

**Figura 1. Índice de Aerosol (unidades adimensionales) medio de Julio de 2008. Datos generados por el espectrómetro OMI (Ozone Monitor Instrument) a bordo del satélite Aura. Imagen obtenida mediante Giovanni Analysis Tool de NASA. Círculo rojo indica la ubicación de la estación de Vigilancia Atmosférica Global de Izaña (Tenerife).**

# Polvo Sahariano

## MEDIO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES INDUSTRIALES NORTEAFRICANOS

**SERGIO RODRÍGUEZ<sup>1</sup>, ANDRÉS ALASTUEY<sup>2</sup>, SILVIA ALONSO-PÉREZ<sup>1,2</sup>, XAVIER QUEROL<sup>2</sup>, EMILIO CUEVAS<sup>1</sup>, JAVIER ABREU-AFONSO<sup>1</sup>, MAR VIANA<sup>2</sup>, NOEMÍ PÉREZ<sup>2</sup>, MARCO PANDOLFI<sup>2</sup>, JESÚS DE LA ROSA<sup>3</sup>**

*La presencia de polvo desértico en suspensión en la atmosfera influye en procesos que afectan al clima (balance radiativo, ciclo hidrológico, productividad marina y ciclo del carbono) y a la calidad del aire (efectos en la salud). En este trabajo presentamos un estudio sobre composición del polvo Sahariano basado en datos experimentales tomados en la estación de Vigilancia Atmosférica Global de Izaña (Tenerife). Los resultados muestran que el polvo desértico norteafricano está muy frecuentemente mezclado con especies de origen antropogénico, tales como sulfato, nitrato y amonio. Se ha obtenido que una parte muy importante de estas especies tiene su origen en las emisiones industriales (refino de petróleo, industrias de fertilizantes, e industria química) de Marruecos, Argelia y Túnez. La mezcla de polvo desértico con contaminantes solubles en agua (como el sulfato, nitrato o amonio) modifica las propiedades fisicoquímicas del polvo y esto puede modular la forma en la que el polvo influye en el clima. La evolución futura de las emisiones de contaminantes en estos países norteafricanos puede dar lugar a cambios significativos en la forma en la que el polvo Sahariano interacciona con procesos que modulan el clima.*

**1.** CENTRO DE INVESTIGACIÓN ATMOSFÉRICA DE IZAÑA, AEMET, UNIDAD ASOCIADA AL CSIC "ESTUDIOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA", LA MARINA, 20, PLANTA 6, 38071, SANTA CRUZ DE TENERIFE

**2.** INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL AGUA Y DIAGNÓSTICO AMBIENTAL (ID/EA), CSIC, JORDI GIRONA, 18-26, 08034, BARCELONA

**3.** UNIVERSIDAD DE HUELVA, UNIDAD ASOCIADA AL CSIC "CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA", CAMPUS EL CARMEN, 21071, HUELVA

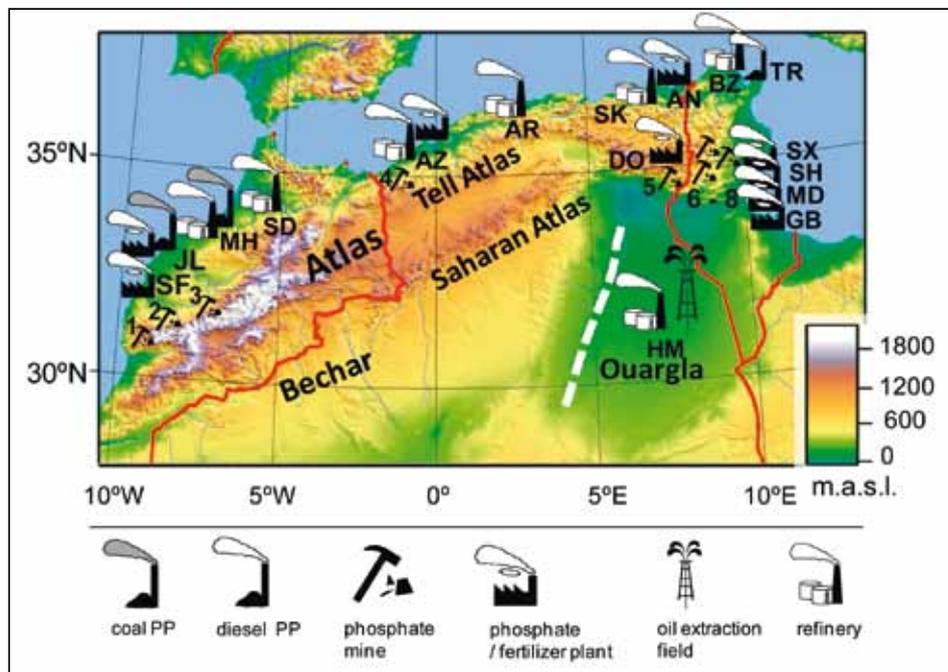
## 1. Introducción

El Norte de África es la mayor fuente de materia mineral (polvo) suspendida en la atmósfera. Sus emisiones se estiman entre 300 y 1600 Tg/año, y representan entre el 60 y 70% de las emisiones globales de materia mineral (Ginoux et al., 2004). El polvo Norteafricano es mayoritariamente exportado hacia el Atlántico Norte (Figura 1). Durante determinados episodios alcanza Europa.

El polvo juega un papel relevante en determinados procesos que afectan al clima. La presencia de polvo afecta a la distribución de energía en la atmósfera, debido a que éste dispersa y absorbe la radiación solar. Además, las partículas de polvo pueden hacer de núcleos de condensación, y en consecuencia pueden afectar a los patrones de precipitación impactando en el ciclo hidrológico. Algunos elementos traza presentes en el polvo (como el hierro y el fósforo) participan en procesos biogeoquímicos que influyen en la producción primaria marina y que pueden, en consecuencia, actuar en el ciclo del carbono. Finalmente, la presencia de polvo puede también afectar a la calidad del aire y a la salud. Durante episodios de polvo Sahariano se ha observado un aumento en las tasas de mortandad en Madrid y Barcelona (Pérez et al., 2008; Jiménez et al., 2010).

Numerosos estudios realizados en la última década en Canarias, Cabo Verde, Puerto Rico y Barbados (ver la revisión realizada por Rodríguez et al., 2011) han documentado que el polvo Sahariano está frecuentemente mezclado con contaminantes tales como sulfato o nitrato. Se ha sugerido que estos contaminantes son originarios de Europa (Kallos et al., 2007).

El objetivo de este trabajo es identificar el origen de algunos de los contaminantes que vienen mezclados con el polvo Sahariano, tales como el sulfato, el nitrato y el amonio. La mezcla de estas especies con el polvo desértico



**Figura 2.** Ubicación de las áreas industriales en Marruecos, Argelia y Túnez. PP: central térmica. SF (Safi, planta de fertilizantes, fosfato amónico y ácido fosfórico), JL (Jorf Lasfer, planta de fertilizantes, fosfato amónico y ácido fosfórico y central térmica), MH (Mohammedia, refinería y central térmica), SD (Sidi Kassem, refinería), AZ (Arzew, planta de fertilizantes y refinería), AR (Argel, refinería), SK (Skikda, refinería), AN (Anabas, planta de fertilizantes), BZ (Bizerte, refinería), TR (Rades, central térmica), SX (Sfax, planta de fertilizantes y ácido fosfórico), SH (Skhira, planta de ácido fosfórico), MD (M'dhilla, planta de fertilizantes) and GB (planta de fertilizantes, ácido fosfórico y nitrato amónico).

puede influir en la forma en la que éste participa en procesos relacionados con el clima. Por ejemplo, el recubrimiento del polvo con sales de sulfato y nitrato puede aumentar la solubilidad del polvo, y en consecuencia la capacidad de éste para dispersar la luz y actuar como núcleo de condensación.

## 2. Metodología

### 2.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Este trabajo se basa en datos experimentales de composición química de partículas PM10 y PM2.5 (diámetro aerodinámico < 10 y 2.5  $\mu\text{m}$ ) tomados en el Observatorio de Izaña. Esta estación de Vigilancia Atmosférica Global se encuentra en Tenerife (Canarias), a 2400 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). Las 203 muestras de PM10 y 275 muestras de PM2.5 analizadas en este traba-

jo se tomaron en filtros de microfibra de cuarzo mediante captadores de alto volumen entre 2005 y 2008. Las muestras fueron analizadas mediante diversas técnicas analíticas (Querol et al., 2001) que permitieron determinar las concentraciones de elementos mayores (ICP-AES: Al, Ca, K, Na, Mg y Fe) y traza (IPC-MS: P, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr y Cd entre otros), sales (cromatografía iónica y electrodo específico: sulfato, nitrato, amonio y cloruro) y carbono orgánico y carbono elemental (reflectancia termo óptica).

### 2.2 FUENTES DE POLVO Y ESPECIES ANTROPOGÉNICAS

La ubicación geográfica de las fuentes de polvo y de especies antropogénicas se realizó mediante el análisis e interpretación de los gráficos de 'Medias de Concentraciones en Receptor'

# Polvo Sahariano

## MEDIO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES INDUSTRIALES NORTEAFRICANOS

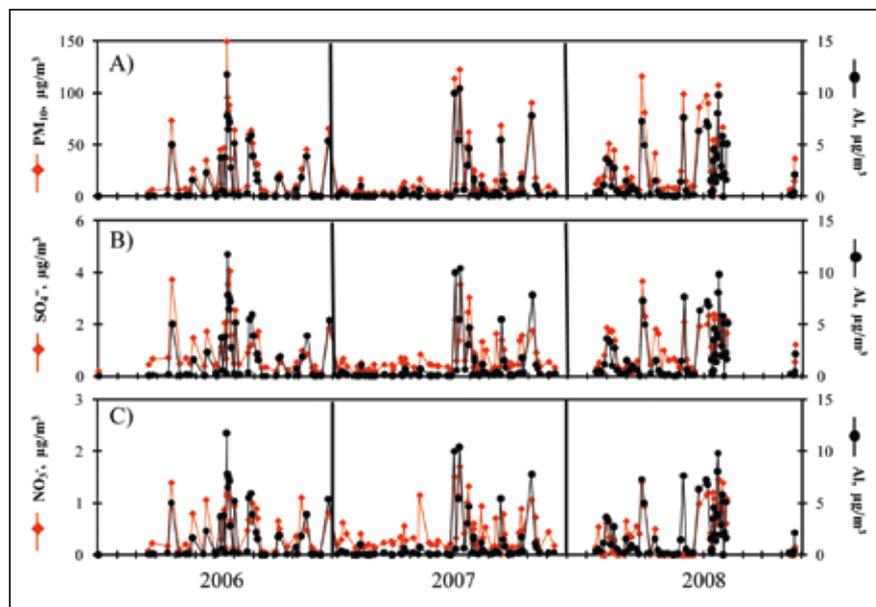


Figura 3. Concentraciones de PM10, aluminio, sulfato y nitrato en Izaña.

(MCAR; Figura 5). El algoritmo MCAR está descrito en detalle por Rodríguez et al. (2011). Los gráficos MCAR fueron determinados mediante retrotraectorias calculadas mediante el software Hysplit (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>; Figura 4B). Los gráficos MCAR muestran la mediana de las concentraciones (de la especie química en cuestión) medida en el lugar de muestreo (Izaña en este caso) cuando las masas de aire han pasado por cada pixel  $1^\circ \times 1^\circ$  de las regiones de las que el aire ha circulado antes de llegar al lugar destino (receptor).

Los gráficos MCAR fueron interpretados utilizando diversas fuentes de información: i) Servicio Geológico de Estados Unidos, ii) información online, y iii) Google Earth y Google Map. Los focos industriales identificados en el Norte de África se muestran en la Figura 2.

## 3. Resultados

### 3.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

La Figura 3A muestra las concentraciones de PM10 y aluminio (Al) registradas en Izaña. El Al es usado como trazador del polvo desértico (arcillas).

Durante la inmensa mayoría del año las concentraciones de PM10 son bajas ( $1 - 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), debido a las condiciones de aire limpio en la troposfera libre. Los aumentos en las concentraciones de PM10 se deben a las oleadas de polvo Sahariano, las cuales explican los aumentos simultáneos de Al. Estos episodios tienen lugar principalmente en verano (Figura 4A). Las concentraciones de sulfato, nitrato y amonio son también bajas en condiciones de troposfera libre, mientras que muestran valores altos tan solo durante episodios de polvo Sahariano. Un análisis de balance iónico entre estos tres contaminantes muestra que:

- La presencia de nitrato amónico no es significativa. El nitrato se encuentra principalmente como nitrato cálcico en la fracción gruesa (partículas  $> 2.5 \mu\text{m}$ ), debido al recubrimiento de las partículas de polvo por nitrato (por ejemplo, por reacción del ácido nítrico antropogénico con carbonato cálcico).

- El sulfato se encuentra en dos formas. Como sulfato amónico, principalmente en la fracción fina ( $< 2.5 \mu\text{m}$ ), y como sulfato no amónico, principalmente en la fracción gruesa ( $2.5 - 10$

$\mu\text{m}$ ). El sulfato amónico se forma a partir de precursores gaseosos generalmente ligados a emisiones antropogénicas ( $\text{SO}_2$  y  $\text{NH}_3$ ), mientras que el sulfato no amónico puede tener un origen diverso: recubrimiento de partículas de polvo por sulfato antropogénico, yeso mineral natural (sulfato cálcico del suelo) y otro tipo de evaporitas. Los resultados obtenidos muestran que el  $\sim 30\%$  y entre el 37-56% del sulfato presente en PM10 y PM2.5 es sulfato amónico, respectivamente.

### 3.2 REGIONES FUENTE

La Figura 5A muestra las concentraciones medianas en receptor (gráfico MCAR) para el aluminio. Se puede ver como las concentraciones más altas aparecen en:

- Regiones ubicadas al Sur del Atlas. El análisis de las imágenes de satélite, muestra que esta región presenta un elevado número de barranco que convergen en depresiones topográficas donde se acumula gran cantidad de depósitos fluviales, principalmente arc-

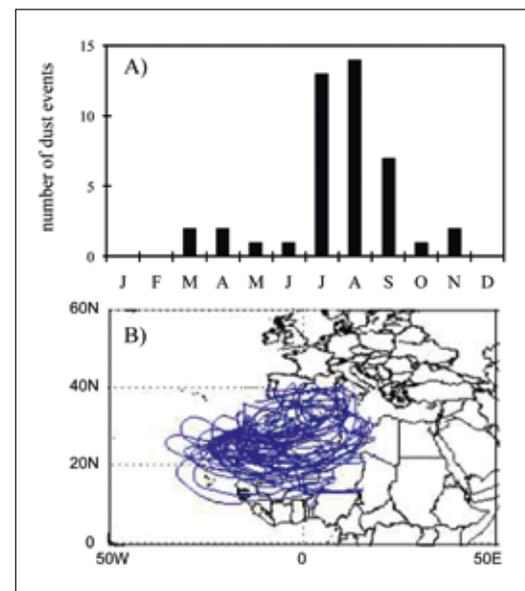


Figura 4. Episodios de polvo con concentraciones  $> 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ : A) frecuencia y B) trayectorias de masas de aire asociadas a estos episodios.

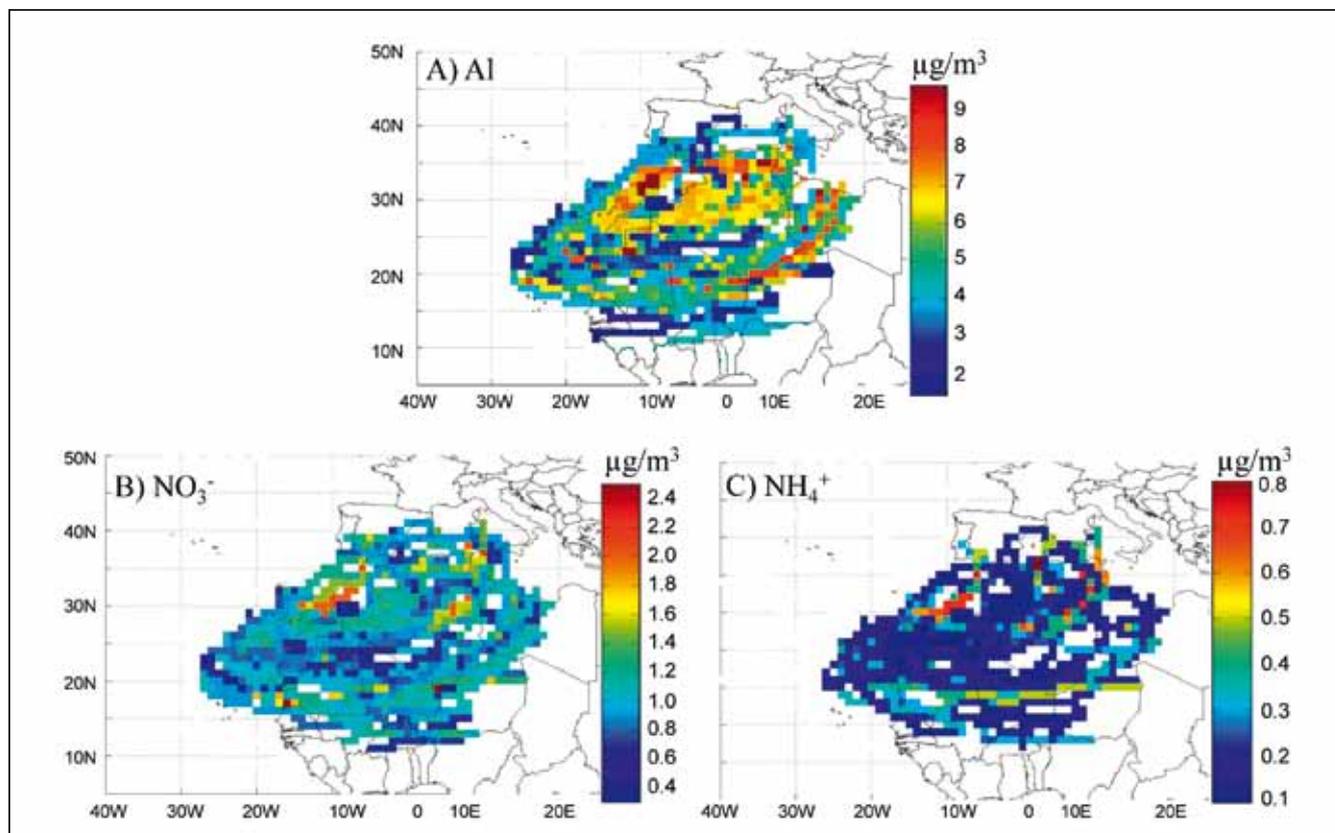


Figura 5. Mediana de concentraciones en receptor (MCAR) para Aluminio, nitrato y amonio (en  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

llas. La acción del viento (generalmente en verano con el régimen de alisios) da lugar a altas tasas de emisiones de polvo (Figuras 1 y 4A) en esta región. Las partes más bajas de las laderas del Atlas son probablemente el origen de la mayor parte de muestras de polvo Sahariano tomadas en el Observatorio de Izaña.

● Costa Atlántica de Marruecos. Esta región contribuyen con menor frecuencia, aunque su intensidad puede, puntualmente, ser importante. En esta región hay un gran número de minas de fosfato a cielo abierto, por lo que a una buena parte del polvo se le puede atribuir un origen antropogénico.

Las Figuras 5B y 5C muestran las concentraciones de nitrato y amonio (ligadas al sulfato amónico) medidas en Izaña cuando el aire ha pasado sobre cada una de las regiones ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) del Norte de África. Estos contaminantes muestran altas concentraciones ( $>1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de nitrato y  $>0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de amonio) cuando el aire ha pasado sobre regiones en

las que tienen lugar emisiones industriales. Cabe destacar:

- Costa Atlántica de Marruecos, donde se encuentra las refinarias de Sidi Kassem ( $34.233^\circ \text{N}$ ,  $5.718^\circ \text{W}$ , 30000 barriles por día) y Mohammedia ( $33.686^\circ \text{N}$ ,  $7.426^\circ \text{W}$ ; 125 000 bpd), las centrales térmicas de carbón de Mohammedia ( $33.682^\circ \text{N}$ ,  $7.434^\circ \text{W}$ ; 600 Mw) y o Jorf Lasfar ( $33.105^\circ \text{N}$ ,  $8.637^\circ \text{W}$ ; 1,400Mw), y la planta de producción de fertilizantes (ácido fosfórico y fosfato amónico) de Jorf Lasfer ( $33.111^\circ \text{N}$ ,  $8.606^\circ \text{W}$ ) y Safi ( $32.222^\circ \text{N}$ ,  $9.249^\circ \text{W}$ ). La Figura 6A muestra una fotografía de Safi.

- Este de Argelia, sobre Hassi Mesahoud ( $31.670^\circ \text{N}$ ,  $6.070^\circ \text{E}$ ), donde se encuentra el mayor campo de extracción de crudo de África y dos refinarias de petróleo (30000 bpd). Las Figuras 6B y 6C muestran fotografías de esta zona en las que se pueden apreciar los penachos.

- Norte de Argelia y Túnez, donde se encuentran las refinarias de Arzew ( $35.811^\circ \text{N}$ ,  $0.265^\circ \text{W}$ ; 60000 bpd), Argel

( $36.760^\circ \text{N}$ ,  $3.066^\circ \text{E}$ ; 60000 bpd), Skikda ( $36.879^\circ \text{N}$ ,  $6.945^\circ \text{E}$ ; 300000 bpd) y Bizerte ( $36.800^\circ \text{N}$ ,  $10.290^\circ \text{E}$ ; 35000 bpd), la planta petroquímica y de producción de ácido fosfórico de Annaba ( $36.871^\circ \text{N}$ ,  $7.765^\circ \text{E}$ ), y la central térmica de Rades ( $36.799^\circ \text{N}$ ,  $10.286^\circ \text{E}$ ).

## 5. Conclusiones

El análisis químico de muestras de polvo Sahariano tomadas en la estación de Vigilancia Atmosférica Global de Izaña (Tenerife) pone de manifiesto que el polvo desértico norteafricano está muy frecuentemente mezclado con especies de origen antropogénico (contaminantes atmosféricos en fase aerosol). Estudios previos habían sugerido que estos contaminantes podían ser originarios de Europa, y que alcanzaban el Norte de África vía transporte por el Mediterráneo. El análisis de los datos tomados en Izaña mediante herramientas meteorológicas, como los gráficos de concentraciones medianas en receptor, pone

# Polvo Sahariano

## MEDIO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES INDUSTRIALES NORTEAFRICANOS

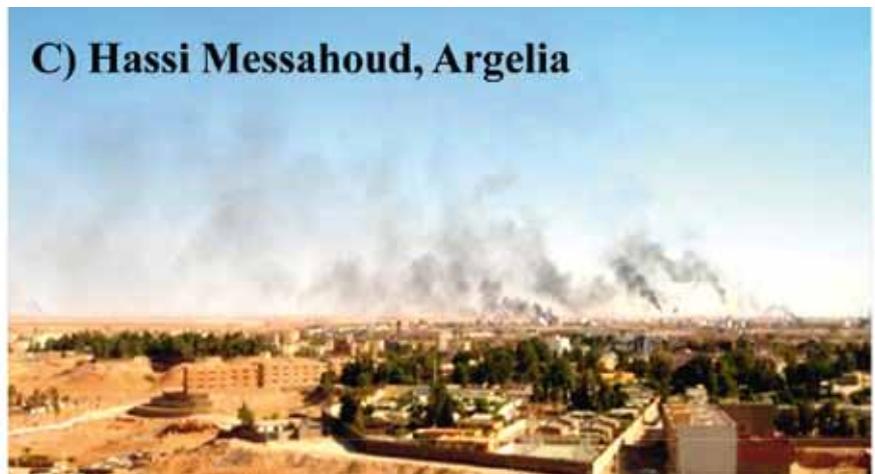
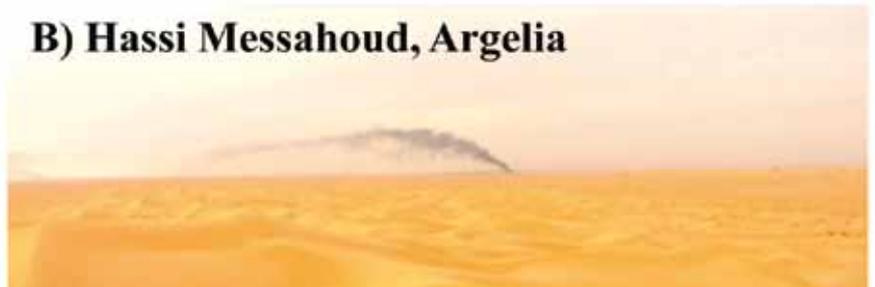
de manifiesto que especies antropogénicas como el sulfato, nitrato y amonio, presentan altas concentraciones en la capa de aire sahariano, cuando el aire ha fluido sobre regiones de Marruecos, Argelia y Túnez donde tienen lugar importantes emisiones de contaminantes ligadas a actividades de refinado de petróleo, industria petroquímica, producción de fertilizantes (incluyendo ácido fosfórico y fosfato amónico) y producción de energía eléctrica en centrales térmicas. Esta mezcla del polvo desértico con especies antropogénicas solubles puede influir en la forma en la que el polvo Sahariano influye en procesos que afectan al clima (balance radiativo, ciclo hidrológico y productividad marina) y a la calidad del aire.

## 6. Agradecimientos

Este estudio ha sido realizado en el marco del programa de Vigilancia Atmosférica Global (financiado por AEMET) y en el marco de los proyectos de investigación POLLINDUST (CGL2011-26259; Ministerio de Ciencia e Innovación), GRACCIE (CSD2007-00067; Ministerio de Ciencia e Innovación), CARIATI (CGL2008-06294/CLI; Ministerio de Ciencia e Innovación), AER-REG (P07-RNM-03125; Consejería de Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía) y REDMAAS (CGL2010-11095-E; Ministerio de Ciencia e Innovación).

## Referencias

- Ginoux, P., Prospero, J. M., Torres, O., and Chin, M.: Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation, *Environ. Modell. Softw.*, 19, 113-128, 2004
- Jiménez, E., Linares, C., Martínez, D., and Díaz, J.: Role of Saharan dust in the relationship between particulate matter and short-term daily mortality among the elderly in Madrid (Spain), *Sci. Total Environ.*, 408(23), 5729-5736, 2010.
- Kallos, G., Astitha, M., Katsafados, P., Spyrou, C., Long-Range Transport of Anthropogenically and Naturally Produced Particulate Matter in the Mediterranean and North Atlantic: Current State of Knowledge. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 1230-1251, 2007.
- Pérez, L., Tobias, A., Querol, X., Künzli, N., Pey, J., Alastuey, A., Viana, M., Valero, N., González-Cabré, M., and Sunyer, J.: Coarse Particles From Saharan Dust and Daily Mortality, *Epidemiology*, 19(6), 800-807, 2008.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Plana, F., Mantilla, E., Ruiz, C. R.: Monitoring of PM10 and PM2.5 around primary particulate anthropogenic emission sources, *Atmos. Environ.*, 35, 845-858, 2001.
- Rodríguez, S., Alastuey, A., Alonso-Pérez, S., Querol, X., Cuevas, E., Abreu-Afonso, J., Viana, M., Pérez, N., Pandolfi, M., de la Rosa, J., Transport of desert dust mixed with North African industrial pollutants in the subtropical Saharan Air Layer. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 6663-6685, 2011



**A) Industria de Fosfato, SAFI, Marruecos**

**B) Hassi Messahoud, Argelia**

**C) Hassi Messahoud, Argelia**

Figura 6. Fotografías de zonas industriales: A) SAFI (Marruecos) y B-C) Hassi Messahoud (Argelia).