

MEDIDAS DE RADIACIÓN SOLAR Y AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN EL ÁRTICO

Measures of solar radiation and atmospheric aerosols in the Arctic

Elena Montilla-Rosero¹

Resumen

La investigación de los procesos que gobiernan el cambio ambiental y sus sistemas de predicción y seguimiento en las regiones polares es de gran importancia debido a la alta sensibilidad de estas zonas a los impactos naturales y antropogénicos. Los aerosoles atmosféricos tienen un impacto significativo en la transmisión de la radiación solar a través de la atmósfera, por lo tanto, el estudio de estas partículas es uno de los factores clave en cuanto al cambio climático del planeta y sus efectos. El GOA-UVa ha realizado un importante trabajo de investigación sobre la caracterización de las propiedades de los aerosoles, tanto en la península ibérica como en la zona ártica europea. En este trabajo se presenta una visión general de la importancia del estudio de los aerosoles en la zona ártica, y algunos de los resultados de la caracterización de estas partículas en la zona.

Palabras clave: Radiación solar, aerosol atmosférico, absorción de luz

Abstract

The research on the processes that govern the environmental change and its prediction and monitoring systems in Polar Regions is of great importance due to the high sensitivity of these areas to natural and anthropogenic impacts. Atmospheric aerosols have a significant impact on the transmission of solar radiation through the atmosphere; therefore, the study of these particles is a key factor in regards to climate change and those effects. The Atmospheric Optics Group of the University of Valladolid (GOA-UVa) have been carried out a strong research work on the characterization of aerosol properties, both in the Iberian Peninsula and in the European Arctic. This paper presents an overview about the importance of the aerosol's study in the Arctic, and some of the results on aerosol characterization in the area.

Key words: Solar radiation, atmospheric aerosol, light absorption.

¹ Grupo de Óptica Atmosférica, Universidad de Valladolid.

1. Introducción

La radiación solar es la principal fuente de energía para el sistema tierra-atmósfera y, directa o indirectamente, es la responsable de todos los fenómenos que afectan su meteorología y climatología. La variación de cualquiera de los elementos que componen el sistema, provoca la ruptura del equilibrio radiativo y el consiguiente desplazamiento de éste hacia nuevas condiciones, que en último término se traduce en cambios en su temperatura (IPCC, 2001; IPCC, 2007). Actualmente, gran cantidad de trabajos científicos están encaminados a estudiar algunas de las situaciones señaladas como responsables de las variaciones en el equilibrio de este sistema, entre éstas, el denominado agujero de ozono, el incremento en las concentraciones de CO₂ y las variaciones en la cantidad de aerosoles presentes en la atmósfera.

Las elevadas incertidumbres en los valores de los parámetros característicos de los aerosoles, hacen indispensable la realización de frecuentes campañas de medida en diversos lugares para obtener datos globales necesarios para los modelos climáticos, utilizando diferentes técnicas e instrumentos (Petzold et al., 2005; Virkkula et al., 2005; Sedlacek and Lee, 2007). Una de las regiones que más interés ha suscitado en las últimas décadas para realizar este tipo de mediciones debido a su alta sensibilidad a las variaciones introducidas por los aerosoles y a su impacto medioambiental, es la región Ártica (Patterson et al., 1982; Law and Stohl 2007). El estudio de las propiedades microfísicas, ópticas y radiativas de los aerosoles en esta región, podría convertirse en una alarma temprana del cambio climático global, puesto que en esta región las interacciones entre la radiación solar, los aerosoles y las nubes magnifican el impacto radiativo de los aerosoles atmosféricos (Engvall et al., 2008).

En este trabajo se presenta la definición de los aerosoles atmosféricos, su importancia e incidencia en el clima del planeta, una descripción sencilla de algunos instrumentos usados para estas medidas y algunos de los resultados obtenidos por el Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVa) en la más reciente campaña de medida realizada en la estación subártica de ALOMAR.



Fig. 1. Aerosoles atmosféricos naturales

2. Los aerosoles atmosféricos

Los aerosoles son las partículas sólidas o líquidas que se encuentran suspendidas en la atmósfera y cuya influencia resulta fundamental en el clima del planeta. Por su origen, los aerosoles atmosféricos se clasifican en naturales, compuestos principalmente por cenizas volcánicas, esporas, polen, sal marina o polvo natural (Fig. 1. Aerosoles atmosféricos naturales) y antropogénicos, derivados de la actividad humana, tales como, el humo de chimeneas, partículas minerales surgidas de procesos industriales o las partículas producidas fotoquímicamente a partir de contaminantes gaseosos (Fig. 2. Aerosoles antropogénicos). Su presencia se debe a causas diversas: combustiones por procesos industriales, calefacciones, productos generados en la misma atmósfera por reacciones químicas entre sustancias como sulfatos, nitratos o productos gaseosos, movimientos de masas de aire que arrastran consigo partículas marinas o polvo desértico.

Las partículas así generadas son eliminadas de la atmósfera mediante acción gravitatoria, coagulación, condensación y su posterior precipitación. Todo ello implica un tiempo de vida de estas partículas en la atmósfera que puede variar de minutos a semanas en la troposfera, y llegar a los años si tales partículas alcanzan la estratosfera (común tras las

erupciones volcánicas, por ejemplo), ya que ahí los procesos de eliminación tales como la condensación o la precipitación no se producen.



Fig. 2. Aerosoles antropogénicos

3. Importancia del estudio de los aerosoles atmosféricos

Haciendo un repaso de la influencia de estas partículas atmosféricas en el planeta, se obtiene de forma natural y directa la importancia del estudio de los aerosoles. De forma sucinta se puede mencionar que en las últimas décadas, ha sido de innegable interés la determinación del forzamiento radiativo (radiative forcing), definido como la contribución de los aerosoles al clima del planeta, especialmente centrada en los procesos producidos por estas partículas o en su interacción con la radiación solar. Así, su contribución es considerada habitualmente como negativa (en el signo, es decir, que su aparición masiva tiende a disminuir la temperatura del planeta, desequilibrando en sentido negativo el balance energético del mismo) (Fig. 3. Valores del forzamiento radiativo). Sin embargo, es característico del aerosol atmosférico que este forzamiento sea enormemente variable, tanto espacial como temporalmente, por las múltiples contribuciones posibles (Haywood and Boucher, 2000; Shine and Forster, 1999).

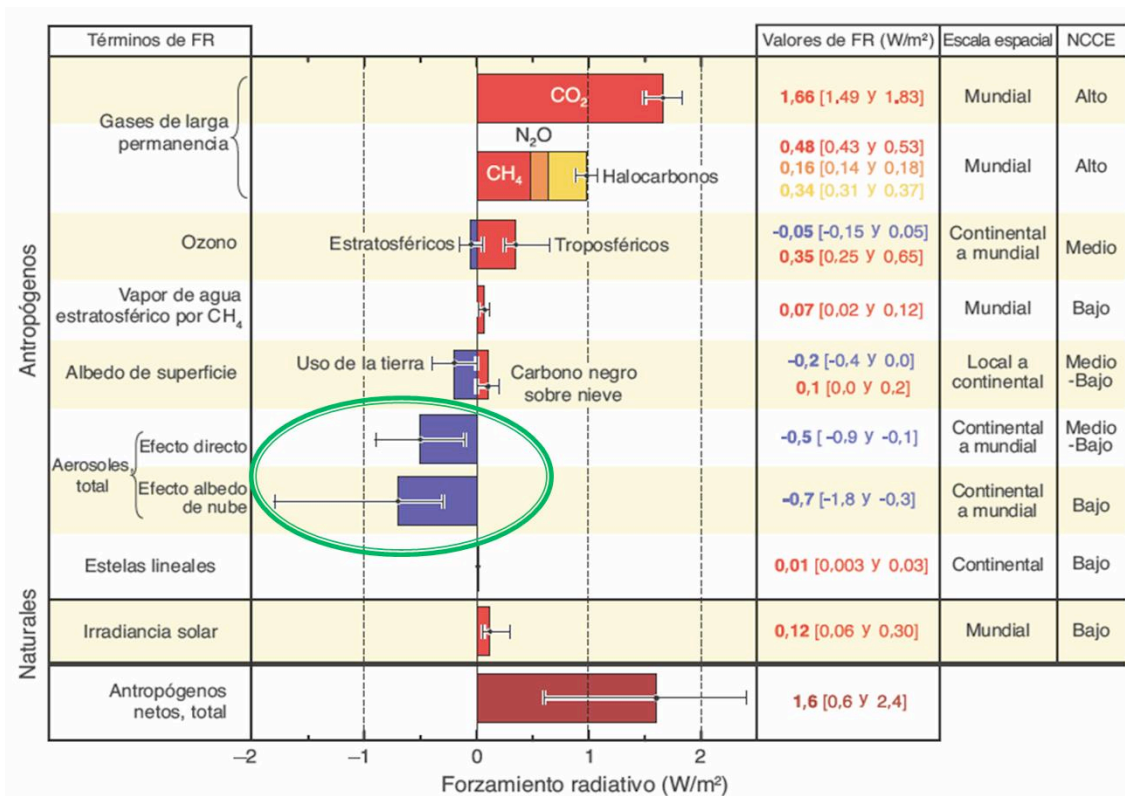


Fig. 3. Valores del forzamiento radiativo

Teniendo en cuenta que los aerosoles no son sólo el resultado de condensaciones de productos gaseosos sino que, dadas sus distintas composiciones éstos pueden interactuar entre sí, tienen un papel fundamental en la química atmosférica (Jaeknick, 1988); NRC, 1996). Este hecho se evidencia en la influencia de estas partículas en la aparición de una mayor o menor cantidad de nubes, como también y más determinante, en la formación del agujero de ozono sobre la Antártida (Molina and Rowland, 1974; Hofmann et al., 1994).

Finalmente, cabe mencionar la forma en la que las partículas de aerosoles presentes en la atmósfera determinan la calidad del aire. La contribución de las partículas en la contaminación atmosférica es importante en diferentes aspectos. Por ejemplo, en estudios de visibilidad (Sisler and Maln, 1994) (Fig. 4. Efectos en la visibilidad), o en estudios de salubridad pública, en los que se ha encontrado que los aerosoles actúan como agentes causantes de alergias o enfermedades de las vías respiratorias.

Dentro de todos los campos de acción de los aerosoles, es importante resaltar la enorme influencia de los seres humanos en la carga total de aerosoles presentes en el planeta, debido a su actividad industrial, transportes, cambio del uso del suelo, etc. Aerosoles de composiciones muy diversas y, sobre todo, ajenos hasta ahora al entorno natural atmosférico están provocando efectos de los que tenemos constancia (como por ejemplo

el de los CFC en la formación del agujero de ozono) y que siguen afectando la salud del planeta tierra (Fig. 5. Efecto de la presencia de aerosoles en el planeta).

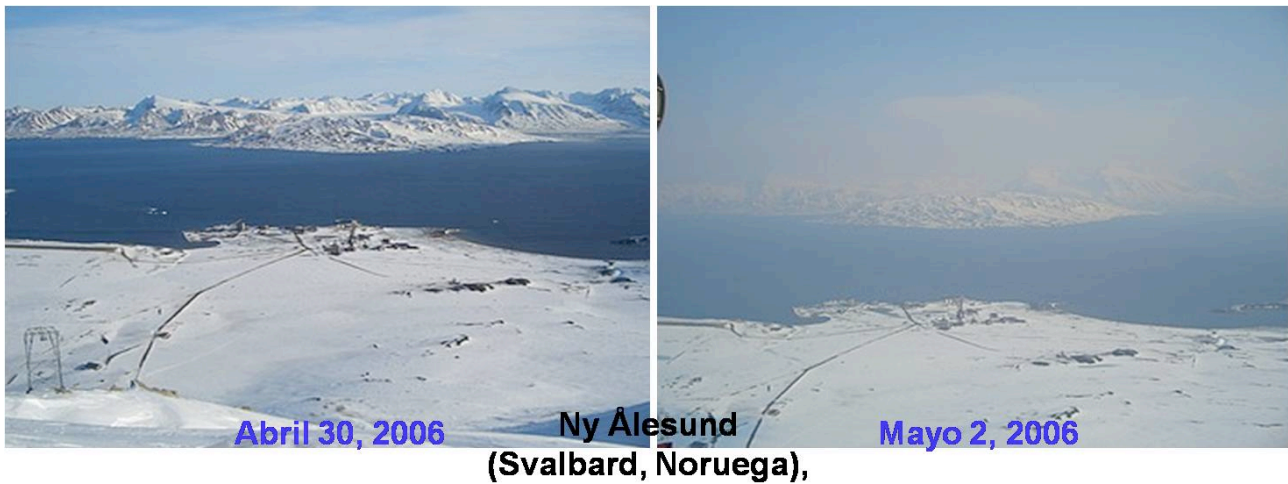


Fig. 4. Efectos en la visibilidad

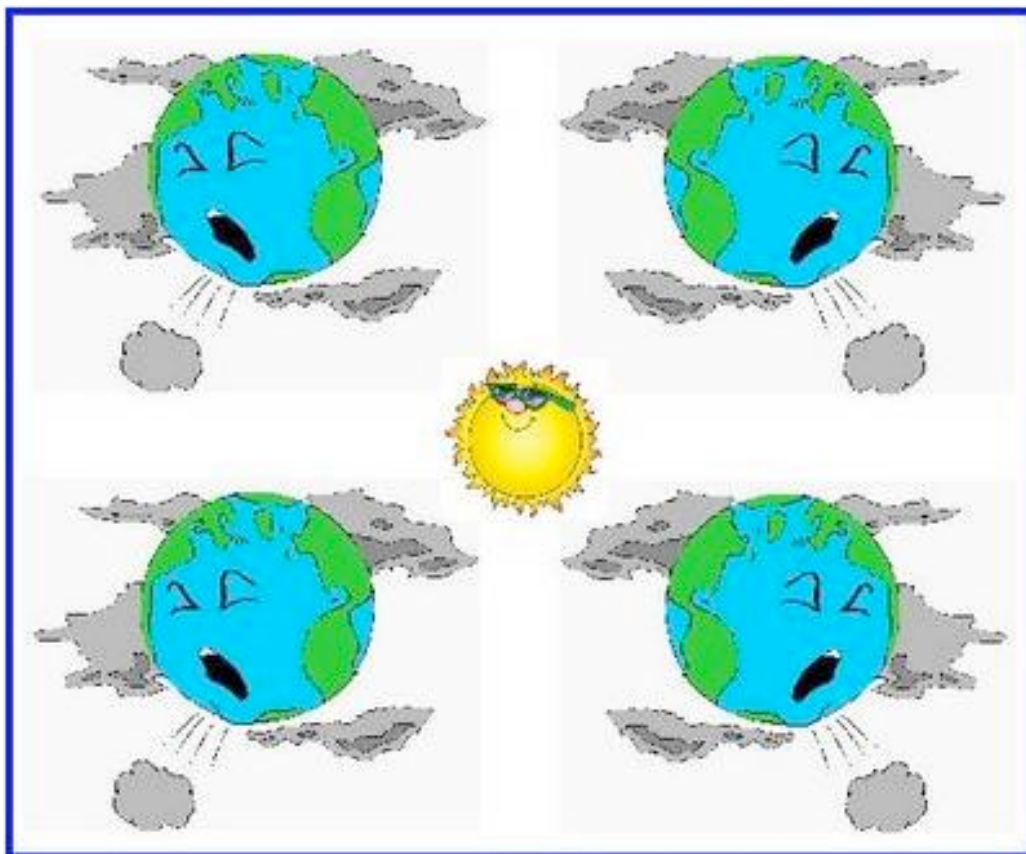


Fig. 5. Efecto de la presencia de aerosoles en el planeta

4. Plan de acción y sostenibilidad en el planeta

La monitorización continua de las propiedades de los aerosoles es crucial en la determinación del papel de estas partículas en el clima del planeta, en los cambios en la ca-

lidad regional del aire y en el establecimiento de bases científicas para tomar decisiones políticas en cuanto a estrategias de control del medio ambiente (EPA, 1996; WMO 2003).

El Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVA, <http://goa.uva.es>) contribuye a la detección y análisis de los aerosoles atmosféricos a través de tres campos de estudio dentro de esta área: 1. Medida y modelación de la radiación solar, 2. Realización de campañas de medida en diferentes puntos del continente Europeo y 3. Elaboración de la climatología y la detección remota de los aerosoles. Dentro de este último ítem cabe destacar la participación del GOA desde el año 2000 en la red AERONET de la NASA (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) a través de diferentes estaciones fotométricas tanto dentro como fuera de España (*i.e.* Palencia, Camagüey (Cuba), Andenes (Noruega), Fig. 6. *Estaciones del medida del GOA*). Así mismo, lidera y gestiona la Red Ibérica de Medida de Aerosoles (RIMA, <http://www.rima.uva.es/RIMA/>), en colaboración con el CIAI (Centro de Investigación Atmosférica de Izaña, Tenerife) de AEMET, y con el apoyo de PHOTONS (Universidad de Lille, Francia) y AERONET (NASA).

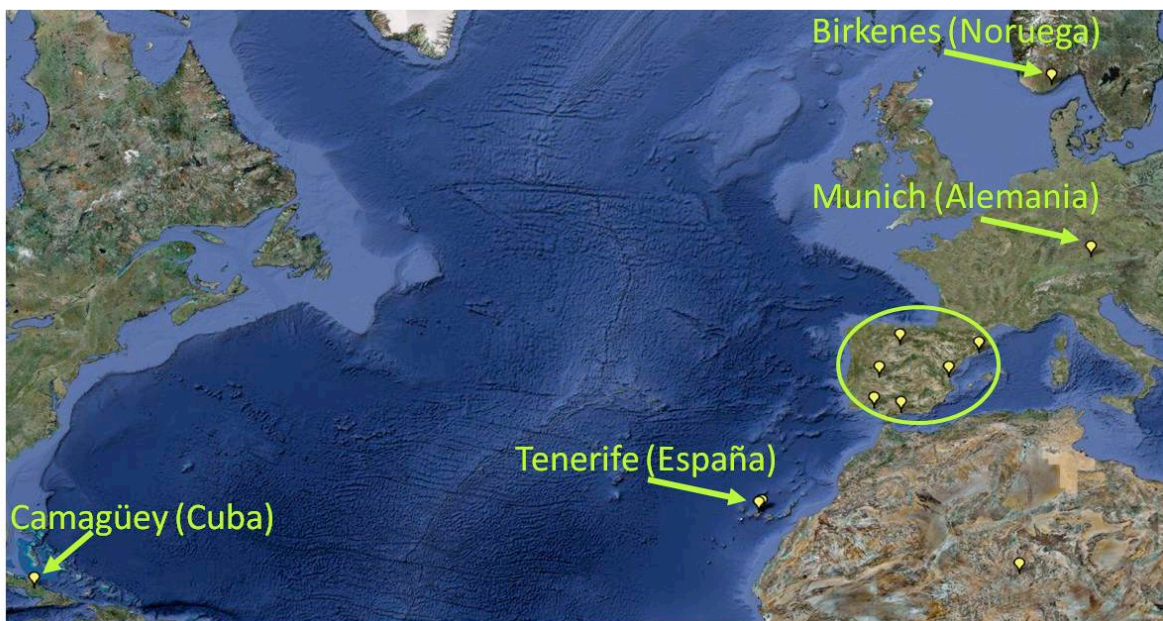


Fig. 6. *Estaciones del medida del GOA*

5. Instrumentación y campañas de medida

La presencia de un determinado tipo de aerosol en la atmósfera puede ser detectada y estudiada por varios medios. El método más directo consiste en recoger muestras suficientes a lo largo de toda la columna atmosférica y analizarlas posteriormente en el laboratorio. Debido a los costos y a las deficiencias tecnológicas aún presentes, se plantean como alternativas las medidas *in situ*, realizadas a nivel de suelo o con instrumentos

embarcados en un avión; ó las medidas de detección remota, en las que se determinan propiedades específicas a partir del efecto que la presencia de los aerosoles provoca en la radiación solar que atraviesa la atmósfera y llega hasta el suelo. Este tipo de instrumentación y técnicas es también la que se utiliza en los satélites artificiales para el estudio de la atmósfera y de la superficie terrestre.

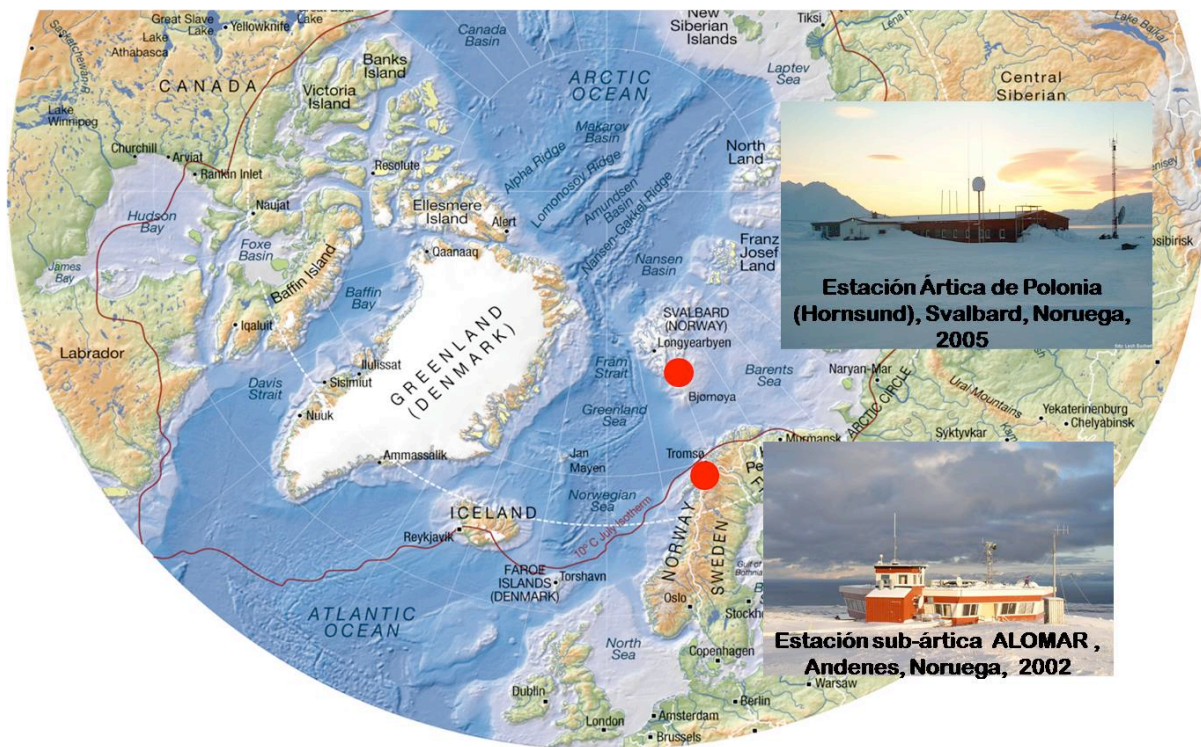


Fig. 7. Ubicación geográfica de estaciones árticas

El GOA-UVA cumpliendo con uno de sus objetivos de estudio, ha realizado diferentes campañas en la zona ártica y sub-ártica del continente Europeo (Fig. 7. *Ubicación geográfica de estaciones árticas*) y específicamente, desde el año 2002 ha realizado intensivas campañas de medida en la estación sub-ártica de ALOMAR², gracias al apoyo de los programas ARI (*ALOMAR Research Infrastructure*) y eARI (*enhanced ALOMAR Research Infrastructure*) ofrecidos por la estación, dentro del VI programa marco de la Unión Europea; y al Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) de España. Además, las campañas de verano de los años 2007 y 2008, estuvieron incluidas en el proyecto POLAR-CAT³, liderado por el NILU⁴. Este proyecto ha sido uno de los 200 proyectos incluidos en el Año Polar Internacional, una gran campaña, intensiva e interdisciplinar de investigación, coor-

² ALOMAR, acrónimo del nombre inglés *Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research* (<http://alomar.rocketrange.no/>).

³ POLAR-CAT, acrónimo de *Polar Study using Aircraft, Remote Sensing, Surface Measurements and Models, of Climate, Chemistry, Aerosols, and Transport*.

⁴ NILU, acrónimo para el nombre noruego *Norwegian Institute for Air Research*.

dinada internacionalmente y que ha tenido como objetivo cuantificar y mejorar el conocimiento de la evolución natural, medioambiental y social de las regiones polares, como también, mejorar la comprensión de los procesos polares y el desarrollo o mejoramiento de los sistemas de observación.



Fig. 8. Ubicación geográfica de la estación ALOMAR

El principal objetivo de estas campañas árticas, ha sido la caracterización de los aerosoles atmosféricos, enfocada especialmente en las propiedades ópticas y radiativas en columna. El observatorio ALOMAR (<http://alomar.rocketrange.no/>), ubicado a $69^{\circ} 16' 42''$ Norte, $16^{\circ} 00' 31''$ Este y a una altura de 380 m, en la isla de Andøya al norte de Noruega (Fig. 8. *Ubicación geográfica de la estación ALOMAR*), ofrece condiciones ideales para la investigación relacionada con fenómenos atmosféricos árticos como las nubes noctilucientes, la capa de ozono y la llegada y efectos de los aerosoles desde Europa y Asia en las zonas árticas (Fig. 9. *Vista de la estación ALOMAR durante la noche ártica*).

Para cumplir con los objetivos establecidos para la campaña, se trasladó y dispuso diferente instrumentación para medidas tanto espectralradiométricas y fotométricas como para medidas *in situ* (Fig. 10. *Instrumentos de medida en la terraza del observatorio ALOMAR*). Se describen a continuación algunos de los resultados obtenidos en estas campañas de medida.



Fig. 9. Vista de la estación ALOMAR durante la noche ártica



Fig. 10. Instrumentos de medida en la terraza del observatorio ALOMAR



Fig. 11

6. Resultados

Dentro de los resultados adquiridos a partir de las medidas fotométricas realizadas en la estación ALOMAR, se debe mencionar que estas medidas fueron obtenidas utilizando un fotómetro CIMEL (Fig. 11) de la red AERONET de la NASA. Este instrumento mide permanentemente en esta estación desde el año 2006, y la mayor parte de las medidas se obtienen gracias al mayor número de horas de sol durante el verano o la estación del sol de media noche, durante los meses de junio, julio y agosto (Fig. 12). A partir de estas medidas se permite destacar la baja influencia que durante el verano pueden tener las fuentes

de aerosol antropogénico, mientras que los aerosoles marinos y continentales tienen alta presencia en el lugar de medida, como se ha comprobado en el detallado análisis presentado por Rodríguez (2009) para la estación de ALOMAR entre los años 2001 y 2007 (Fig. 13).

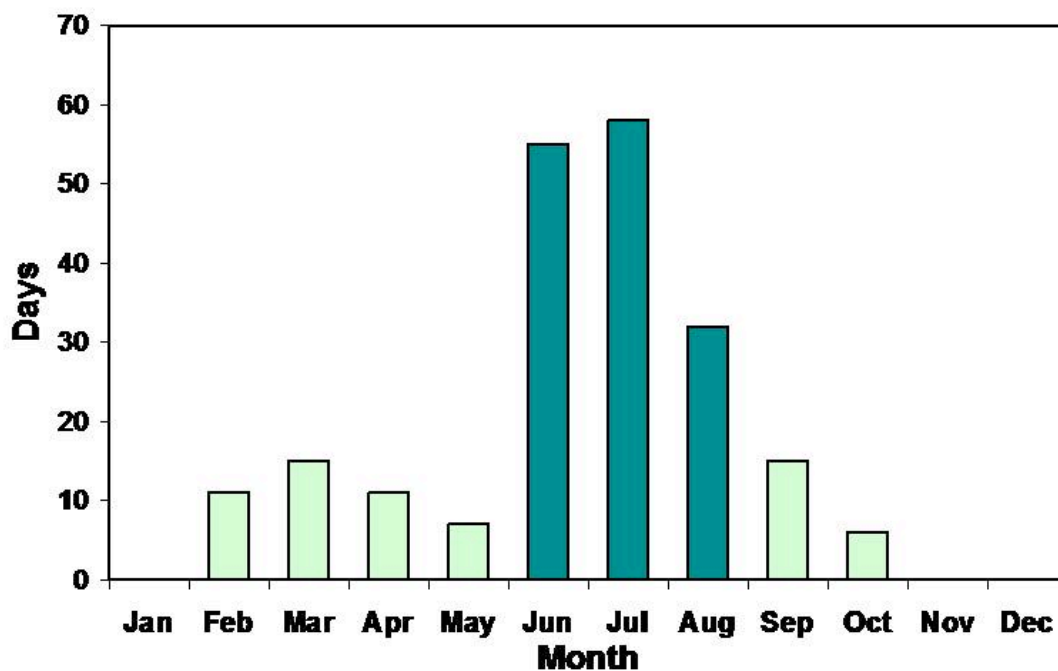


Fig. 12

Entre las medidas de detección remota a nivel de suelo realizadas en esta estación, se encuentran las medidas espectroradiométricas. Estas medidas se han realizado utilizando un espectroradiómetro ASD (Fig. 14), operando en conjunto con un receptor coseno para las medidas de Irradiancia Global (Fig. 15. *Espectro de irradiancia global solar a 500 nm*) y con un seguidor solar 2AP (Fig. 16) para las medidas de Irradiancia Directa (Fig. 17. *Irradiancia solar espectral directa*). Las medidas de irradiancia global solar de la campaña de verano 2008 han sido utilizadas en el modelo de transferencia radiativa UVA-GOA (Cachorro, 1985; Cachorro et al, 2000) para la determinación semi-empírica de uno de los parámetros radiativos más relevantes en el estudio de los aerosoles atmosféricos, conocido como albedo de *scattering* simple, fundamental en la obtención del forzamiento radiativo de los aerosoles (Montilla-Rosero 2010). Este tópico continúa actualmente en estudio y desarrollo dentro del GOA-UVa.

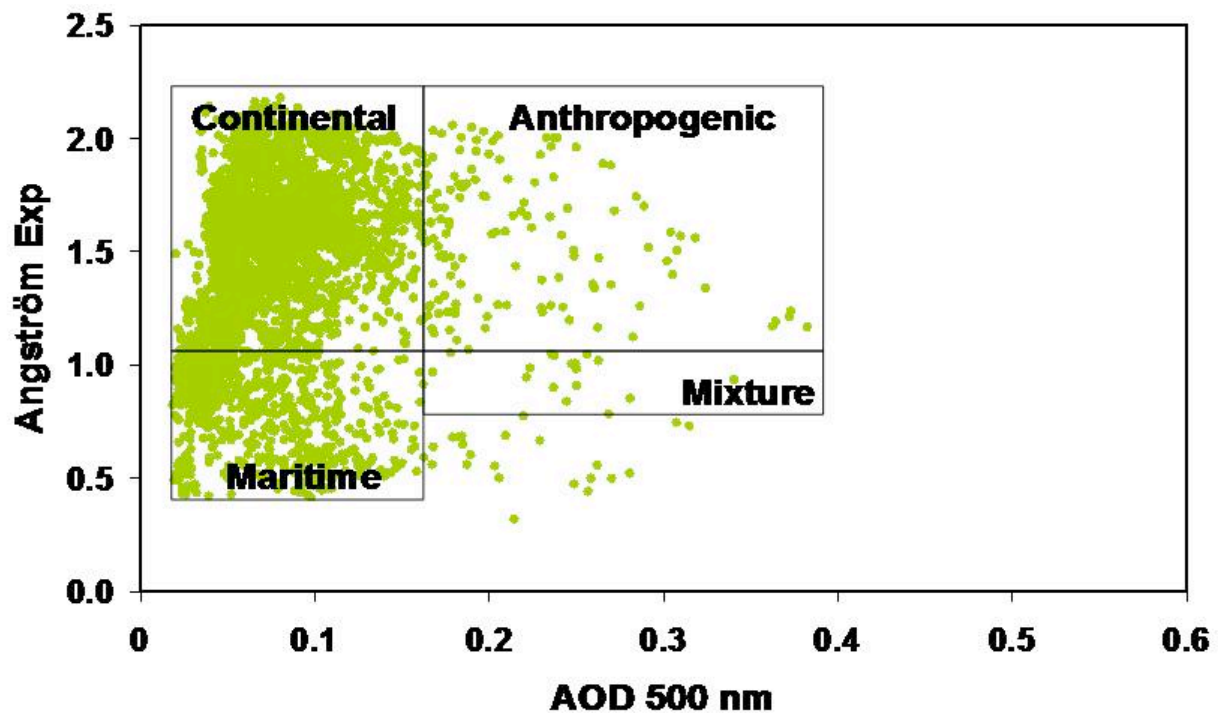


Fig. 13

Para las medidas *in situ* se han utilizado los siguientes instrumentos, midiendo simultáneamente: un impactador en cascada DEKATI (Fig. 18), un fotómetro PSAP (Fig. 19) y un nefelómetro (Fig. 20). Estos instrumentos utilizan un sistema de entrada de aire común (Fig. 21. *Entrada al sistema de distribución de aire*), protegido de la lluvia y la entrada de insectos, y un sistema de distribución de aire que controla la humedad relativa para mantenerla por debajo del 40% y garantizar el buen funcionamiento de los equipos de medida.



Fig. 14

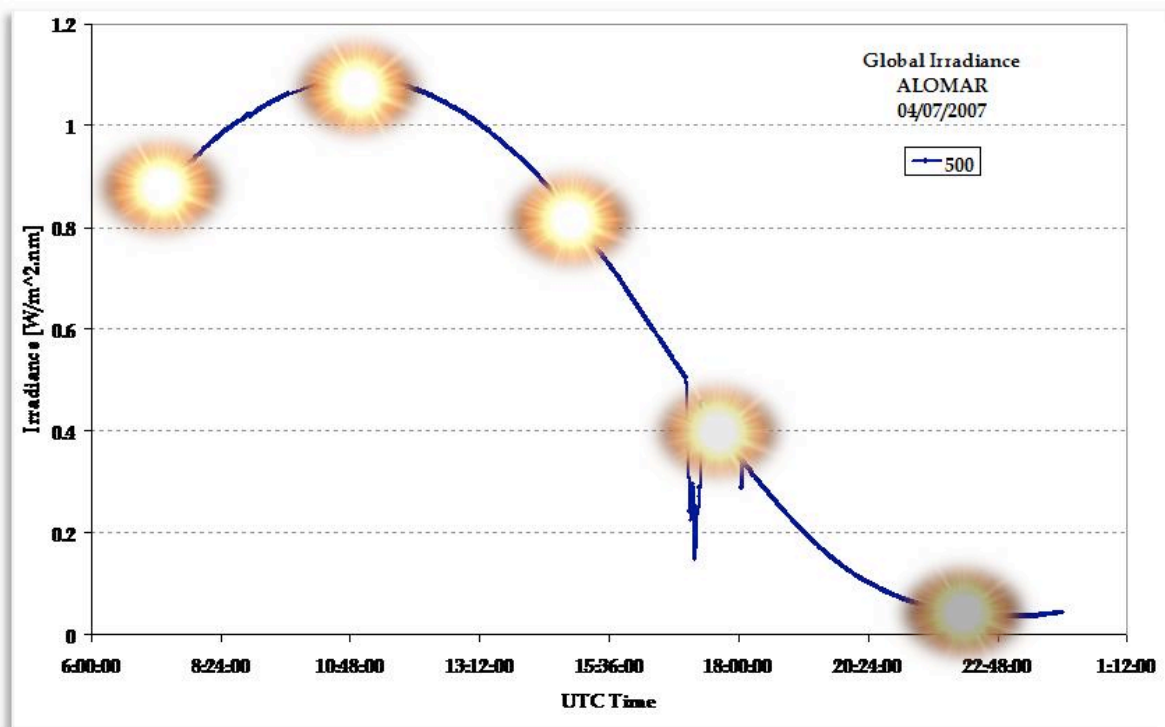


Fig. 15. Espectro de irradiancia global solar a 500 nm



Fig. 16

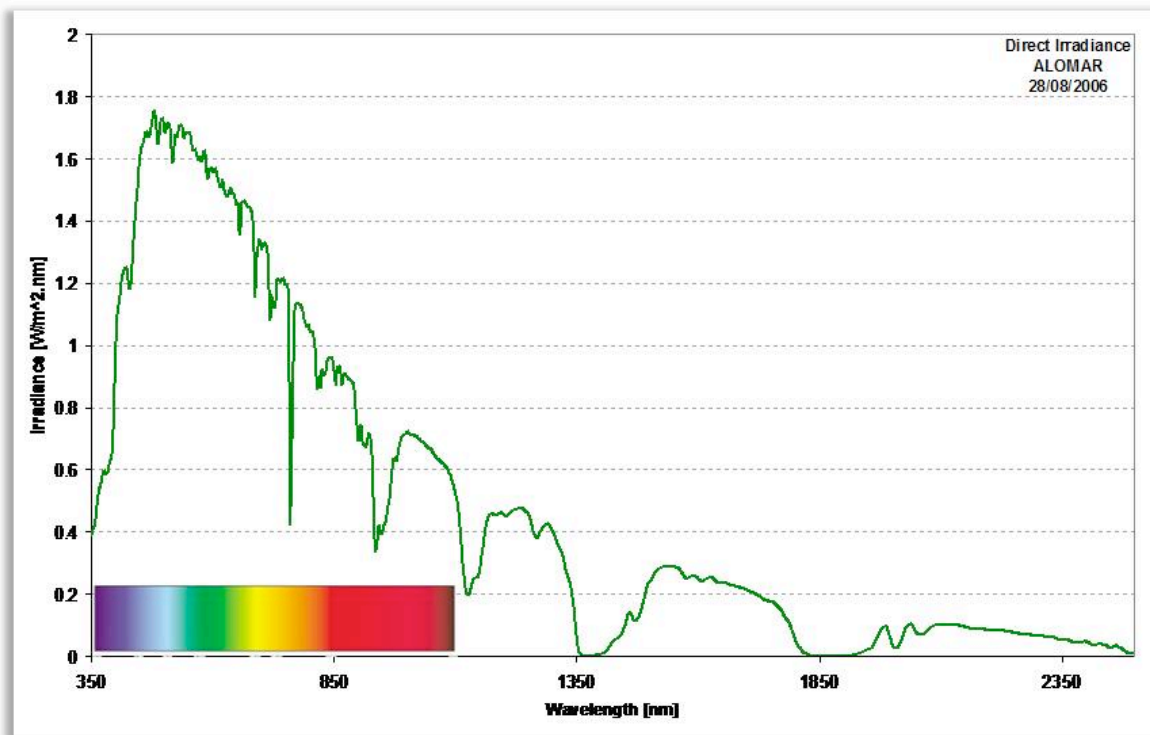
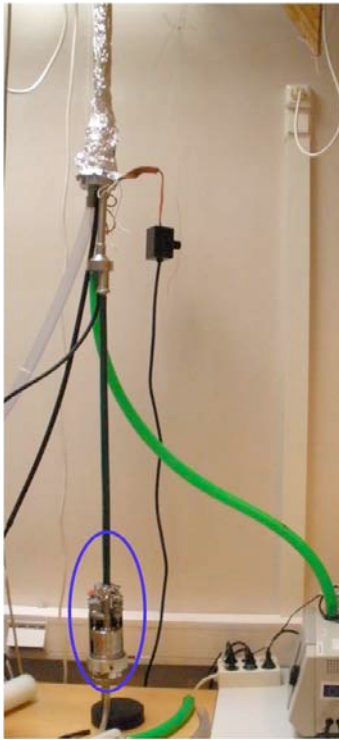


Fig. 17. Irradiancia solar espectral directa



Figs. 18 y 19

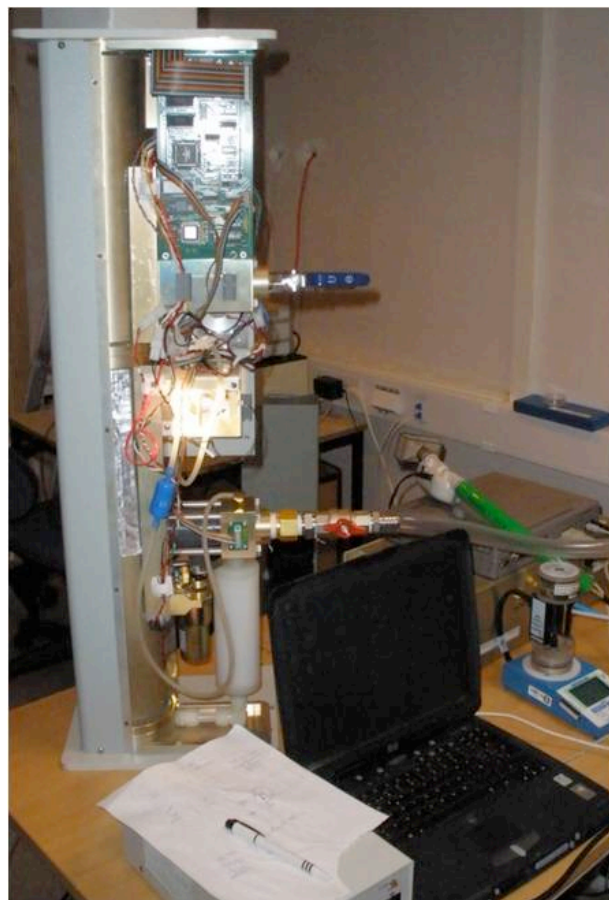


Fig. 20



Fig. 21. Entrada al sistema de distribución de aire

El PSAP y el nefelómetro miden respectivamente, el coeficiente de absorción y de *scattering* de los aerosoles atmosféricos. Estas medidas permiten derivar el albedo de *scattering* simple (SSA) o lo que es lo mismo, el parámetro que proporciona el grado de absorción de la luz por las partículas. Este parámetro varía entre 0 (aerosol completamente absorbente), y 1 (aerosol completamente dispersor).

El efecto radiativo directo de los aerosoles es muy sensible al parámetro SSA, por ejemplo, un cambio de 0,9 a 0,8 en su valor puede cambiar el signo del forzamiento radiativo de negativo a positivo, o lo que es lo mismo, de calentamiento a enfriamiento de la atmósfera, dependiendo del albedo de la superficie y la altitud de los aerosoles (Hansen *et al.*, 1997; Hu *et al.*, 2007). En la Figura 22 se muestra la serie temporal de este parámetro, del coeficiente de absorción (σ_a) y del parámetro alfa de absorción (α_a), durante la campaña de verano ALOMAR 2008. Estos resultados permiten destacar la presencia de partículas poco absorbentes y con muy bajo contenido de *black carbon*, que son las partículas responsables de más del 90% de la absorción de la luz visible en la atmósfera (Horvarth, 1997).

El impactador DEKATI se ha usado para recolectar muestras de aerosol sobre filtros de policarbonato, que han sido posteriormente analizados en el fotómetro de esfera integrante (Fig. 23) descrito en detalle en Montilla-Rosero (2010), para determinar el coeficiente de absorción espectral de los aerosoles depositados en los filtros (Mogo *et al.*, 2005). La Figura 24 muestra la evolución espectral del coeficiente de absorción de luz (σ_a) para tres días representativos de la campaña de verano ALOMAR 2008, uno con valores extremadamente bajos (21 de julio), otro con valores medios (07 de julio) y otro con valores altos (29 de julio). Como se esperaba, el coeficiente σ_a disminuye con el incremento de la longitud de onda, comportamiento conocido como absorción gris y que es característico del carbón absorbente (Bergstrom, 1972). Estos resultados son los primeros obtenidos para la estación sub-ártica de ALOMAR y se resaltan por su estabilidad y congruencia, a pesar de las dificultades técnicas en la medida y las difíciles condiciones meteorológicas.

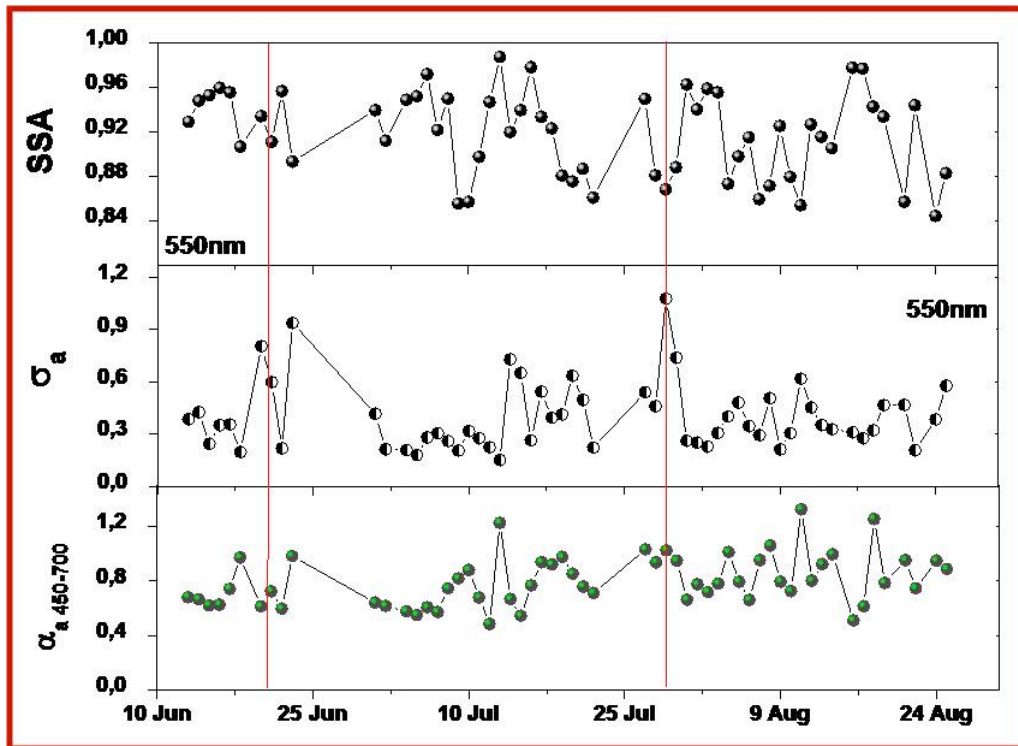


Fig. 22

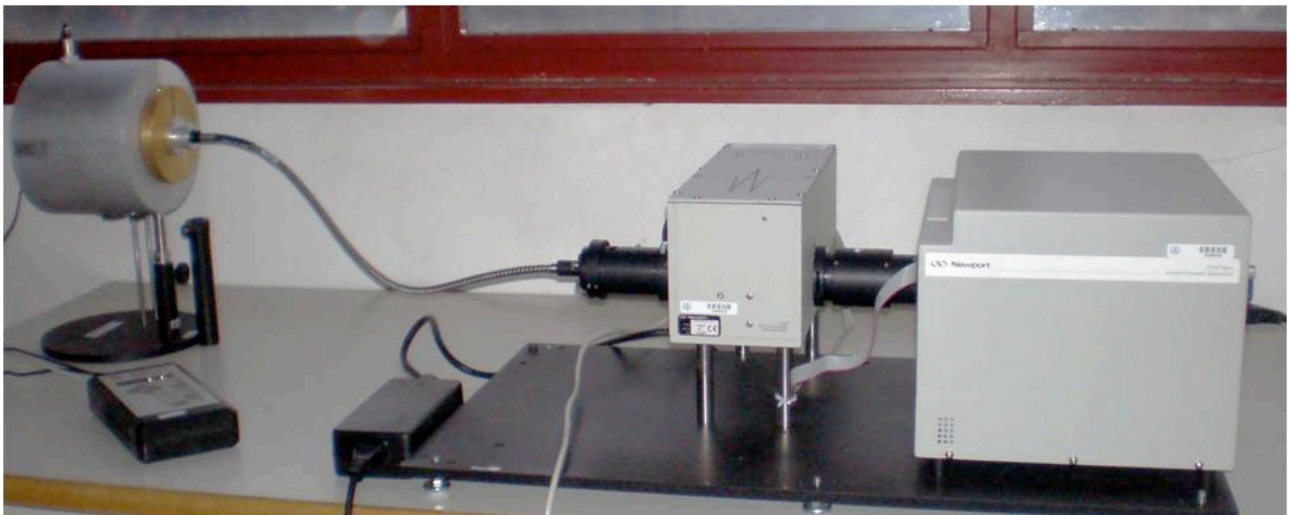


Fig. 23

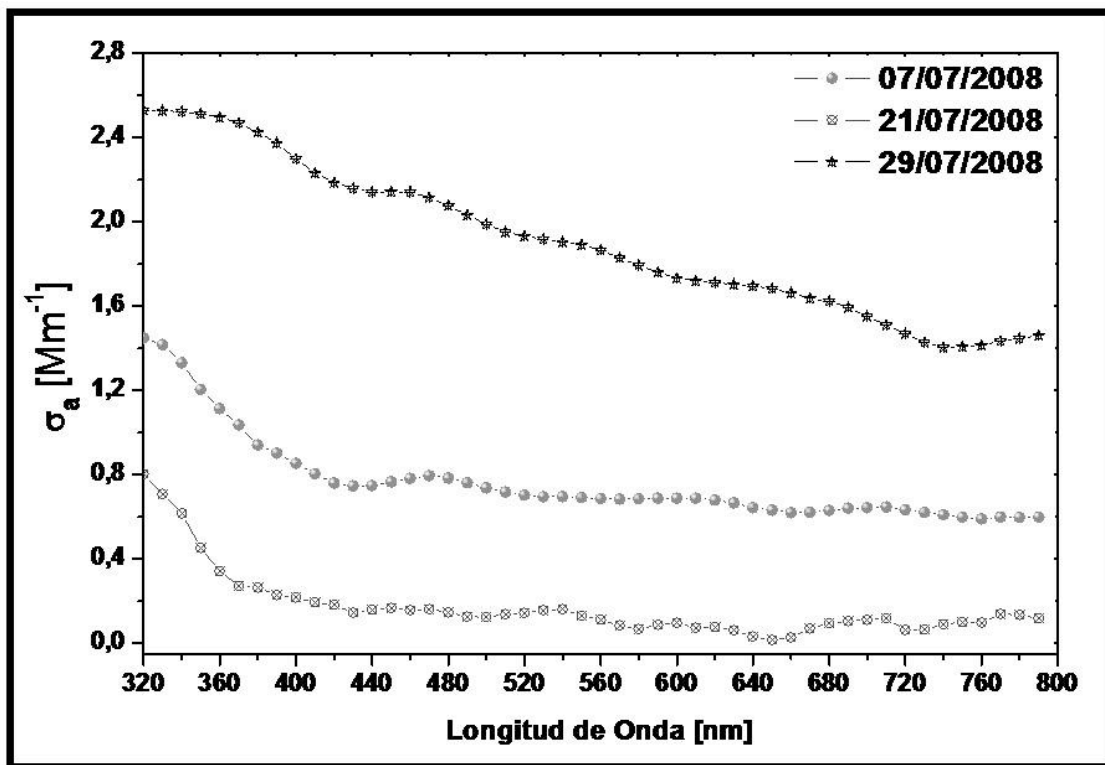


Fig. 24

7. Observaciones Finales

El estudio de la interacción de la radiación solar con los aerosoles atmosféricos proporciona información fundamental en la determinación de la incidencia que estas partículas atmosféricas tienen en el clima del planeta. Especialmente, la caracterización de los aerosoles en los polos terrestres, permite dar una mejor aproximación de su efecto en el equilibrio radiativo del sistema Tierra – atmósfera.

En este trabajo se ha presentado una visión general de la importancia del estudio de los aerosoles en la zona ártica, y algunos de los resultados de la caracterización de estas partículas en la zona, mostrando la baja presencia de los aerosoles antropogénicos y absorbentes en la zona de estudio durante el verano. Así mismo, se ha mostrado el creciente interés de la comunidad científica nacional e internacional, en el estudio y caracterización de estas partículas, a través del desarrollo de intensivas campañas de medida y de la creación de importantes proyectos de investigación, en los que se articulan diferentes países y grupos de investigación.

Agradecimientos

A los proyectos ALOMAR ARI y eARI (RITA-CT-2003-506208). Al proyecto CGL2008-05939-C03-01 de CICYT y al proyecto GR-220 de la Junta de Castilla y León. Al programa Alβan, Programa de becas de alto nivel de la Unión Europea para Latino América, beca No.E06D101060CO. Al equipo técnico y científico del observatorio ALOMAR (Andenes, Noruega), A la Universidade da Beira Interior (Covilhã, Portugal) y a la Universidad de Valladolid (España).

Referencias

- BERGSTROM, R. W. (1972). "Predictions of the spectral absorption and extinction coefficients of an urban air pollution aerosol model". *Atmos. Environ.* 6: 247-258.
- CACHORRO, V. E., DURÁN, P., VERGAZ, R. and DE FRUTOS, A. M. (2000). Columnar physical and radiative properties of atmospheric aerosols in north central Spain. *J. Geophys. Res* 105(No. D6): 7161-7175.
- CACHORRO, V. E., DE FRUTOS, A. M. y CASANOVA, J. L. (1985). Comparison between various models of solar spectral irradiance and experimental data. *Applied Optics* 24(19): 3249-3253.
- ENGVALL, A., KREJCI, R., STRÖM, J., MINIKIN, A., TREFFEISEN, R., STOHL, A. and HEBER, A. (2008). *In-situ airborne observations of the microphysical properties of the Arctic tropospheric aerosol during late spring and summer*. *Tellus* 60B: 392-404.
- EPA (1996). *Air quality criteria for particulate matter EPA/600/P95/001F*, NTIS PM87-176575. Technical report.
- HANSEN, J., SATO, M., and RUEDY, R. (1997). "Radiative forcing and climate response." *J. Geophys. Res.* 102: 6831-6864.
- HAYWOOD, J. and BOUCHER, O. (2000). "Estimates of direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review". *Reviews Geophys.* 38, 513-543.
- HOFMANN, D. J., S. J. OLTMANS, W. D. KOMHYR, J. M. HARRIS, J. A. LATHROP, A. O. LANGFORD, T. DESHLER, B. J. JOHNSON, A. TORRES, W. A. MATTHEWS (1994). "Ozone Loss in the lower stratosphere over the United States in 1992-1993: Evidence for heterogeneous chemistry on the Pinatubo aerosol", *Geophys. Res. Lett.* , 21, 65.
- Horvarth, H. (1997). "Experimental calibration for aerosol light absorption measurements using the integrating plate method - summary of the data". *Aerosol Sci.* 28(7): 1149-1161.
- HU, R.-M., MARTIN, R.V., and FAIRLIE, T.D. (2007). "Global Retrieval of columnar aerosol single scattering albedo from space-based observations." *J. Geophys. Res.* 112(doi: 10.1029/2005JD006832).

- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. HOUGHTON, J.T., Y. DING, D.J. GRIGGS, M. NOGUER, P.J. VAN DER LINDEN, X. DAI, K. MASKELL, and C.A. JOHNSON (eds.). *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 881pp.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. O. F. C. M.L. PARRY, J.P. PALUTIKOF, P.J. VAN DER LINDEN and C.E. HANSON. Cambridge, UK, 7-22., Cambridge University Press.
- JAENICKE, R. (1988) "Aerosol physics and chemistry, Meteorology. Volume (V-4)" in LANDOLT-BOERNSTEIN, *Subvolume b: Physical and Chemical Properties of the Air*. 570 pp. ISBN 3-540-17603-9.
- LAW, K. S., and, STOHL, A. (2007). "Arctic air pollution: Origins and Impacts". *Science* 315: 1537-1540.
- MOGO, S., CACHORRO, V.E., SORRIBAS, M., DE FRUTOS A., and FERNÁNDEZ, R. (2005). "Measurements of continuous spectra of atmospheric absorption coefficients from UV to NIR via optical method". *Geophys. Res. Lett.* 32, (doi:10.1029/2005GL022938): L13811.
- MOLINA, M. J. and F. S. ROWLAND (1974) "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine-atom-catalyzed destruction of ozone", *Nature*, 249, 810.
- MONTILLA-ROSETO, E. (2010). *Determinación de las propiedades de absorción de los aerosoles atmosféricos: Aplicación en la zona Sub-Ártica de Noruega*. Física teórica, atómica y óptica. Valladolid, Universidad de Valladolid. Tesis Doctoral en Física.
- NRC, National Research Council, (1996) *A plan for a research program on Aerosol Radiative Forcing and Climate Change*, National Academy Press, Washington DC.
- PATTERSON, E. M., MARSHALL, B. T. and RAHN K. A. (1982). Radiative properties of the arctic aerosol. *Atmospheric Environment* 16(12): 2967-2977.
- PETZOLD, A., SCHLOESSER H., SHERIDAN, P. J., ARNOTT W. P., OGREN J. A., and, VIRKKULA, A. (2005). "Evaluation of multiangle absorption photometry for measuring aerosol light absorption". *Aerosol Science & Technology* 39: 40-51.
- RODRÍGUEZ, E. (2009). *Caracterización de los aerosoles en la estación sub-ártica ALOMAR (69°N, 16°E) mediante el análisis de propiedades ópticas*. Física teórica, atómica y óptica. Valladolid, Universidad de Valladolid. Tesis Doctoral en Física.
- SEDLACEK, A., and, LEE, J. (2007). "Photothermal Interferometric Aerosol Absorption Spectrometry". *Aerosol Sci. & Techn.* 41: 1089 -1101.

- SHINE, K.P. and P.M. de F. FORSTER (1999) "The effects of human activity on radiative forcing of climate change : A review of recent developments", *Global Planet. Change*, 20, 205-225.
- SISLER, J.F. and W.C. MALM (1994) "The relative importance of soluble aerosol to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States". *Atmos Environ.* 28, 851-862
- VIRKKULA, A., AHLQUIST N. C., COVERT D. S., SHERIDAN P. J., ARNOTT W. P., and, OGREN J.A (2005). "A three-wavelength optical extinction cell for measuring aerosol light extinction and its application to determining light absorption coefficient". *Aerosol Science & Technology* 39: 52-67.
- WMO (2003). *Aerosol measurement procedures, guidelines and recommendations*. WMO. N. 153. Geneva, World Meteorological Organization.