

# BOLETÍN DE LA OMM SOBRE LOS AEROSOLES

OBSERVACIONES INTEGRADAS DE LOS AEROSOLES ATMOSFÉRICOS

## Función del carbono negro en la investigación atmosférica y climática

Pensemos en los recientes episodios de intenso smog que han cubierto grandes ciudades como Beijing o París —una atmósfera calmosa bloquea la luz solar e impide que llegue al suelo—, en los voraces incendios forestales que periódicamente oscurecen los cielos de California en verano, en las tormentas de polvo en África o Australia que pueden afectar amplias áreas y perjudicar la salud de gran parte de la población, o en la capa grisácea que cubre los glaciares, cuya fusión se ve acelerada.

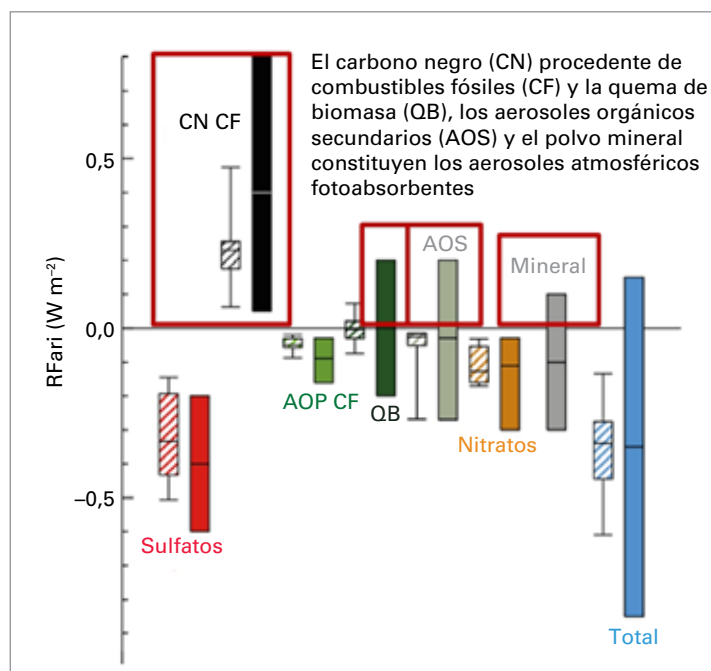
Los aerosoles, pequeñas partículas en suspensión en la atmósfera, son los principales responsables de todos los fenómenos citados. Provocan la dispersión de la luz solar y la absorben en grados distintos en función de sus propiedades físicas y ópticas. Ello trae como consecuencia, entre otras cosas, la alteración del balance de radiación de la Tierra y

la modificación del ciclo de vida de las cubiertas de hielo y nieve del planeta. En general, los aerosoles ejercen un efecto de enfriamiento del clima, hecho que en parte contrarresta el efecto de calentamiento de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, en determinadas circunstancias, también pueden causar un calentamiento adicional de la atmósfera.

A pesar de que encuentros mundiales, como la última Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CP 21), celebrada en París en noviembre de 2015, se centran exclusivamente en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), las partículas de aerosoles con capacidad de absorción de luz, o fotoabsorbentes, suscitan una creciente atención por su efecto de calentamiento del clima. En este sentido, en la CP 21 se debatió la aplicación de un Plan de Acción para el Transporte Ecológico de Mercancías destinado a reducir las emisiones de contaminantes de partículas finas procedentes del transporte mundial.

Entre las partículas de aerosoles fotoabsorbentes, aquellas compuestas mayoritariamente por materia con contenido de carbono, como el carbono negro, se han identificado como el segundo agente de forzamiento climático más importante, después del  $\text{CO}_2$ , y como uno de los denominados forzadores climáticos de vida corta más importantes. Se han convertido, asimismo, en un objetivo primordial para la investigación del impacto de los aerosoles en el clima y las estrategias de mitigación conexas.

En el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2013) se resumen las contribuciones de los principales tipos de aerosoles al forzamiento radiativo de los aerosoles fruto de la interacción entre estas partículas y la radiación (véase la figura 1). El forzamiento radiativo positivo y, por consiguiente, el potencial calentamiento global, está asociado con el carbono negro generado por la combustión incompleta de combustibles fósiles y biocombustibles, los aerosoles orgánicos primarios procedentes de combustibles fósiles y biocombustibles, los aerosoles originados por la quema de biomasa, los aerosoles orgánicos secundarios y el polvo mineral.

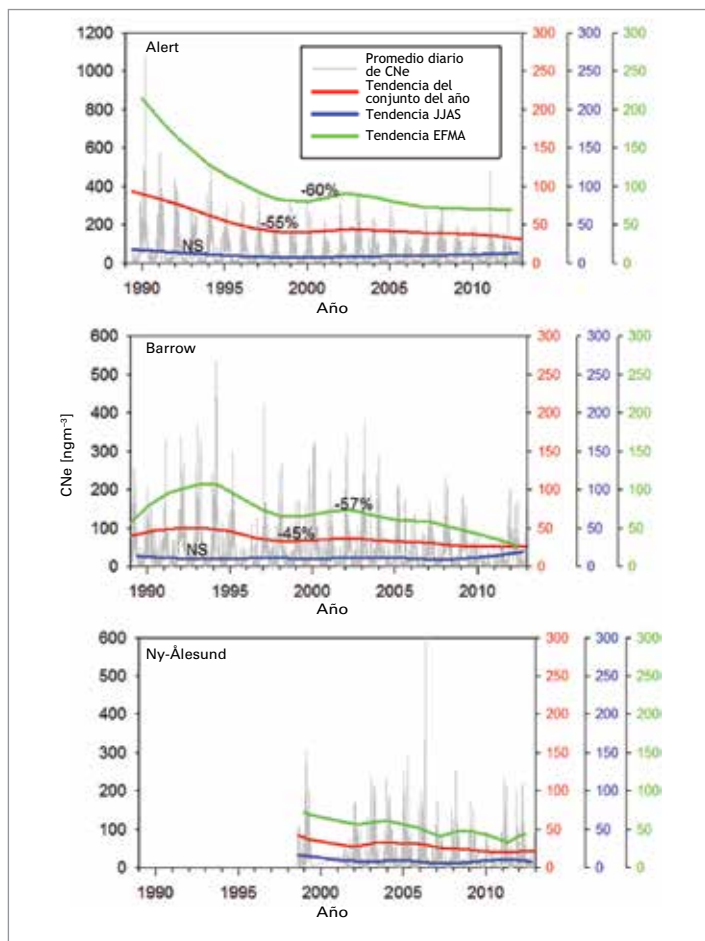


**Figura 1.** Promedio anual de forzamiento radiativo por aerosoles en capas superiores de la atmósfera a causa de la interacción entre aerosoles y radiación ( $R_{\text{fari}}$ ) en  $\text{W m}^{-2}$  debido a los diferentes tipos de aerosoles antropógenos, durante el período de 1750 a 2010 (IPCC 2013, capítulo 7).

## Medición del carbono negro en la red de la VAG

Una región que despierta un interés particular para el estudio de las tendencias a largo plazo de las concentraciones de masa de carbono negro es el Ártico, que se enfrenta a los impactos medioambientales más intensos de un clima en evolución a nivel mundial. Aunque solo existen fuentes menores de carbono negro en esta región, el impacto de las partículas de carbono negro fotoabsorbentes depositadas sobre la cubierta de hielo o nieve puede ser enorme. La vigilancia a largo plazo del carbono negro en el Ártico es fundamental para comprender las fuentes y las vías de transporte en esta región, así como también para proporcionar información esencial para la elaboración y la aplicación de opciones de mitigación.

El programa de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) opera una red de estaciones de medición mundial. Tres de ellas se encuentran en la costa del océano Ártico: Alert (Nunavut, Canadá), Barrow (Alaska, Estados Unidos de América) y Ny-Ålesund (Svalbard, Noruega). Alert y Barrow cuentan con los registros de mediciones más antiguos (desde 1989 hasta la actualidad), hecho que posibilita la determinación de tendencias significativas. Las observaciones ordinarias de concentraciones de masa de carbono negro no empezaron en Ny-Ålesund hasta 1998, por



**Figura 2.** Promedio diario de carbono negro equivalente (eBC, por sus siglas en inglés) en superficie en Alert y Barrow. La línea roja incluye todos los datos de carbono negro equivalente, la línea verde corresponde al promedio de enero a abril (JFMA), mientras que la línea azul corresponde al promedio de junio a septiembre (JJAS). Para cada línea de tendencia de Alert y Barrow se proporciona el cambio porcentual en el carbono negro equivalente entre el período de 1990 a 1993 y el período de 2009 a 2012. En estas ubicaciones se produjo un cambio no significativo (NS) en verano (publicado en Arctic Report Card 2013).

lo que las tendencias que se puedan extraer de esa estación no son directamente comparables con las de los otros dos emplazamientos. Sin embargo, entre los años 2002 y 2012, los promedios diarios de concentraciones de masa de carbono negro en Ny-Ålesund fueron similares a los registrados en Barrow y Alert, a pesar de la separación geográfica, un indicio de la ubicuidad del carbono negro en el alto Ártico.

En conjunto, se produjo una reducción del 55% en la carga de masa de carbono negro en Alert y del 45% en Barrow entre 1990 y 1993 y entre 2009 y 2012 (véase la figura 2). Estas disminuciones están relacionadas con la reducción en las emisiones por el colapso económico de la antigua Unión Soviética durante la primera parte del decenio de 1990 (Sharma y otros, 2013; Quinn y otros, 2008; Hirdman y otros, 2010). La carga de carbono negro en las estaciones del Ártico no ha aumentado desde el año 2000, a pesar del incremento en las emisiones de carbono negro procedentes de combustibles fósiles en las regiones de origen (Sharma y otros, 2013), en especial en Asia oriental. El aumento en las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles y biomasa en Asia oriental justifica un mayor estudio de las contribuciones de esa región a la acumulación de carbono negro en la atmósfera inferior del Ártico.

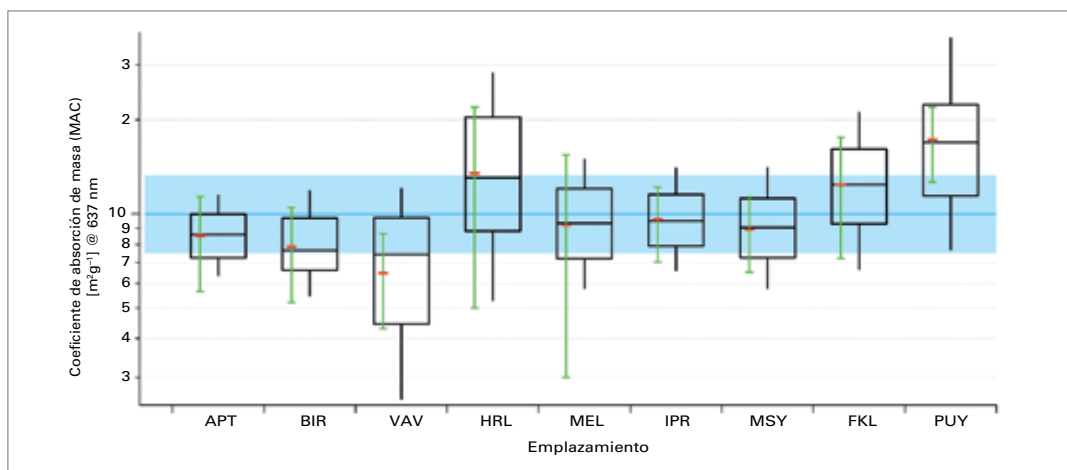
Se han empleado varios modelos de transporte atmosférico mundial para el análisis de las vías de llegada de estas partículas hasta la atmósfera inferior del Ártico. De este modo, se ha podido confirmar que las emisiones de Europa y de la antigua Unión Soviética han supuesto hasta el 85% de las concentraciones registradas en estos tres emplazamientos (Sharma y otros, 2013; Hirdman y otros, 2010), mientras que el carbono negro procedente de Asia oriental es el responsable únicamente de una pequeña parte de la deposición total en el Ártico porque su transporte se produce a mayores altitudes que el carbono negro de Europa y de la antigua Unión Soviética (Sharma y otros, 2013).

Además del transporte a gran distancia de carbono negro y partículas finas de las regiones industrializadas del hemisferio norte, el creciente impacto de las fuentes del propio Ártico, como la navegación en este océano y la combustión en antorcha, es objeto de identificación y de una cuidadosa vigilancia.

## Medición del carbono negro en la red de la VAG

La mayoría de redes de observación de todo el mundo recurren a métodos ópticos para la medición de la absorción de luz debida a aerosoles y la concentración de masa de carbono negro equivalente. En el Ártico, los registros más antiguos de concentraciones de masa de carbono negro equivalente se han obtenido mediante un instrumento óptico de filtro denominado aetalómetro. Este instrumento o el fotómetro de absorción multiángulo (MAAP, por sus siglas en inglés) son sencillos y robustos y, por tanto, son técnicas de uso generalizado en las redes de vigilancia.

La principal medición de cualquier método óptico es el coeficiente de absorción de luz debida a aerosoles  $\sigma_{abs}$ , que describe la cantidad de luz procedente de los rayos solares entrantes extinguida por la absorción de luz debida a aerosoles por unidad de longitud de la columna atmosférica penetrada. Esta cantidad se convierte en una concentración de masa de carbono negro equivalente mediante la relación  $CNe = \sigma_{abs} / MAC$ , donde MAC es el coeficiente de absorción de masa. Este coeficiente depende en gran medida de las propiedades de las partículas, como la composición química o el tamaño, entre otras, y presenta diferencias según el emplazamiento de observación y la estación.



**Figura 3.** Coeficiente de absorción de masa (MAC) de nueve superemplazamientos europeos. Las barras de error verdes indican las incertidumbres  $1\sigma$  del valor de la media geométrica, que depende de la técnica de medición empleada. La línea azul y la zona sombreada indican la media geométrica  $\pm$  desviación estándar geométrica de la media geométrica de los valores de MAC de todos los emplazamientos (Zanatta y otros, 2016).

Tradicionalmente, se daba por sentado que el cambio en la transmisión óptica se debía exclusivamente al carbono negro. En la actualidad, es bien sabida la necesidad de ajuste de los datos sobre carbono negro equivalente para tener en cuenta otros aerosoles, y se han elaborado diversos métodos de corrección.

A pesar de que la medición de la absorción de luz debida a aerosoles es un procedimiento establecido, la comunidad científica prosigue con el debate para la fijación de un método normalizado de determinación de los valores del MAC. Europa ha establecido un valor de MAC "de fondo regional europeo" =  $10,8 \pm 3,0 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  (longitud de onda 637 nm; Zanatta y otros [2016]) a partir de las observaciones a largo plazo realizadas en 10 superemplazamientos de fondo regional europeo, cuyos valores oscilan entre  $6$  y  $16 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  según el emplazamiento de medición, el origen de la masa de aire o la estación (véase la figura 3). Los valores del MAC son un parámetro sumamente crítico porque cada grupo de investigación utiliza un enfoque distinto para obtenerlos y, como consecuencia, existen grandes diferencias entre las concentraciones de masa de carbono negro notificadas.

## Notificación de las observaciones de carbono negro

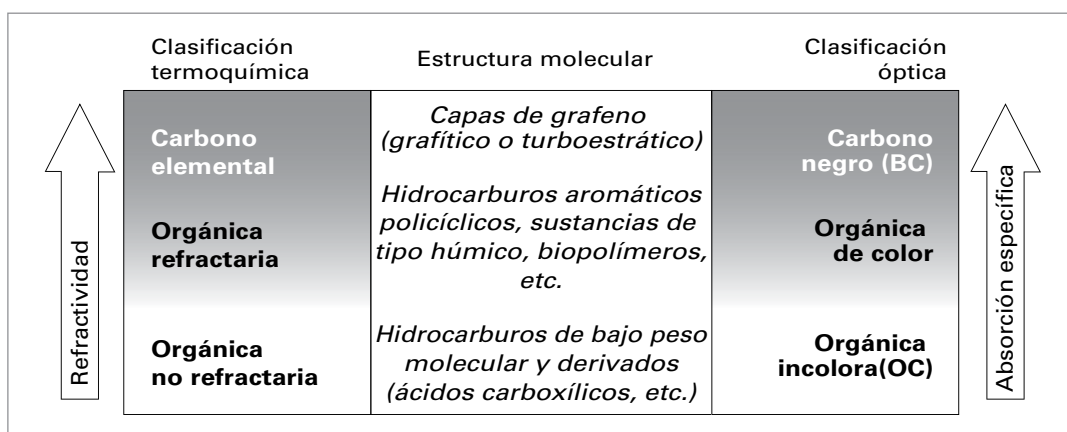
A pesar del importante papel que se les ha reconocido en el clima mundial, las estimaciones actuales de forzamiento radiativo en capas superiores de la atmósfera debido a forzadores climáticos de corta vida todavía mantienen su incertidumbre, en parte por la falta de una definición coherente de los componentes de aerosoles carbonáceos y los correspondientes métodos de medición.

La materia carbonácea constituida principalmente por átomos de carbono y estructurada en forma de grafito (carbono elemental) presenta una intensa capacidad fotoabsorbente y, por tanto, se caracteriza por su aspecto negro (carbono negro), aunque muestra una importante refractividad térmica. Por su parte, la materia carbonácea formada por compuestos complejos de carbono, hidrógeno y oxígeno (carbono orgánico) es menos refractiva térmicamente y se caracteriza por su aspecto transparente o parduzco. Estas propiedades diferenciadas (véase la figura 4) tienen su origen en la estructura molecular subyacente del constituyente del aerosol y dan lugar a un conjunto de técnicas de medición sumamente diverso.

La investigación atmosférica no cuenta con una definición inequívoca de carbono negro ni con una terminología clara para la notificación de observaciones de carbono negro en las redes mundiales de observación atmosférica. Asimismo, la elaboración de inventarios coherentes de fuentes y sumideros de partículas de carbono fotoabsorbentes es otra condición previa esencial para la reducción de la gran diversidad en las estimaciones existentes del efecto climático de los aerosoles carbonáceos.

Los hechos siguientes marcan los retos principales conexos a la medición del carbono negro:

- La materia carbonácea no aparece en los aerosoles atmosféricos como sustancia pura.
- Las mediciones pueden hacer referencia a la misma cantidad de aerosol carbonáceo, pero con distintos nombres; por



**Figura 4.** Clasificación de materias de los aerosoles carbonáceos (Pöschl, 2003).

- ejemplo, carbono negro o carbono elemental.
- Puede emplearse el mismo nombre para hacer referencia a mediciones de cantidades diferentes.
- Los métodos actuales responden a propiedades diferentes del carbono negro.
- Con frecuencia existe una elevada interdependencia entre métodos de medición de carbono negro distintos, pero las relaciones presentan diferencias en función del emplazamiento, la estación y el tipo de aerosol.

El Grupo consultivo científico (GCC) de la VAG sobre aerosoles ha emprendido una iniciativa de armonización de la terminología y aclaración del proceso de notificación de datos relativos al carbono negro en las redes de vigilancia mundial. Los métodos de medición relevantes para las observaciones ordinarias de aerosoles carbonáceos se pueden agrupar en tres "familias de métodos" principales:

Los métodos de carbono evolucionado consisten en métodos analíticos térmicos y de gas combinados para el análisis de productos de gasificación que evolucionan a partir de una muestra de filtro calentada y utilizan la resistividad térmica de la fracción del "carbono elemental".

Los métodos de absorción de luz recurren a la sección eficaz volumétrica de absorción de luz, denominada habitualmente coeficiente de absorción de luz ( $\sigma_{abs}$ ), como la técnica óptica descrita con anterioridad.

Los métodos de incandescencia inducida por láser detectan partículas con contenido de carbono mediante la absorción de energía radiativa intensa que se transforma en calor y supone la reemisión de radiación térmica.

Además, existen numerosos métodos en uso basados en Raman, microscopía electrónica o espectrometría de masas (véase Petzold y otros [2013] para obtener más información al respecto).

## Terminología recomendada

El GCC de la VAG sobre aerosoles propone la siguiente terminología uniformizada en función de las propiedades del material en cuestión:

- La masa de carbono total describe la masa de toda la materia carbonácea en las partículas en suspensión en el aire.
- El carbono negro describe cualitativamente las sustancias con contenido de carbono y capacidad de absorción de luz presentes en el aerosol. En el caso de aplicaciones cuantitativas, este término requiere aclaración.
- El carbono negro equivalente se utiliza en lugar del carbono negro para los datos obtenidos con métodos de absorción óptica, junto con un valor adecuado de MAC para la conversión de la absorción de luz en concentración de masa.
- El carbono elemental se utiliza en lugar del carbono negro para los datos obtenidos con métodos específicos del contenido en carbono de la materia carbonácea.
- El carbono negro refractario se utiliza en lugar del carbono negro para los datos obtenidos con métodos de incandescencia.
- La carbonilla es un término cualitativo que resulta de utilidad cuando se hace referencia a las partículas carbonáceas generadas por combustión incompleta.

## Referencias seleccionadas

- Hirdman D. y otros, 2010: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 669-693.
- IPCC, 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, (Reino Unido) y Nueva York, NY (Estados Unidos de América), 1355 págs.
- Petzold, A. y otros, 2013: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 8365-8379.
- Pöschl, U., 2003: *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 375, 30-32, 2003.
- Quinn, P.K. y otros, 2008: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 1732-1735.
- Sharma, S. y otros, 2013: *Journal of Geophysical Research*, 118, D017774
- Zanatta, M. y otros, 2016: Atmospheric Environment (en prensa).

<b>Acerca del Boletín sobre aerosoles</b>	El Boletín sobre aerosoles ofrece información general sobre los aerosoles en el marco de la VAG y se centra en componentes o aplicaciones específicos de las mediciones de aerosoles en este programa.
<b>Inclusión en la VAG</b>	El procedimiento se describe en <a href="http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/join_GAW.html">http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/join_GAW.html</a>
<b>Obtención de datos</b>	Descargue datos obtenidos en tierra <i>in situ</i> , sobre LIDAR y el espesor óptico de los aerosoles de <a href="http://www.gaw-wdca.org/">http://www.gaw-wdca.org/</a> , y datos satelitales de <a href="http://wdc.dlr.de/data_products/AEROSOLS/">http://wdc.dlr.de/data_products/AEROSOLS/</a>
<b>Realización de mediciones</b>	Siga los principios normalizados de operación y las directrices de medición de <a href="ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/arep/gaw/gaw153.pdf">ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/arep/gaw/gaw153.pdf</a> y <a href="http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/FINAL_GAW_200_web.pdf">http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/FINAL_GAW_200_web.pdf</a> .
<b>Más información</b>	Se dispone de más información acerca de la VAG en <a href="http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html">http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html</a> , del Sistema de información de las estaciones de la VAG en <a href="http://gaw.empa.ch/gawsis/">http://gaw.empa.ch/gawsis/</a> , y del GCC sobre aerosoles en <a href="http://gaw.tropos.de/index.html">http://gaw.tropos.de/index.html</a> . Las preguntas relativas al contenido del presente Boletín deben dirigirse a Silvana Carou ( <a href="mailto:scarou@wmo.int">scarou@wmo.int</a> )