

# DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE POLVO MINERAL ATMOSFÉRICO EN EL NORTE DE ÁFRICA Y ORIENTE MEDIO ESTIMADA A PARTIR DE LA VISIBILIDAD HORIZONTAL

E. Terradellas<sup>(1)</sup>, C. Camino<sup>(2)</sup>, S. Alonso-Perez<sup>(3)</sup>, S. Basart<sup>(4)</sup>, J.M.Baldasano<sup>(5)</sup>, E. Cuevas<sup>(6)</sup>

<sup>(1)</sup> AEMET, Barcelona, [eterradellasj@aemet.es](mailto:eterradellasj@aemet.es)

<sup>(2)</sup> AEMET, CIAI, Santa Cruz de Tenerife, [ccaminog@aemet.es](mailto:ccaminog@aemet.es)

<sup>(3)</sup> IDAEA (CISC), Barcelona. AEMET, CIAI, Santa Cruz de Tenerife, [salonsop@aemet.es](mailto:salonsop@aemet.es)

<sup>(4)</sup> BSC-CNS, Barcelona, [sara.basart@bsc.es](mailto:sara.basart@bsc.es)

<sup>(5)</sup> BSC-CNS, Barcelona, UPC, Barcelona [jose.baldasano@bsc.es](mailto:jose.baldasano@bsc.es)

<sup>(6)</sup> AEMET, CIAI, Santa Cruz de Tenerife, [ecuevasa@aemet.es](mailto:ecuevasa@aemet.es)

## Resumen

El polvo mineral atmosférico desempeña un papel muy importante en la atmósfera por su interacción con el balance radiativo y con la microfísica de nubes. África Septentrional es la mayor fuente de polvo mineral en el mundo. Sin embargo, carece de sistemas de observación desde tierra adecuados y la información desde satélite es muy limitada debido a la alta reflectividad del suelo. Por ello, se valora la posibilidad de usar la visibilidad horizontal observada en las estaciones meteorológicas como una forma indirecta de estimar el contenido de polvo en la atmósfera al nivel de la superficie. En este trabajo se utilizan observaciones de visibilidad para analizar la distribución geográfica de polvo mineral en África Septentrional y Oriente Medio, así como su variabilidad estacional. Posteriormente, se estudia la relación entre visibilidad y la concentración de partículas y se halla una relación empírica entre ambas magnitudes que es comparada con otras relaciones similares deducidas por otros autores.

## Introducción

El polvo mineral atmosférico desempeña un papel muy importante en la atmósfera. Modifica el balance radiativo de manera directa, debido a sus propiedades de absorción y dispersión de la radiación (Alpert et al., 2000), y de manera indirecta, por su influencia en el tipo, características y tiempo de vida de las nubes. Influye en la microfísica de las nubes por la capacidad que tienen las partículas de polvo de actuar como núcleos de condensación (Levin et al., 1996). Por otra parte, el polvo mineral afecta a los ciclos biogeoquímicos, provocando cambios en la productividad de ecosistemas marinos y terrestres (Jickells et al., 2005; Mahowald et al., 2005). Tiene un impacto negativo en la salud humana, pudiendo causar problemas infecciosos, respiratorios y

cardiovasculares (Thomson et al., 2005; Pérez et al., 2011; Domínguez-Rodríguez et al., 2011). Finalmente, desde el punto de vista económico, produce también efectos negativos, que están relacionados sobre todo con la reducción de la visibilidad y afectan especialmente al sector del transporte.

África Septentrional es la mayor fuente de polvo mineral en el mundo (Engelstaedter et al., 2006). Sin embargo, carece de sistemas de observación adecuados:

- *Observación desde Tierra.* Las estaciones de seguimiento de calidad del aire que realizan medidas de concentración de partículas en superficie (normalmente concentración de partículas con diámetro aerodinámico inferior a 10 micrómetros, PM10) son prácticamente inexistentes o presentan registros muy discontinuos por estar asociadas a campañas especiales. Los fotómetros solares de la red AERONET, que proporcionan espesor óptico de aerosoles, son también muy escasos, además de presentar limitaciones intrínsecas (proporcionan datos únicamente de día y con cielo despejado). Los lidar y ceilómetros de última generación que permiten estimar perfiles verticales de concentración de partículas son totalmente inexistentes en la mitad septentrional del continente. Sólo en Tenerife, en las Islas Canarias, se cuenta con un lidar de micropulsos.
- *Observación desde satélite.* Las imágenes de satélite ordinarias y los productos cuantitativos derivados (índice de aerosoles absorbentes, espesor óptico de aerosoles) son poco eficaces para detectar polvo sobre superficies altamente reflectantes como los desiertos. Los sensores de última generación que proporcionan una mejor información cuantitativa (como MISR) tienen una frecuencia de paso sobre el mismo lugar de

más de 10 días. Además, la información suministrada por los satélites está relacionada con el contenido total de la columna, que no da cuenta de la concentración de polvo en superficie, que es la que se respira. Algunos algoritmos intentan determinar la distribución vertical del polvo y su concentración en superficie (Prospero et al., 2002), pero no son demasiado fiables.

Por todo ello, es importante buscar sistemas de observación alternativos que permitan caracterizar mejor las concentraciones de polvo mineral cerca del suelo. Algunos estudios han investigado la relación entre la concentración de polvo en superficie y la visibilidad horizontal suministrada por estaciones meteorológicas (N'Tchayi et al., 1997; Goudie y Middleton, 1992; Mahowald et al., 2007). Estos estudios han demostrado que la visibilidad presenta un ciclo estacional similar al de la concentración de polvo en superficie y que existe una buena correlación entre sus respectivos datos diarios.

El presente trabajo investiga la distribución geográfica de polvo mineral atmosférico en África Septentrional y Oriente Medio, así como su variación estacional, utilizando datos de visibilidad horizontal procedentes de estaciones meteorológicas. Posteriormente, para algunas estaciones se estudia la relación existente entre visibilidad horizontal y PM10.

## Datos

Para el análisis de la distribución geográfica y variación estacional del polvo mineral se han utilizado datos tri-horarios de visibilidad y tiempo presente procedentes de boletines SYNOP emitidos por un total de 564 estaciones meteorológicas situadas en el Norte de África, Oriente Medio y extremo sur de Europa (latitud de 0° a 38°N y longitud de 20°W a 60°E) correspondientes al periodo comprendido entre 1996 y 2010. Se han considerado únicamente las estaciones con un mínimo de 5000 observaciones disponibles para el periodo de 15 años analizado. Se han contabilizado los casos en que la visibilidad horizontal se ha reducido a menos de 5 km.

La observación de tiempo presente se ha utilizado para discriminar entre reducciones de visibilidad causadas por polvo mineral o por otras causas. La tabla 1 muestra los valores de tiempo presente para los cuales una reducción de visibilidad se ha asociado a la presencia de polvo. El método filtra razonablemente bien los casos de baja visibilidad originados por la presencia de hidrometeoros (niebla, neblina, lluvia, etc.) Sin embargo, no permite distinguir el polvo mineral de otros aerosoles. Se rechazan los casos en que se manifiesta

explícitamente la presencia de humo (código 04), pero se admiten los casos en que se observa calima (código 05), que puede deberse a la presencia de polvo mineral o de otros aerosoles (productos de combustión de biomasa, cenizas volcánicas, partículas antropogénicas, etc.).

Código	Tiempo presente
05	Calima
06	Polvo en suspensión abarcando gran extensión no levantado por el viento
07	Polvo o arena levantados por el viento
08	Torbellinos de polvo o arena bien desarrollados
09	Tempestad de polvo o arena a la vista pero no en la estación
30	Tempestad de polvo o arena ligera o moderada, disminuyendo en intensidad
31	Tempestad de polvo o arena ligera o moderada, sin cambios
32	Tempestad de polvo o arena ligera o moderada, aumentando de intensidad
33	Tempestad de polvo o arena severa, disminuyendo en intensidad
34	Tempestad de polvo o arena severa, sin cambios
35	Tempestad de polvo o arena severa, aumentando de intensidad
98	Tormenta con tempestad de polvo o arena

Tabla 1. Valores de tiempo presente utilizados para asociar una reducción de visibilidad a la presencia de polvo mineral.

Es importante tener en cuenta la práctica ausencia de datos en algunos países del golfo de Guinea muy afectados por el polvo durante los meses invernales (Guinea, Sierra Leona, Liberia, Nigeria) y muy especialmente en Chad. En este último país se encuentra la depresión de Bodélé, una zona baja que había estado anegada por el lago Chad y ahora se encuentra cubierta por sus sedimentos. Esta depresión está situada entre las montañas de Tibesti y Einaudi, constituyendo un túnel de viento natural. La combinación de fuertes vientos y suelo fácilmente erosionable convierte a esta zona en la mayor fuente individual de polvo en el mundo (Prospero et al, 2002).

Para el análisis de la relación entre visibilidad y concentración de partículas se han utilizado datos de PM10 de las estaciones siguientes:

- M'Bour (Senegal, 14.39°N, 16.96°W)
- Cinzana (Mali, 13.28°N, 5.93°W)
- Banizoumbou (Níger, 13.54°N, 2.66°E)
- Observatorio de Izaña (Islas Canarias, 28.30°N, 16.49°W)

Las tres primeras estaciones pertenecen a la red establecida por el proyecto *African Monsoon Multidisciplinary Analysis* (AMMA), descrita en Marticorena et al. (2010). Se han analizado los datos de enero a marzo, que es la estación seca, del periodo 2006-2008, que se han correlacionado con los de visibilidad de las estaciones sinópticas más cercanas:

- Dakar (Senegal, 14.73°N, 17.15°W)
- Segou (Mali, 13.4°N, 6.15°W)
- Niamey (Níger, 13.48°N, 2.17°E).

Para la estación de Izaña, se han analizado los datos de julio a septiembre de los años 2000 a 2005. En verano es cuando las intrusiones de polvo sahariano son más frecuentes y, además, alcanzan el nivel del observatorio (2360 m).

Para restringir el análisis a los casos en que el polvo mineral es el tipo dominante de aerosol, se han analizado los datos de las estaciones más cercanas de la *Aerosol RObotic NETwork* (AERONET), que son:

- Dakar (Senegal, 14.39°N, 16.95°W)
- IER Cinzana (Mali, 13.27°N, 5.93°W)
- Banizoumbou (Níger, 13.54°N, 2.66°E)
- Observatorio de Izaña (Islas Canarias, 28.30°N, 16.49°W)

### Distribución geográfica polvo mineral

Se ha calculado el porcentaje de observaciones con visibilidad inferior a 5 km asociada a polvo sobre el total de observaciones disponibles. El resultado se puede ver en la Figura 1

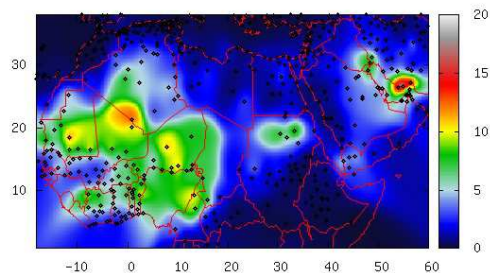


Figura 1. Porcentaje anual de observaciones con visibilidad menor de 5 km asociada a la presencia de polvo.

Washington et al. (2003) estudiaron la distribución geográfica de la cantidad total de polvo mineral en columna a partir de los valores del índice de aerosoles absorbentes (AAI) de TOMS. Este índice se calcula a partir de las medidas en los canales ultravioleta de 340 y 380 nm del espectrómetro TOMS que viajó a bordo del satélite Nimbus-7 entre 1978 y 1992. Utilizando una técnica basada en Herman et al. (1997), se consigue detectar, sobre

cualquier tipo de superficie, incluso en presencia de nubes, aerosoles que absorban radiación ultravioleta.

AAI es una estimación del contenido total de polvo en la columna mientras que la visibilidad está relacionada con la concentración cerca del suelo. Algunos autores señalan, incluso, que este índice subestima el polvo mineral situado por debajo de 1.5 km (Torres et al., 1998; Ginoux y Torres, 2003). Hay que tener en cuenta también que tanto la estimación de polvo mineral realizada a partir del AAI como la basada en la visibilidad pueden estar contaminadas, sobre todo en el Sahel y en las sabanas y selvas del golfo de Guinea en invierno, por la presencia de partículas procedentes de la combustión de biomasa (Ogunjobi et al., 2008; Basart et al, 2009).

De todos modos, ambas distribuciones son similares. La mayor diferencia se observa en la depresión de Bodélé, donde el índice de aerosoles alcanza los máximos valores mientras que se carece por completo de datos de visibilidad.

### Variación anual de la concentración de polvo mineral

Se han calculado también los porcentajes estacionales de observaciones con visibilidad inferior a 5 km asociada a polvo. Los resultados se pueden ver en las Figuras 2 a 5.

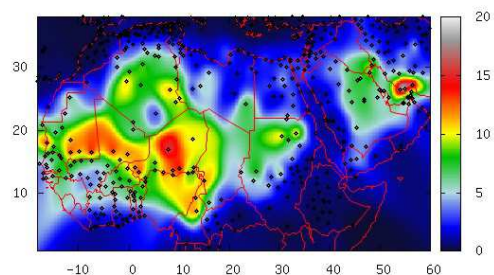


Figura 2. Porcentaje de observaciones con visibilidad menor de 5 km en primavera (marzo, abril, mayo) asociadas a la presencia de polvo.

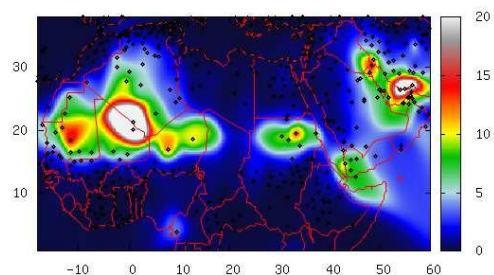


Figura 3. Porcentaje de observaciones con visibilidad menor de 5 km en verano (junio, julio, agosto) asociadas a la presencia de polvo.

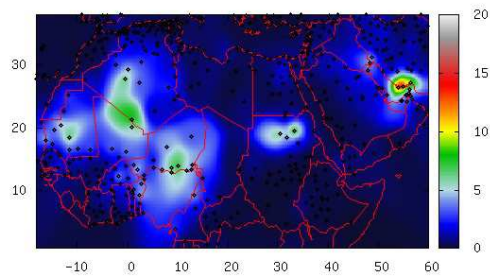


Figura 4. Porcentaje de observaciones con visibilidad menor de 5 km en otoño (septiembre, octubre, noviembre) asociadas a la presencia de polvo.

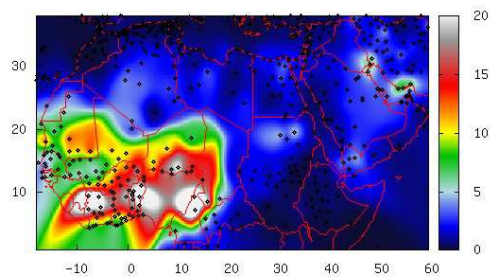


Figura 5. Porcentaje de observaciones con visibilidad menor de 5 km en invierno (diciembre, enero, febrero) asociadas a la presencia de polvo.

Se puede apreciar la existencia de un claro ciclo anual. Este ciclo también se observa con el AAI de TOMS.

Varios autores (Prospero, 2002; Engelstaedter y Washington (2007) señalan que en invierno, los valores más altos del índice de aerosoles se observan en latitudes de 7°N y en primavera, en latitudes de 15-20°. Estos resultados coinciden con los obtenidos en el presente estudio. El desplazamiento estacional está ligado al desplazamiento de la convección y las precipitaciones asociado a la zona de convergencia intertropical (ZCIT).

En enero, los vientos alisios del NE llamados Harmattan dominan sobre gran parte de África septentrional. La convergencia con los vientos de componente sur procedentes del ecuador se produce en la ZCIT, situada en promedio a unos 6-8°N. Durante los siguientes meses, la zona de convergencia se mueve hacia el norte y en agosto alcanza su latitud más septentrional (18-22°N). A continuación vuelve a desplazarse hacia el sur, hasta diciembre-enero. La emisión de polvo se asocia sobre todo a situaciones en que se refuerza el Harmattan, que se desplaza latitudinalmente conjuntamente con la ZCIT.

Otros factores estacionales que pueden favorecer la emisión son la convergencia horizontal de masa asociada con convección seca y las ondas del este que se desplazan sobre África en verano. La estacionalidad de la precipitación en el Sahel, por su parte, controla la presencia de partículas procedentes de combustión de biomasa que, como se ha mencionado anteriormente, en invierno pueden contaminar las estimaciones de concentración de polvo.

### Regímenes de variación anual

La determinación de las áreas con un ciclo anual similar se ha abordado mediante análisis de conglomerados (método de las k medias). El análisis se ha aplicado a los porcentajes mensuales de reducción de visibilidad a menos de 5 km por polvo respecto al número total anual de tales reducciones. No se han tenido en cuenta aquellas estaciones con menos de 1.5% de observaciones a lo largo del año con reducción de visibilidad por polvo.

El porcentaje mensual medio de reducciones de visibilidad por polvo para el conjunto de estaciones (Figura 6) muestra una variación anual con máximo en marzo y mínimo en otoño, sobre todo en octubre.

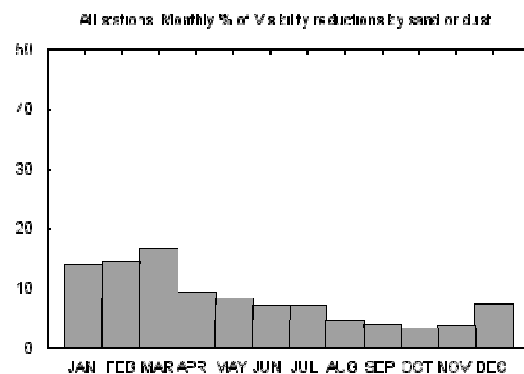


Figura 6. Porcentaje mensual medio de reducciones de visibilidad a menos de 5 km por polvo para el conjunto de estaciones.

En el conjunto de estaciones se han identificado cinco regímenes diferenciados con una distribución geográfica que puede verse en la Figura 7.

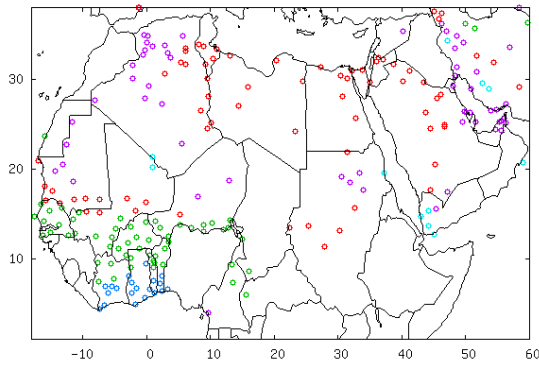


Figura 7. Zonas con distintos patrones de variación estacional de disminución de visibilidad por polvo.

El régimen más común en la región (puntos rojos de la Figura 7) presenta un máximo en primavera y un mínimo en verano-otoño. La Figura 8 muestra, para este conglomerado, el porcentaje mensual medio de reducciones de visibilidad a menos de 5 km debidas a la presencia de polvo.

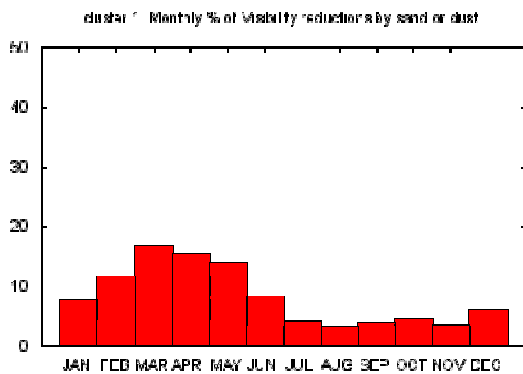


Figura 8. Porcentaje mensual medio de reducciones de visibilidad a menos de 5 km por polvo para el primer conglomerado.

El segundo régimen (puntos verdes) se observa en la parte suroccidental del Sahel y en las sabanas de los países del golfo, desde Senegal hasta el Chad. Presenta un máximo acusado en invierno que se mantiene hasta marzo y prácticamente no se observan casos entre abril y octubre, que es la estación de las lluvias (Figura 9). Los casos de polvo levantado por el Harmattan se superponen a aquéllos en que la combustión de biomasa es el principal origen del aerosol.

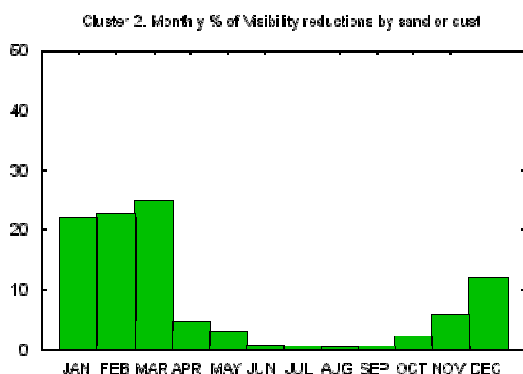


Figura 9. Porcentaje mensual medio de reducciones de visibilidad a menos de 5 km por polvo para el segundo conglomerado.

El tercer régimen (puntos azules) es propio de las regiones más próximas al golfo de Guinea. El máximo invernal es más acusado y corto que en el régimen anterior. En enero se concentran casi la mitad de los casos (Figura 10). Probablemente sean muy abundantes las situaciones en que el aerosol procedente de la combustión de biomasa es el dominante.

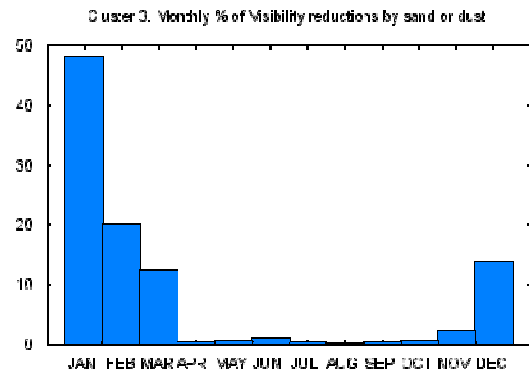


Figura 10. Porcentaje mensual medio de reducciones de visibilidad a menos de 5 km por polvo para el tercer conglomerado.

El siguiente régimen (puntos púrpura) se observa en África noroccidental, en algunos puntos de las regiones más áridas del Sahara y alrededor del golfo Pérsico. Se caracteriza por un máximo en primavera y verano y un mínimo al final del otoño y principio del invierno (Figura 11).

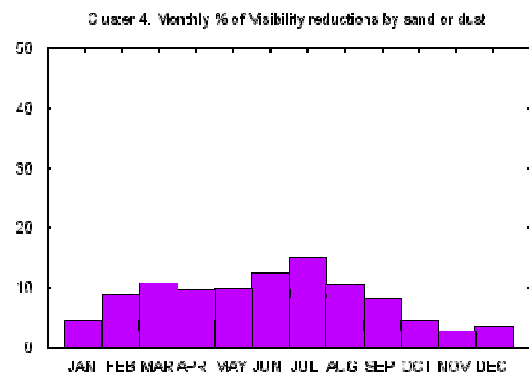


Figura 11. Porcentaje mensual medio de reducciones de visibilidad a menos de 5 km por polvo para el cuarto conglomerado.

El último régimen (puntos celestes) es más difícil de asociar a una región determinada. Se observa en puntos del Sahara, en el sur de la península Arábiga y en algunas estaciones de Irán. Se caracteriza por un máximo muy marcado en verano, sobre todo en julio, y puede asociarse a la emisión de polvo por complejos convectivos mesoscalares que en el Sahel pueden asociarse al monzón de verano (Figura 12).

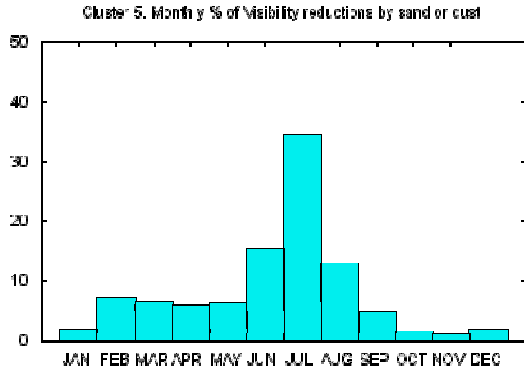


Figura 12. Porcentaje mensual medio de reducciones de visibilidad a menos de 5 km por polvo para el quinto conglomerado.

### Relación de visibilidad horizontal con PM10

Diferentes estudios han encontrado relaciones empíricas entre datos de visibilidad horizontal y concentración de polvo mineral en superficie. D'Almeida (1986), encontró una relación para estimar PM10 a partir de datos de turbiedad y visibilidad, a partir de una red de turbiedad formada por 11 estaciones en el área Sahara-Sahel en los años 1981-1982. Además se utilizaron datos de una campaña de mediciones de PM10 realizada en Agadez (Niger) en los meses de enero y febrero de 1982. D'Almeida dedujo la ecuación (1) donde PM10 se expresa en  $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$  y V en km.

$$\text{PM10} = 914.06 V^{-0.73} + 19.03 \quad (1)$$

Ben Mohamed et al. (1992) por su parte, dedujeron la ecuación (2) a partir de datos de PM10 y visibilidad observados en la estación de Niamey (Niger) con un periodo de datos de 17 meses, comprendido entre febrero de 1986 y junio de 1987. En la ecuación (2), TSP es la concentración total de partículas en suspensión expresada, también, en  $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$

$$\text{TSP} = 1339.84 V^{-0.67} \quad (2)$$

Finalmente, Shao et al. (2003) estudiaron los datos de 1200 estaciones meteorológicas en Asia nororiental y separaron las tormentas de polvo en dos categorías según su intensidad. Para estas dos categorías obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$\text{TSP} = 3802.29 V^{-0.84}; V < 3.5 \quad (3)$$

$$\text{TSP} = e^{-0.11V + 7.62}; V > 3.5 \quad (4)$$

En el presente estudio se ha seguido una metodología para estimar PM10 a partir de datos de visibilidad similar a la propuesta por D'Almeida (1986) y Ben Mohamed et al. (1992). A partir de los datos de PM10 Izaña y M'Bour y de los datos de visibilidad proporcionados por las estaciones SYNOP más cercanas (Izaña y Dakar) se ha

obtenido el ajuste de la ecuación (5) y un coeficiente de determinación de 0.66. Para ello se ha realizado un filtrado previo de los datos para excluir las reducciones de visibilidad asociadas a hidrometeoros (humedad relativa superior al 75% y/o precipitación). También se han filtrado los datos para tratar de excluir observaciones en las que el polvo no fuera el tipo dominante de aerosol. Para ello se han descartado los casos en los que la estación AERONET más cercana mostraba un exponente Ångström superior a 0.60, siguiendo la metodología descrita en Basart et al. (2009).

$$\text{PM10} = 2487.41 V^{-1.24} \quad (5)$$

Las figuras 13 y 14 muestran los valores de PM10 y visibilidad (puntos azules) para Cinzana / Segou y Banizoumbou / Niamey respectivamente, junto con las curvas de las ecuaciones anteriores.

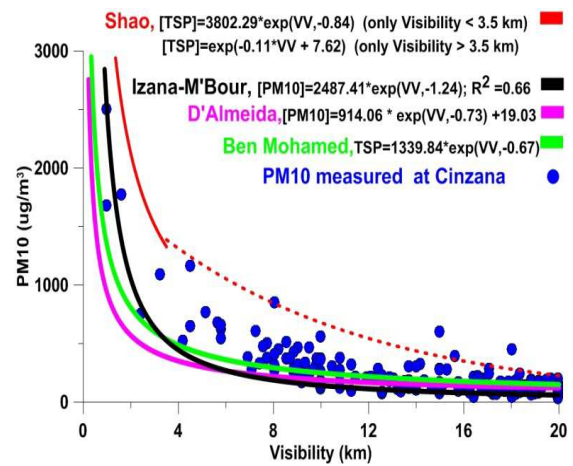


Figura 13. Los puntos azules muestran los valores conjuntos de PM10 ( $\mu\text{m}/\text{m}^3$ ) medio diario medido en Cinzana y los datos de visibilidad horizontal medios diarios medidos en la estación SYNOP más cercana (Segou). Se acompañan del ajuste obtenido (curva de color negro), así como el ajuste de D'Almeida (1986) (curva violeta), Ben Mohamed et al. (1992) (curva verde) y Shao et al. (2003) (curva roja).

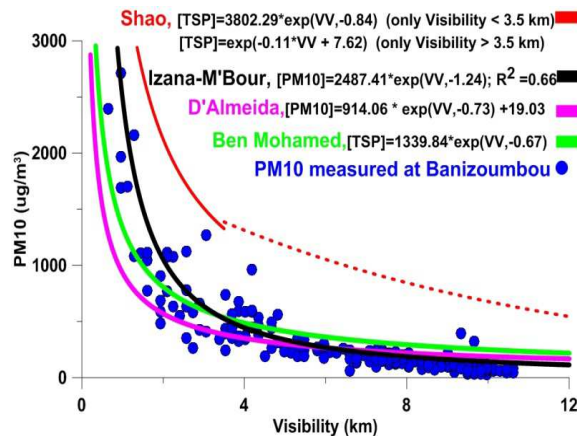


Figura 14. Los puntos azules muestran los valores conjuntos de PM10 ( $\mu\text{m}/\text{m}^3$ ) medio diario medido en

Banizoumbou y los datos de visibilidad horizontal medio diario medido en la estación SYNOP más cercana (Niamey). Se acompañan del ajuste obtenido (curva de color negro), así como el ajuste de D'Almeida (1986) (curva violeta), Ben Mohamed et al. (1992) (curva verde) y Shao et al. (2003) (curva roja).

Pruebas preliminares en Cinzana y Banizoumbou (Figuras 13-14) sugieren que el ajuste que se ha encontrado para Izaña y M'Bour puede ser de aplicación en otras áreas geográficas, aunque este punto necesita ser aún estudiado.

## Conclusiones

Se puede concluir que la visibilidad horizontal tiene una buena correlación con la concentración de partículas en superficie, siempre que se filtren las reducciones de visibilidad debidas a la presencia de hidrometeoros. Por ello, los datos de visibilidad procedentes de estaciones meteorológicas pueden utilizarse para conocer los principales rasgos de la distribución geográfica del polvo mineral y sus variaciones estacionales. De manera similar los datos de visibilidad pueden ser usados para el seguimiento continuo del nivel de concentración de partículas en regiones de África donde no se dispone de instrumentación adecuada.

En la modelización de aerosoles, la visibilidad puede ser útil para la evaluación de las predicciones y, en un futuro, para asimilación de datos, lo que permitiría una mayor precisión en el conocimiento de las condiciones iniciales. De manera similar, puede plantearse realizar predicciones de visibilidad, especialmente con fines aeronáuticos, mediante el uso de modelos de predicción de polvo mineral.

## Referencias

- Alpert, P., Herman, J., Kaufman, Y. J., Carmona, I. (2000). Response of the climatic temperature to dust forcing, inferred from total ozone mapping spectrometer (TOMS) aerosol index and the NASA assimilation model, *Atmos. Res.*, 53(1-3), 3-14.
- Basart, S., Pérez, C., Cuevas, E., Baldasano, J.M., Paolo, G. (2009). Aerosol characterization in Northern Africa, Northeastern Atlantic, Mediterranean Basin and Middle East from direct-sun AERONET observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1-18
- Ben Mohamed, A., Frangi, J.P., Fontan, J., Druilhet, A. (1992). Spatial and temporal variations of atmospheric turbidity and related parameters in Niger. *J. Appl. Meteorol.*, 31, 1286-1294.
- D'Almeida, G.A. (1986). A model for Saharan dust transport. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25 (7), 903-916.
- Domínguez-Rodríguez, A., Abreu-Afonso, J., Rodríguez, S., Juárez-Prera, R., Arroyo-Ucar, E., Jiménez-Sosa, A., González, Y., Abreu-González, P., Avanzas, P. (2011), Comparative Study of Ambient Air Particles in Patients Hospitalized for Heart Failure and Acute Coronary Syndrome, *Rev Esp Cardiol.*, 64(8), 661-666
- Engelstaedter S., Tegen I., Washington R. (2006). North African dust emissions and transport. *Earth-Sci. Rev.* 79 73-100.
- Engelstaedter, S., Washington R. (2007). Atmospheric controls on the annual cycle of North African dust, *J. Geophys. Res.* 112, D03103, 14 pp.
- Ginoux, P., Torres, O. (2003), Empirical TOMS index for dust aerosol: Applications to model validation and source characterization, *J. Geophys. Res.*, 108 (D17), 4534, doi: 10.1029/2003JD003470
- Goudie, A.S., Middleton, N.J. (1992). The changing frequency of dust storms through time. *Climatic Change.* 20 (3), 197-225.
- Herman, J. R., Bhartia, P. K., Torres, O., Hsu, C., Seftor, C., Celarier, E. (1997). Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *J. Geophys. Res.* 102, 16911-16922.
- Jickells, T.D., An, Z.S., Andersen, K. K., Baker, A.R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J.J., Boyd, P.W., Duce, R.A., Hunter, K.A., Kawahata, H., Kubilay, N., LaRoche, J., Liss, P.S., Mahowald, N., Prospero, J.M., Ridgwell, A.J., Tegen, I. Torres, R. (2005), Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate, *Science*, 308, 67-71. doi: 10.1126/science.1105959.
- Levin, Z., Ganor, E., Gladstein, V. (1996). The effects of desert particles coated with sulfate on rain formation in the eastern Mediterranean, *J. Appl. Meteorol.*, 35(9), 1511-1523
- Mahowald, N., Baker, A., Bergametti, G., Brooks, N., Duce, R., Jickells, T., Kubilay, N., Prospero, J., Tegen, I. (2005). Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, 19, No. 4, GB 4025, 10 pp., doi: 10.1029/2004GB002402
- Mahowald, N.M., Ballantine, J.A., Feddema, J., Ramankutty, N. (2007). Global trends in visibility: implications for dust sources. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 3309-3339.
- Marticorena, B., Chatenet, B., Rajot, J.L., Traoré, S., Coulibaly, M., Diallo, A., Koné, I., Maman, A., NDiaye, T., Zakou, A. (2010). Temporal variability of mineral dust concentrations over West Africa: analyses of a pluriannual monitoring from the AMMA Sahelian Dust Transect. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 8899-8915.
- N'Tchayi Mbourou, G.N., Bertrand, J.J., Nicholson, S.E. (1997). The diurnal and seasonal cycles of wind-borne dust over Africa north of the equator. *J. Appl. Meteorol.*, 36 (7), 868-882.

- Ogunjobi, K.O., He, Z., Simmer, C. (2008), Spectral aerosol optical properties from AERONET Sun-photometric measurements over West Africa, *Atmos. Res.*, 88, 89–107.
- Pérez, C., Haustein, K., Janjic, Z., Jorba, O., Huneus, N., Baldasano, J.M., Black, T., Basart, S., Nickovic, S., Miller, R.L., Perlwitz, J.P., Schulz, M., Thomson, M. (2011), Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model - Part 1: Model description, annual simulations and evaluation, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 13001-13027, doi:10.5194/acp-11-13001-2011
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E., Gill, T.E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Rev. Geophys.*, 40(1), 1–31.
- Shao, Y., Yang, Y., Wang, J., Song, Z., Leslie, L., Dong, C., Zhang, Z., Lin, Z., Kanai, Y., Yabuki, S., Chun, Y., (2003). Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation, *J. Geophys. Res.*, 108(D22), 4691, doi: 10.1029/2003JD003667.
- Thomson, M.C., Molesworth, A.M., Djingarey, M.H., Yameogo, K.R., Belanger, F., Cuevas, L.E. (2006), Potential of environmental models to predict meningitis epidemics in Africa, *Tropical Medicine and International Health*, 11(6), 781–788.
- Torres, O., Bhartia, P.K., Herman, J.R., Ahmad, Z., Gleason, J. (1998), Derivation of aerosol properties from a satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis. *Geophys. Res.* 103, D18, 23321-23322, doi: DOI: 10.1029/98JD02709
- Washington, R.W., Todd, M.C., Middleton, N., Goudie, A.S. (2003). Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations, *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 93, 297–313.