Atlas de la Desertificación de España

Los perjuicios y beneficios de las emisiones de polvo a la atmósfera

Sergio Rodríguez[1], Jessica López-Darias[1] y Paul Ginoux[2]

[1] Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (IPNA), CSIC.

[2] NOAA/OAR Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.

Emisiones de polvo a la atmósfera

La acción del viento sobre terrenos áridos y pulverulentos da lugar a la emisión de partículas de polvo del suelo, también llamado polvo eólico, polvo mineral o simplemente polvo. La velocidad umbral del viento a partir de la cual comienza el proceso de saltación y los impactos balísticos que activan la emisión de polvo varía en función del tipo de terreno, la cobertura vegetal y la humedad del aire y del suelo, pudiendo ser tan baja como 40 km h^{-1}.

Una vez emitidas, las partículas de polvo más gruesas (milimétricas) se depositan cerca de la zona de emisión, mientras que las inferiores a 100 micras (µm), y sobre todo las menores de 10 µm, pueden elevarse varios kilómetros sobre el suelo y permanecer suspendidas en el aire durante ~2 semanas en forma de aerosoles, pudiendo experimentar transporte de largo recorrido, con un alcance de centenares a miles de kilómeros según la velocidad del viento (Figura IV.1.1).

Se estima que cada año se emiten a la atmósfera unas 4700 millones de toneladas de polvo (Kok et al., 2023). Las principales regiones emisoras se encuentran en el denominado «Cinturón de Polvo», que se extiende por el norte de África, Oriente Medio y el interior de Asia (Figura IV.4.1) (Prospero et al., 2002). También hay zonas emisoras de polvo eólico en los subtrópicos de Norteamérica, Sudamérica, Sudáfrica y Australia. Aunque a menor escala, también hay emisiones a altas latitudes, en los desiertos árticos de Alaska, Islandia y Patagonia (Figura IV.4.2). Estos aerosoles de polvo influyen en el clima, en los ecosistemas y en la calidad del aire.

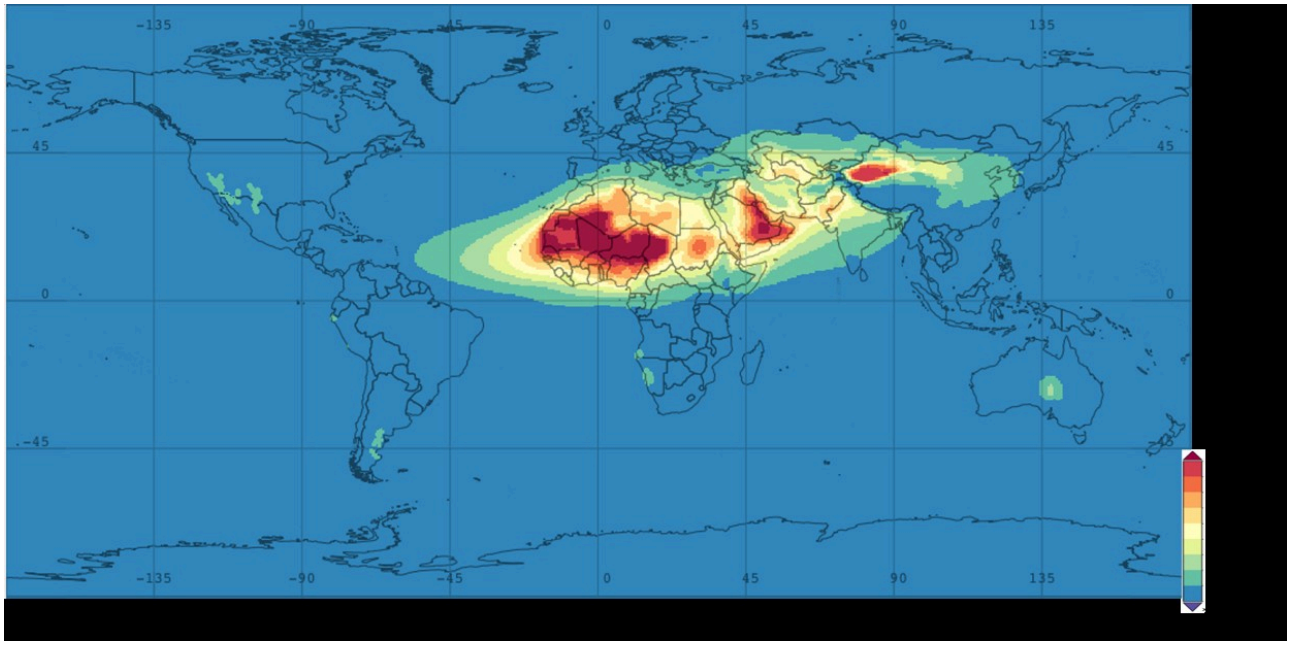

Figura IV.4.1. Climatología 1990-2020 de la carga de polvo en la atmósfera. Ilustración basada Giovanni-NASA, modelo MERRA-2 (Gelaro et al., 2017).

España no es una región emisora de grandes cantidades de polvo eólico, aunque si recibe importantes impactos del polvo procedente del norte de África, durante las denominadas calimas de polvo sahariano, motivo por el que los efectos del cambio climático se deben analizar a una escala transfronteriza.

Polvo, clima y cambio climático

El polvo y el clima se influyen mutuamente, con potentes mecanismos de retroalimentación. Los aerosoles de polvo dispersan la luz solar y actúan como catalizador en la formación de nubes de hielo, de tipo cirro. La deposición de polvo en el océano provee hierro, fósforo y otros nutrientes al fitoplancton, aumentando la productividad primaria y actuando como sumidero de dióxido de carbono. El efecto neto de los aerosoles de polvo es el de «enfriar» la atmósfera, aunque sin llegar a compensar el «calentamiento» causado por el exceso de gases de efecto invernadero. El forzamiento radiativo debido a la interacción directa polvo – radiación se estima en -0.2 W m^{-2}. Estudios basados en sedimentos marinos indican que los aportes de polvo al océano explicarían entre 40 y 50 ppm de las variaciones de CO_2 observadas entre los periodos glaciales e interglaciares del último millón de años (Martínez-Garcia et al., 2009).

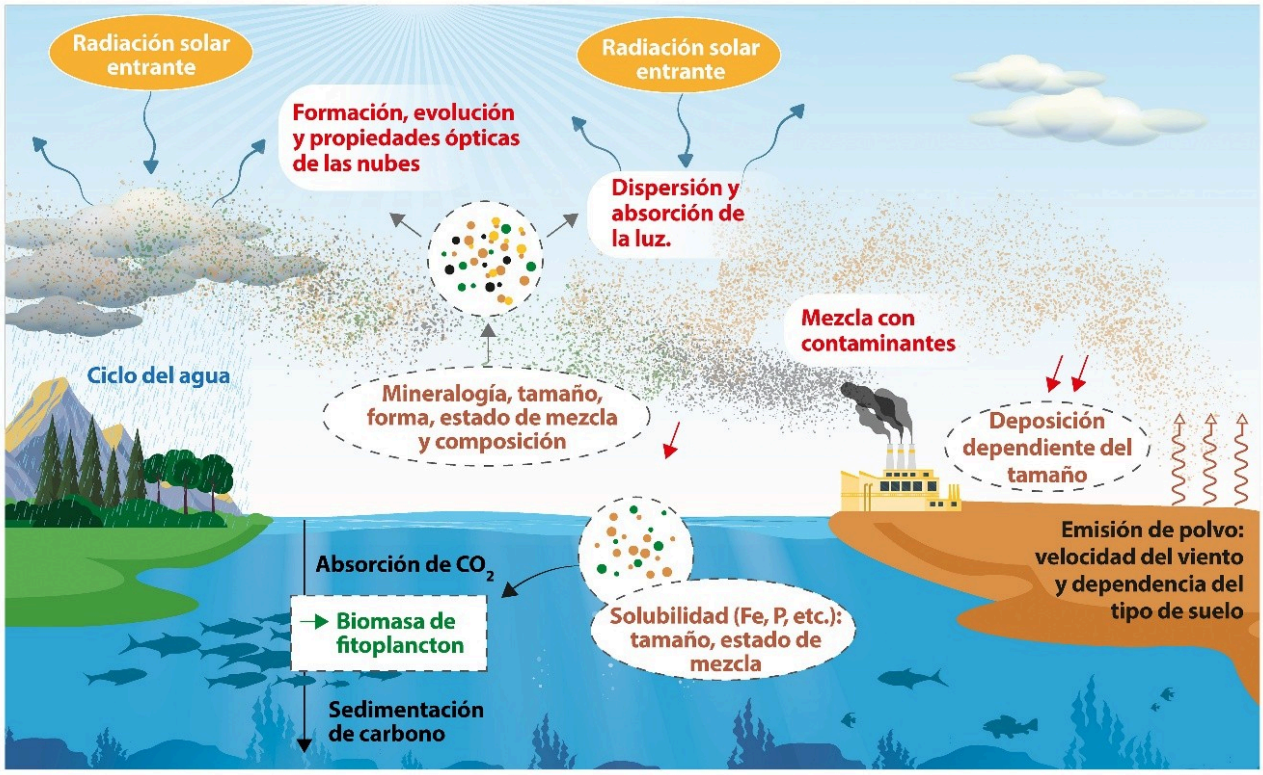

Figura CT IV.1. Ilustración de los procesos mediante los que el polvo afecta al clima. Fuente: Rodríguez et al. (2012).

Desde el desarrollo de la agricultura industrial la carga de polvo en la atmósfera ha aumentado hasta alcanzar un máximo en los años 1980s (+80% superior al periodo preindustrial), y una posterior reducción de emisiones atribuida a la ralentización de la circulación atmosférica ligada al cambio climático. Actualmente la carga de polvo es un +56% superior a la del periodo preindustrial (Kok et al., 2023). Recientes proyecciones climáticas apuntan a una expansión de las zonas áridas norteafricanas hacia la España peninsular y a una desviación de las rutas de transporte de polvo hacia el norte.

Origen del polvo eólico

Polvo natural

En los subtrópicos existen fuentes de polvo que se consideran naturales. Las más activas se encuentran en bajas topográficas que albergan sedimentos fluviales y lacustres acumulados en cuencas de antiguos ríos y lagos (Prospero et al., 2002). Algunas de estas fuentes están en el norte de África, en zonas que actualmente son hiperáridas (índice de aridez <0.05; con una precipitación anual <200 mm), pero que durante el último periodo 'Green Sahara' (5.000-15.000 años atrás), que tuvo lugar tras la última glaciación, albergaron grandes lagos y ríos gracias a la mayor penetración de las precipitaciones del monzón. Estas fuentes de polvo ligadas a antiguos lagos tambien las encontramos en otras regiones subtropicales, como el Rub' al Khali (Arabia Saudí) o Taklamakán (China). Mezclado con los aerosoles de polvo norteafricano se suelen encontrar esqueletos de algas de agua dulce, de tipo diatomeas (de pocas micras de tamaño), reminiscencia de un pasado más húmedo (Barkley et al., 2021).

Entender los procesos que llevaron a la formación de estas fuentes naturales es crucial para evitar la creación de nuevas fuentes antropogénicas de polvo. La gran paradoja es que fue el agua quien acumuló los sedimentos que hoy día se emiten por la acción del viento y que flotan en la atmósfera en forma de aerosoles de polvo eólico. Actualmente, los lechos de lagos efímeros, como los característicos de regiones aridas con clima monzónico, siguen acumulando polvo que se emite en la estación seca (Ginoux et al., 2012).

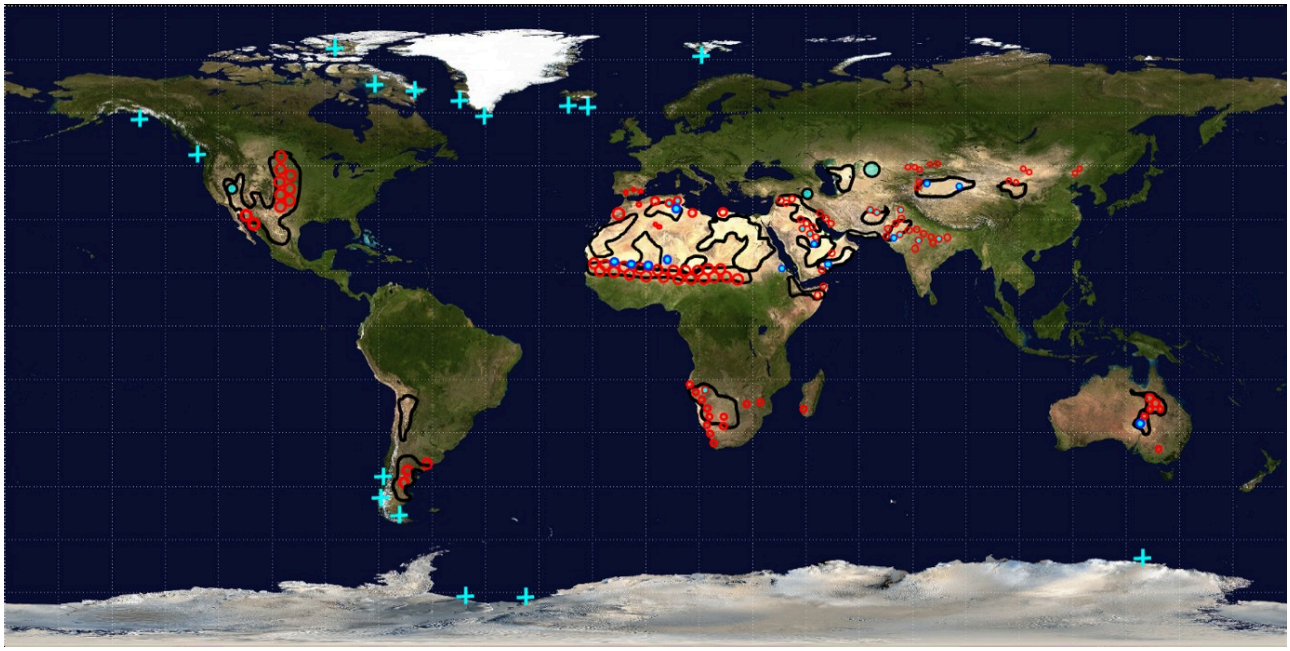

Figura IV.4.2. Distribución global de las regiones fuente de polvo (líneas negras) ilustrando las fuentes ligadas a (i) terrenos agrícolas (círculo-rojo), (ii) terrenos de agricultura próximos a formaciones de agua (círculo-rojo relleno de azul claro), (iii) lagos efímeros/estacionanes (círculo-azul relleno de azul claro), (v) grandes lagos desecados (Owen-California), Aral-Uzbekistán y Urmia-Irán) y (vi) glaciales (cruz azul-clara) (Bullard et al., 2016; Ginoux et al., 2012; Prospero et al., 2002; Scheuvens et al., 2013).

Polvo antropogénico

Cada día flotan en la atmósfera unas 25 millones de toneladas de polvo, a las que técnicamente se les denomina carga de polvo (IV.4.1). Estudios basados en modelización rectificada con paleo registros indican que la actual carga de polvo (2020s) es un 56% más alta que en la era preindustrial (< 1850) (Kok et al., 2023). Los paleo registros indican que este aumento en la carga de polvo está estrechamente relacionado con (i) la expansión de la agricultura industrial a partir del desarrollo de los fertilizantes en el siglo XIX (círculos rojos en la Figura IV.4.2) y (ii) la desecación de lagos para irrigación agrícola, tal como ocurrió en el lago Mar de Aral (Uzbekistán) o lago Urmia (Irán), o para suministro urbano, como ocurrió con el lago Owen (EEUU) a inicios del siglo XX (círculos con relleno azul claro en la Figura IV.4.2). El aumento de la carga de polvo que flota en la atmósfera ha sido del 47% en el norte de África, del 76% en Asia y del 27% en el hemisferio Sur (Kok et al., 2023). Actualmente, el norte de África emite el ~50% del polvo emitido a nivel global,

un 1/5 de este de ese valor (~10% del global) se emite en zonas del Sahel actualmente dedicadas a la agricultura, que aprovechan las lluvias del monzón (círculos rojos, Figura IV.4.2), y donde los paleo registros indican que las emisiones de polvo aumentaron drásticamente a partir de la expansión de la agricultura comercial en el siglo XIX. Estudios basados en observación satélite estiman que, actualmente, el 25% del polvo emitido a nivel global es de origen antropogénico, ligado al suelo agrícola (puntos rojos, Figura IV.4.2), y de forma secundaria, a la desecación de lagos (círculos relleno de azul, Figura IV.4.2) (Ginoux et al., 2012).

Polvo atmosférico, ecosistemas y pesquerías

Las emisiones, transporte y deposición de polvo tienen una enorme influencia en los ecosistemas, con implicaciones en la obtención de alimentos. Estas emisiones representan una pérdida de minerales, nutriente y materia orgánica de los suelos emisores, contribuyendo al empobrecimiento de los mismos. A su vez, la deposición del polvo reduce la capacidad de fotosíntesis de las plantas. La agricultura es la principal creadora de fuentes antropogénicas de polvo; las tormentas de polvo tienen, a vez, un enorme impacto en la producción de alimentos (Middleton, 2024). Por el contrario, la deposición atmosférica de polvo en las aguas abiertas del oceano representa un aporte de nutrientes al ecosistema marino, influyendo en los ciclos biogeoquímicos del hierro, fósforo, manganeso, cobre, zinc y niquel, entre otros.

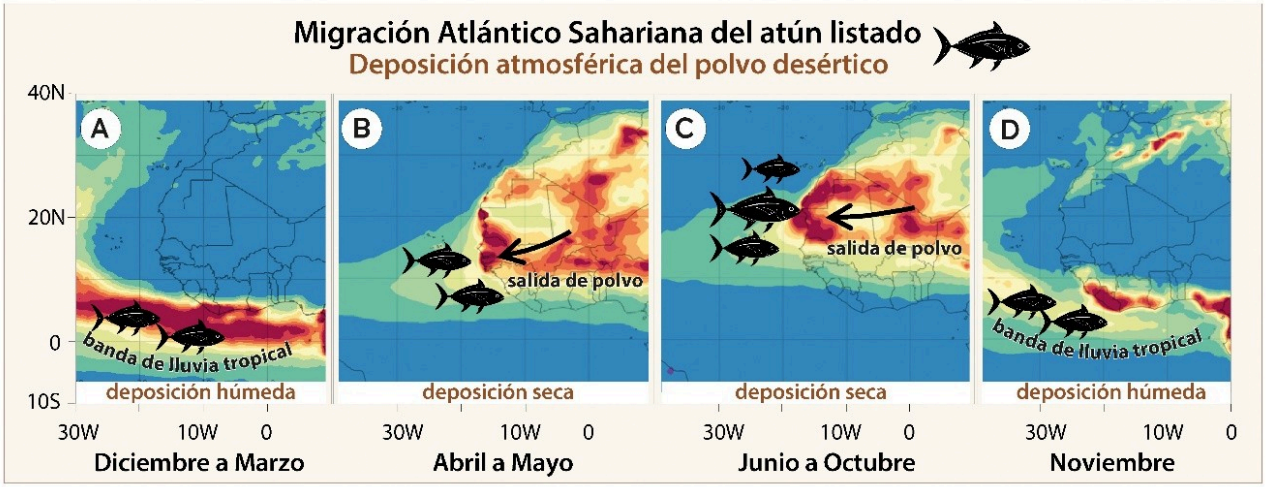

Figura CT IV.2. Migración del atún listado, ilustrando como las principales zonas de captura de atún se encuenetran en las aguas afectadas por deposición masiva de polvo sahariano. Fuente: Rodríguez et al. (2023).

La deposición del polvo en las aguas abiertas de los oceanos favorece el crecimiento del fitoplancton, creando nueva materia orgánica que se distribuye por la red trófica del ecosistema marino hasta llegar a los grandes depredadores. Este proceso tiene enormes implicaciones en la industria pesquera. En el Atlántico Norte, las zonas de mayores capturas de atún listado (*Katsuwonus pelamis*) se encuentran en las aguas afectadas por deposición masiva de polvo sahariano (Rodríguez et al., 2023) (Figura IV.4.1). Desde enero a agosto, estas zonas de pesca se desplazan desde las aguas ecuatoriales del Atlántico hasta las aguas abiertas frente a Mauritania y Canarias, siguiendo la migración del atún listado que sigue, a su vez, la variación estacional de la deposición de polvo norteafricano en el oceano.

Emisiones de polvo agrícola en España

Las observaciones desde satélite muestran que la mitad sur de la España peninsular está afectada por emisiones de polvo, especialmente en Andalucía, Murcia, sur de la Comunidad Valenciana, Castilla La Mancha y Extremadura (Figura IV.4.3). En estas regiones, la carga de polvo es superior al umbral de 0.2 de espesor óptico de aerosoles (una medida de la atenuación de la luz del Sol por las partículas en suspensión) entre 7 y 56 días al año (Figura IV.4.3). Estas cifras son inferiores a las que se detectan en el norte de Africa, donde este umbral supera hasta 110 días·año^{-1} (Ginoux et al.,

2012). El análisis de las imágenes satélite indica que esta carga de polvo está mayoritariamente ligada a emisiones en terrenos agrícolas (Figura IV.4.3), dedicados al olivo, almendro, cereal y hortalizas, entre otros cultivos.

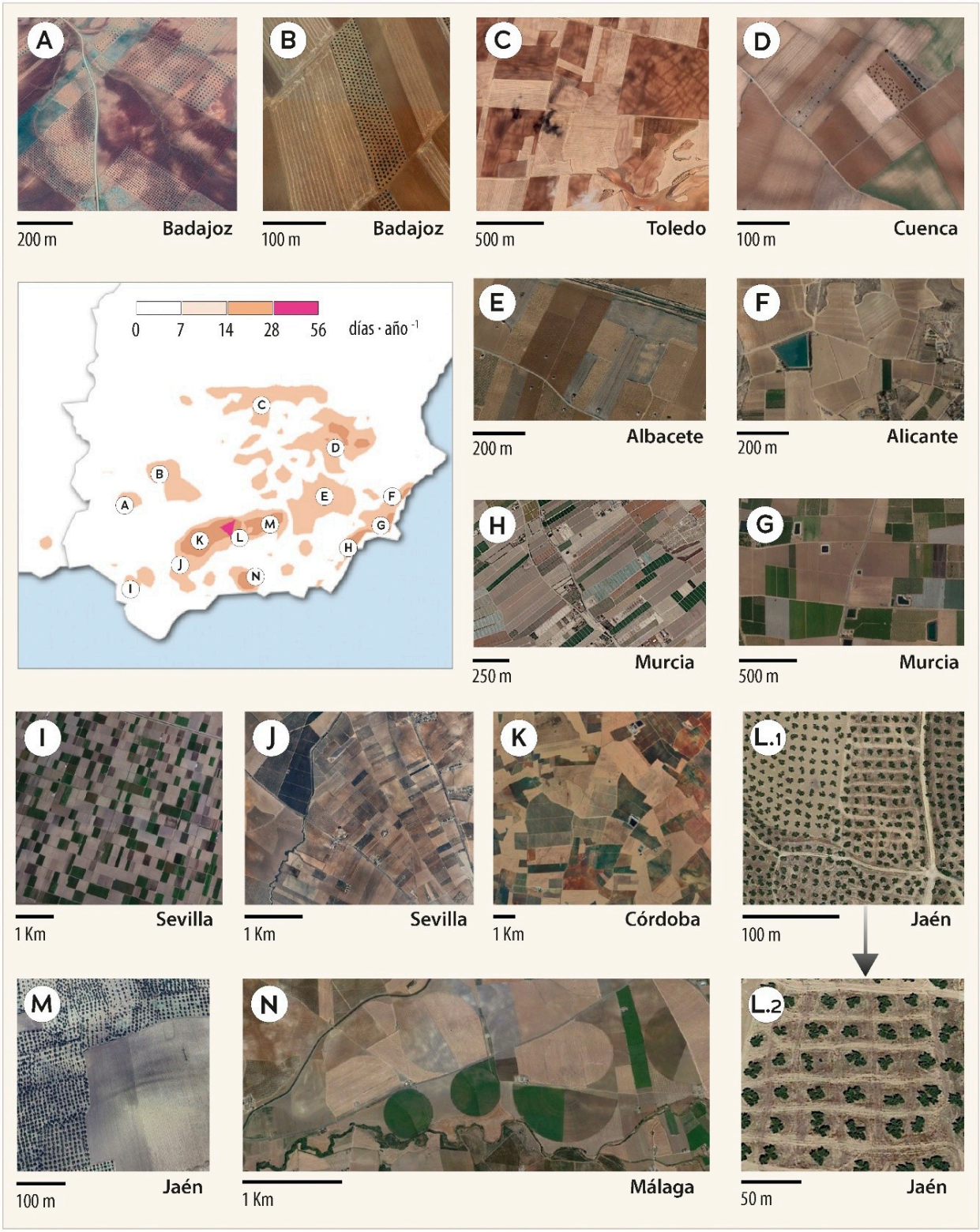

Figura IV.4.3. Número de días al año en los que la carga de polvo agrícola supera el umbral de 0.2 de espesor óptico de aerosoles según observación satélite (Ginoux et al., 2012). Se muestran ejemplos (imágenes satélite de Google Earth™) de las zonas emisoras de polvo indicando localidades próximas: A) Badajoz (Almendralejo), B) Badajoz (La Coronada), C) Toledo (Villatobas), D) Cuenca (Iniesta), E) Albacete (Valdepeñas), F) Alicante (Alicante), G) Murcia (La Palma), H) Murcia (Lorca), I) Sevilla (Lébrija), J) Sevilla (Osuna), K) Códoba (La Carlota), L) Jaen (Lopera), M) Jaen (Calzadilla) y N) Málaga (Antequera).

Las zonas afectadas por el polvo agrícola abarcan centenares de kilómetros (Figura IV.4.3). Destaca el corredor que se extiende a lo largo del Valle del Guadalquivir, que conecta con regiones del este peninsular como Albacete, Cuenca, Murcia y Alicante. Las emisiones de polvo agrícola aparecen ligadas a terrenos sin protección del suelo. El mayor hot-spot de España está en Jaén, donde el suelo presenta marcas de maquinaria agrícola (Figura IV.4.3L.1 y L.2) que rompe las costras geológica y biológica del suelo, favoreciendo la liberación de polvo a la atmósfera. En los cultivos de olivos, almendros y otros frutales, estas emisiones de polvo se pueden reducir mediante la conservación de la cobertura vegetal del suelo, haciendo uso de prácticas como las recomendadas en el proyecto «Olivares Vivos» (Tarifa et al., 2021). Es destacable el hecho de que no se observen grandes hot-spots en zonas mineras, pues esta industria está sujeta a estrictas regulaciones medioambientales que minimizan las emisiones de polvo. Tampoco se observan en Almería, donde buena parte de la actividad agrícola se practica en invernaderos.

Super calimas de polvo norteafricano en España

Las emisiones de polvo en el norte de Africa tambien afectan a España. El polvo norteafricano es regularmente transportado hacia el Atlántico en una corriente de aire denominada Capa de Aire Sahariano (Prospero et al., 2021; Rodríguez et al., 2015) que ocasionalmente se desvía hacia Europa (Figura IV.4.1). Los registros de las redes de calidad del aire muestran que durante estas calimas de polvo sahariano las concentraciones de partículas respirables de tipo PM_{10} (menores de 10 micras) aumentan hasta alcanzar, típicamente, valores dentro de los rangos 40-300 $\mu g \cdot m^{-3}$ en Canarias y 40-100 $\mu g \cdot m^{-3}$ en la España peninsular (promedios de 24h). Esta dinámica de «calimas habituales» se ha visto alterada en el periodo 2020 y 2022, cuando se registraron las concentraciones más altas jamás medidas desde que existen registros (Figura IV.4.4) (Rodríguez y López-Darias, 2024). Durante estas super calimas de polvo sahariano se midieron records históricos de PM_{10} en España, registrados en Gran Canaria (22 febrero 2020) y Almería (15 marzo 2022), con máximos horarios de 5254 y 4605 $\mu g \cdot m^{-3}$ (promedios 1h) y diarios de 1840 y 3069 $\mu g \cdot m^{-3}$ (promedios de 24h), respectivamente (Rodríguez and López-Darias, 2024).

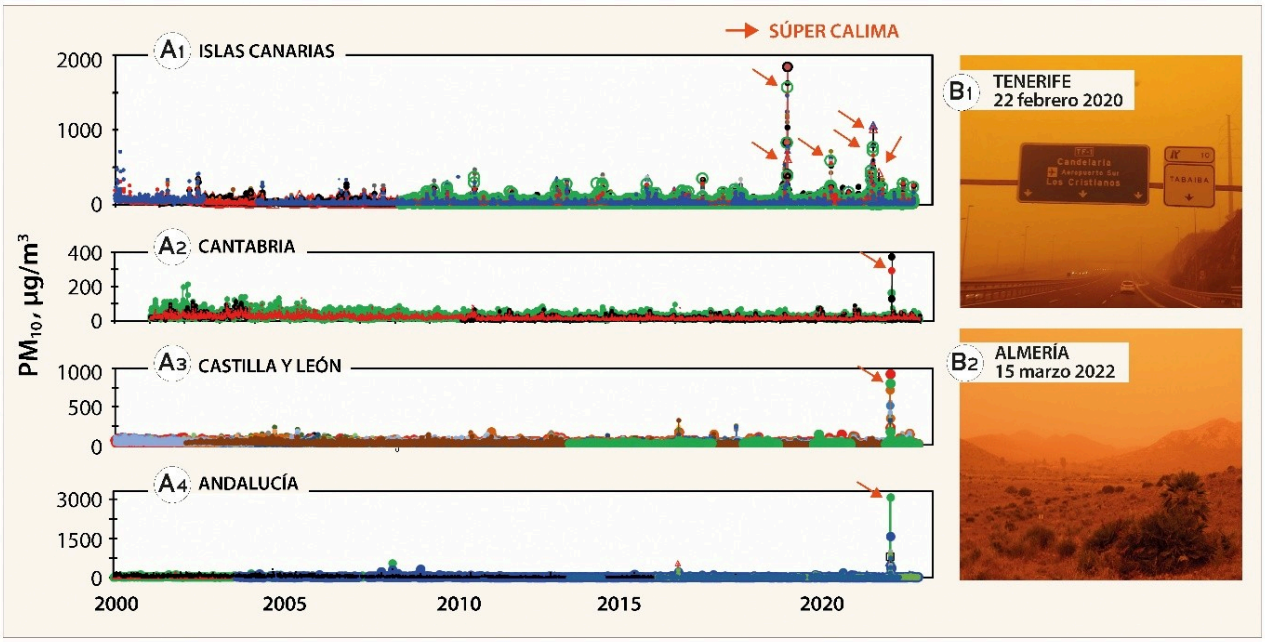

Figura IV.4.4. Super calimas de polvo norteafricano. Registro histórico de partículas respirables de tipo PM_{10} (menores de 10 micras) medidas en estaciones de calidad del aire en Canarias, Canabria, Castilla y León y Andalucía, indicando con flechas rojas las 6 super calimas registradas en el periodo 2020-2022. Fotografías tomadas en Tenerife (B1) y Almería (B2) durante las super calimas

que afectaron a estos territorios en los peridos 22-29 febrero 2020 y 15-16 marzo 2022 (Rodríguez y López-Darias, 2024).

Polvo y calidad del aire

La inhalación del polvo que flota en el aire ambiente durante las calimas del polvo norteafricano tiene efectos adversos en el sistema cardiorrespiratorio. Aumentos de 10 $\mu g \cdot m^{-3}$ en las concentraciones de polvo respirable en el aire ambiente están asociados a (Dominguez-Rodriguez et al., 2020, 2021):

- Aumentos en las concentraciones de biomarcadores de procesos inflamatorios en el esputo de los pacientes, tales como la hidroxiprolina y el factor de crecimiento transformante (TGF-β1), siendo esta una clara evidencia de que inhalar el polvo del aire ambiente inflama las vías respiratorias,
- Aumentos del 2% en el riesgo de muerte cardiovascular. En el caso de las super calimas registradas en España, cuando el PM_{10} superó los 3000 $\mu g/m^3$ (promedio 24h), el riesgo de fallecimiento por causa cardiovascular sería superior al 600%. El 86% de los fallecimientos por insuficiencia cardiaca intrahospitalaria registrados durante un periodo de 4 años en un hospital canario se produjo en pacientes ingresados durante días de calima.

Figura CT3 IV.3. El uso de mascarillas FFP2 durante calimas de polvo sahariano en Lanzarote. Fotografía de Sergio Rodríguez.

Referencias

Barkley AE, Olson NE, Prospero JM, et al (2021) Atmospheric Transport of North African Dust-Bearing Supermicron Freshwater Diatoms to South America: Implications for Iron Transport to the Equatorial North Atlantic Ocean. Geophys Res Lett 48: e2020GL090476. https://doi.org/10.1029/2020GL090476

Dominguez-Rodriguez A, Rodríguez S, Baez-Ferrer N et al (2020) Impact of Saharan dust exposure on airway inflammation in patients with ischemic heart disease, Transl. Res. 224: 16–25.

https://doi.org/10.1016/j.trsl.2020.05.011

Domínguez-Rodríguez, A., Báez-Ferrer, N., Abreu-González, P.,et al (2021) Impact of Desert Dust Events on the Cardiovascular Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis, J. Clin. Med. 10(4): 727. https://doi.org/10.3390/jcm10040727

Bullard JE, Baddock M, Bradwell T, et al (2016) High-latitude dust in the Earth system. Rev Geophys 54:447–485. https://doi.org/10.1002/2016RG000518

Gelaro R, McCarty W, Suárez MJ, et al (2017) The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). J Clim 30:5419–5454. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1

Ginoux P, Prospero JM, Gill TE, et al (2012) Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. Rev Geophys 50:. https://doi.org/10.1029/2012RG000388

Kok JF, Storelvmo T, Karydis VA, et al (2023) Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change. Nat Rev Earth Environ 4:71–86. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00379-5

Martínez-Garcia A, Rosell-Melé A, Geibert W, et al (2009) Links between iron supply, marine productivity, sea surface temperature, and CO 2 over the last 1.1 Ma. Paleoceanography 24:n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2008PA001657

Middleton N (2024) Impacts of sand and dust storms on food production. Environ. Res. Food Syst. 1(2): 022003. https://doi.org/10.1088/2976-601X/ad63ac, 2024.

Prospero JM., Ginoux P, Torres O, et al (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 40:2-1-2–31. https://doi.org/10.1029/2000RG000095

Prospero JM, Delany AC, Delany AC, Carlson TN (2021) The Discovery of African Dust Transport to the Western Hemisphere and the Saharan Air Layer: A History. Bull Am Meteorol Soc 102: E1239–E1260. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0309.1

Rodríguez S, Alastuey A, Querol X (2012) A review of methods for long term in situ characterization of aerosol dust. Aeolian Res 6:55–74. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2012.07.004

Rodríguez S, Calzolai G, Chiari M, et al (2020) Rapid changes of dust geochemistry in the Saharan Air Layer linked to sources and meteorology. Atmos Environ 223:117186. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117186

Rodríguez S, Cuevas E, Prospero JM, et al (2015) Modulation of Saharan dust export by the North African dipole. Atmos Chem Phys 15:7471–7486. https://doi.org/10.5194/acp-15-7471-2015

Rodríguez S, Riera R, Fonteneau A, Alonso-Pérez S, López-Darias J (2023) African desert dust influences migrations and fisheries of the Atlantic skipjack-tuna, Atmos. Environ. 312: 120022. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120022

Rodríguez S, López-Darias J (2024) Extreme Saharan dust events expand northward over the Atlantic and Europe, prompting record-breaking PM 10 and PM 2.5 episodes. Atmos Chem Phys 24:12031–12053. https://doi.org/10.5194/acp-24-12031-2024

Scheuvens D, Schütz L, Kandler K, et al (2013) Bulk composition of northern African dust and its source sediments — A compilation. Earth-Science Rev 116:170–194. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.005

Tarifa R, Martínez-Núñez C, Valera F, et al (2021) Agricultural intensification erodes taxonomic and functional diversity in Mediterranean olive groves by filtering out rare species. J. Appl. Ecol. 58(10): 2266–2276, https://doi.org/10.1111/1365-2664.13970