambio climático, o por los cambios fisico-químicos en función de su área de origen no es el más importante, ni mucho menos. Los aerosoles atmosféricos, y principalmente los procedentes de los desiertos, constituyen hoy día la incertidumbre más importante en el enorme rompecabezas de los procesos de calentamiento/enfriamiento de la atmósfera, es decir, en lo que se conoce como forzamiento radiativo. Por otro lado estas masas de aire constituyen una fuente de contaminación natural "foránea" que puede incrementar en órdenes de magnitud la concentración de partículas sobre una región. Se producen, además, complejos e interesantes procesos de interacción entre la contaminación antrópica local o regional y las partículas de polvo. Ni que decir tiene la importancia que tienen estos procesos en la calidad del aire y en la salud, desencadenando problemas

respiratorios y crisis alérgicas. Un aspecto que está empezando a cobrar un gran interés en estos momentos es el material biológico (incluso microorganismos) que con frecuencia acompaña al material particulado (utiliza en algunos casos las partículas para transportarse). Se ha demostrado que parte de este material es patógeno o produce efectos negativos sobre determinadas especies vegetales.

AGRADECIMIENTOS

Gran parte de los trabajos han sido financiados por un convenio de colaboración entre la Dirección General de Calidad Ambiental de Ministerio de Medio Ambiente, el INM y el CSIC y por proyecto del Ministerio de Educación y Ciencia (CGL2004-05984_C07-02/CLI) y a la Dra. M.A. Bárcenas por la identificación de la diatomea *Melosita*. Los autores agradecen al Gobierno de Canarias por el suministro de datos de niveles de concentración de PM.

REFERENCIAS

Darwin, C. (1845) *An account of the fine dust which often falls on vessels in the Atlantic Ocean*, Q.J. Geol. Soc. London 2, p. 26-30.

Ehrenberg, C.G. (1862) *Erläuterungen eines neuen wirklichen Passatstaubes aus dem atlantischen Dunkelmeere vom 29 Okt. 1861*. Monatsber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss., Berlin, p. 202-224.

Griffin, D.W., Garrison, V.H., Herman, J.R., & Shin E.A. (2001) *African desert dust in the Caribbean atmosphere: Microbiology and public health*. *Aerobiología* 17, p. 203-213.

IPCC (2001) *Climate change 2001: The scientific basis*, Cambridge University Press.

Pfefferkorn, H.W. (1995) *We are temperate climate chauvinists?*. *Palaios* 10, p. 389-391.

Prospero, J.M., & Nees, R.T. (1986) *Impact of the North African drought and El Niño on mineral dust in Barbados trade winds*. *Nature* 320, p. 735-738.

Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G. & Kakaliagou, O. (2001) *Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in Southern and E. Spain*. *Atmospheric Environment* 35, p. 2433-2447.