

## Calima anticiclónica y mar de nubes: implicaciones en los Observatorios de Canarias.

A.M. Varela<sup>(1)</sup>, C. Muñoz-Tuñón<sup>(1)</sup>, J.J. Fuensalida<sup>(1)</sup>, B. García-Lorenzo<sup>(1)</sup> y A. Eff-Darwich<sup>(1,2)</sup>.

<sup>(1)</sup>Instituto de Astrofísica de Canarias, C./Vía Láctea, s/n, 38200 La Laguna, Tenerife, Canarias. [avp@iac.es](mailto:avp@iac.es), [cmt@ull.es](mailto:cmt@ull.es), [jjf@iac.es](mailto:jjf@iac.es), [bgarcia@iac.es](mailto:bgarcia@iac.es), [adarwich@iac.es](mailto:adarwich@iac.es)

<sup>(2)</sup>Dep. de Edafología y Geología. Facultad de Biología. Universidad de La Laguna. Avda. Francisco Sánchez s/n, 38200 La Laguna, Tenerife, Canarias.

### Resumen

La transparencia atmosférica es un parámetro clave en la caracterización de los Observatorios Astronómicos. Las medidas de aerosoles que proporcionan los satélites se están utilizando como método de preselección de los mejores enclaves para albergar futuros telescopios gigantes. En este trabajo demostramos que las medidas in situ son siempre necesarias para calibrar e interpretar las medidas proporcionadas por los satélites y éstas deben ser interpretadas correctamente de acuerdo con la resolución espacial y con los canales utilizados. Las invasiones de calimas en Canarias afectan de diferente modo a las islas orientales y a las occidentales, presentan drenaje en altura y son un fenómeno con dependencia estacional: existen notables diferencias entre las invasiones estivales que pueden alcanzar las cumbres -calima alta- y las invernales, que son frecuentes en la baja troposfera -calima anticiclónica-.

La calima anticiclónica está asociada a situaciones anticiclónicas fuertes y estacionarias ocasionadas por la acumulación de polvo entre el suelo y la capa de inversión térmica. Esta calima contribuye al descenso de la altura de la capa de inversión y a la retención del polvo por el mar de nubes (mar de polvo), evitando que alcance las cumbres y que pueda afectar a las observaciones astronómicas. Estas particularidades locales asociadas al clima y a la orografía Canarias requieren de datos de satélite con muy alta resolución espacial combinadas con medidas in situ para poder ser caracterizadas.

### 1. Introducción

El índice de aerosoles proporcionado por el TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) es uno de los productos más aceptados para detectar el contenido diario de aerosoles. Por otra parte, en los observatorios canarios se han desarrollado diferentes técnicas para caracterizar la presencia de polvo sobre los observatorios. En particular, el

telescopio CAMC (Carslberg Automatic Meridian Circle Telescope) en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) en la isla de La Palma ha medido desde 1984 un parámetro relacionado con la transparencia del cielo: el coeficiente de extinción atmosférica. En este trabajo comparamos el índice de aerosoles que proporcionan las observaciones del TOMS/Earth Probe y el coeficiente óptico de extinción atmosférica en el período 1996-2004. La ausencia de correlación entre los parámetros que proporcionan las técnicas in situ y remotas se interpretan bajo diferentes situaciones asociadas a la presencia de nubes y a la retención del polvo por la capa de inversión térmica.

### 2. La inversión del alisio como factor determinante en la distribución de aerosoles

Las campañas de prospección para determinar y caracterizar la calidad astronómica de un lugar se realizan en base al esquema de medidas de la calidad óptica, meteorología (vientos troposféricos y superficiales, temperaturas, nubosidad, etc.), brillo del fondo de cielo, transparencia atmosférica, sismicidad variación climática local, contenido de vapor de agua, densidad de sodio mesosférico, distribución de aerosoles, etc. ([1], [2], [3] y [4]). Las ya conocidas particularidades geográficas y climatológicas de Canarias las convierten en lugares idóneos para las observaciones astronómicas. Los alisios, la presencia de una capa de inversión estable (entre 1000 y 1500m) y la abrupta orografía de las islas más occidentales (La Palma y Tenerife) juegan un papel importante en la retención de nubes por debajo de las cumbres a barlovento (norte) de las islas ([5], [6], [7]), encima el aire es más seco y estable y retiene la contaminación lumínica de poblaciones cercanas. Asimismo, esta capa de inversión separa dos capas con patrones de flujos de masa bien diferenciados: la capa de mezcla marítima (CMM) y la media-alta troposfera (TL). Un estudio del origen y distribución de flujos de aire sobre

Canarias a partir de trayectorias isentrópicas diarias demuestra que las masas de aire en la CMM proceden de: el Atlántico Norte (59.6%), Europa (19%) y África (sólo en invierno, el 23%), mientras que en la TL proceden de: el Atlántico Norte (44.2%) y África (17.4%) con un mínimo en abril (5.3%) y máximo en agosto (34.5%) [8]. La mayor parte de los flujos de masas de aire que llegan al archipiélago canario proceden pues del océano Atlántico Norte, son aerosoles marinos, es decir, cloruros absorbentes en el ultravioleta y que no afectan a las observaciones astronómicas en el visible-infrarrojo. Otro grupo de flujos de masa de aire que llegan a Canarias proceden de Europa, son de origen antropogénico y de escasa importancia. Un tercer grupo lo configuran as intrusiones de origen africano, procedentes del Sahara y del Sahel (polvo y aerosoles minerales) que pueden alcanzar las islas occidentales pero no las cotas del Observatorio (2396m sobre el nivel del mar el ORM y 2390m el OT). Este efecto ha sido fotografiado recientemente en el episodio de tormenta de polvo ocurrido en febrero de 2005. La figura 1 muestra una imagen de Santa Cruz de Tenerife durante este episodio y la baja visibilidad debida a la calima. Ese mismo día y desde un vuelo hacia La Palma tomamos una imagen del Teide, sobre el mar de nubes. El aire encima de esta capa está limpio y la extinción por polvo es despreciable. Cuantificar la incidencia del polvo procedente de África y predecir los flujos sobre los Observatorios, el análisis de sus propiedades, densidad y distribución vertical y su contribución a las observaciones astronómicas, forman parte de un proyecto más amplio que estamos desarrollando el Grupo de Calidad del Cielo del IAC en colaboración con miembros del Instituto Nacional de Meteorología con sede en Canarias Occidental.

### 3. Coeficiente de extinción atmosférica.

La extinción atmosférica es el parámetro astronómico para evaluar la transparencia del cielo. La extinción está asociada a la absorción y dispersión de la luz por la atmósfera terrestre y se caracteriza con el coeficiente de extinción K. Este parámetro es dependiente de la longitud de onda y puede determinarse a partir de observaciones múltiples de estrellas a diferentes masas de aire (es decir, a diferentes alturas del cenit). Las fuentes de esta degradación son la presencia de nubes (vapor de agua) y de aerosoles (incluye partículas de polvo). Disponemos de una larga base de datos de extinción atmosférica en el ORM proporcionados por el CAMC en el filtro V, a 550nm con un ancho de banda de 10nm y más recientemente en la banda

r' Sloan. <http://www.ast.cam.ac.uk>. La extinción en V es menor que 0.2 magnitudes en un 88% de las noches y extinción superior a 0.5mag ocurre sólo en menos de un 1% de las noches. Existe además una dependencia estacional: el 75% de las noches en verano están libres de polvo, mientras que en invierno este porcentaje es del 90%. En cualquier caso el límite de extinción para noches con polvo es  $KV \geq 0.153\text{mag/masa de aire}$  ([9]).



Figura 1: "Mar de polvo" sobre Santa Cruz de Tenerife tomada el 10 de marzo de 2005 coincidiendo con un episodio intenso de calima en Canarias. Fotografía de Pablo Bonet Márquez, miembro del grupo de Calidad del Cielo del IAC.

### 4. Índice de aerosoles frente a la extinción atmosférica

No todos los lugares ni siquiera todos los Observatorios Astronómicos disponen de un telescopio dedicado a medir la extinción atmosférica. En su lugar se ha propuesto el índice de aerosoles (AI) proporcionado por espectrógrafos a bordo de satélites, en particular por el TOMS a bordo del Earth Probe del satélite NOAA de la NASA. Vamos a demostrar que no existe correlación lineal entre la extinción atmosférica y el índice de aerosoles (AI) proporcionado por el TOMS y que, por tanto, este parámetro no es suficiente para la caracterización astronómica de un lugar y que las medidas in situ son necesarias para una correcta interpretación de los resultados. Una primera evidencia la encontramos seleccionando un episodio intenso de tormenta de polvo ocurrido el 26 de febrero de 2000 y comparando AI y KV. El índice de aerosoles proporcionado por el TOMS-EP para el sector centrado en el ORM fue de 2.7, indicando la presencia de aerosoles absorbentes, mientras que la extinción atmosférica durante los días anteriores y

posteriores a este suceso fue inferior a 0.2 magnitudes, con un elevado porcentaje de horas fotométricas (sin nubes ni polvo). La razón es que la pluma de polvo llegó a La Palma pero no alcanzó el nivel del Observatorio [10].

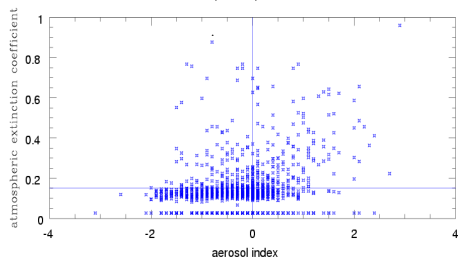


Figura 2: Índice de aerosoles proporcionado por el TOMS/EP frente al coeficiente de extinción atmosférica proporcionado por el CAMC en el ORM.

En la figura 2 representamos el coeficiente de extinción atmosférica en el filtro V (KV) proporcionado por el CAMC en el ORM frente al índice de aerosoles (AI) calculado por el TOMS/EP entre 1996 y 2004. Hemos clasificado 4 cuadrantes correspondientes a 4 regímenes diferentes: KV=0.15 mag/masa de aire como el límite inferior para noches con polvo (y/o nubes) y AI positivos indica la presencia de aerosoles absorbentes. Un estudio e interpretación detallada se encuentra en [11]. En los 4 casos, el coeficiente de correlación lineal y el coeficiente de Pearson es menor que 0.1, es decir, no existe correlación lineal entre ambos parámetros. Sólo cuando seleccionamos los puntos de verano con extinción atmosférica KV > 0.2 mag/masa de aire y valores de AI > 0.7, la correlación podría alcanzar 0.55, pero esto sólo ocurre en un 4% de los casos. Otros autores [12] correlacionando AI TOMS obtenidos con NIMBUS7 y KV medido en el ORM durante episodios de polvo en verano (AI > 0.7 y KV > 0.2), alcanzan una correlación de 0.78, pero este resultado en ningún modo puede extrapolarse a otras situaciones en el Observatorio, bien cuando el polvo no alcanza el nivel del Observatorio, bien cuando hay nubes. El resultado que hemos presentado corrobora otro estudio [13] en el que se compara el índice de aerosoles proporcionado por el TOMS con el espesor óptico de aerosoles obtenido con un radiómetro de sombra multifiltro (MFRSR) en el Observatorio Atmosférico de Izaña entre 1996 y 2002. No existe tampoco correlación lineal entre ambos parámetros, y sólo una correlación de 0.5 se alcanza cuando AI > 0.5, cuando las invasiones africanas alcanzan niveles atmosféricos altos por

procesos convectivos. En cualquier otro caso, y en condiciones libres de polvo, no existe correlación alguna entre el espesor óptico de aerosoles locales y el índice de aerosoles.

La explicación a esta ausencia de correlación estriba en la baja resolución espacial del TOMS/EP que no permite discernir efectos locales de la distribución del polvo puesto que promedia en un área superior a la superficie de una isla (139km x 111km) y tampoco puede distinguir el efecto de drenaje en altura del polvo. Este drenaje se produce por la dependencia estacional de los flujos de masas de aire sobre Canarias y por la presencia de la capa de inversión térmica. En verano los vientos cálidos superficiales pueden elevar el polvo a capas altas por procesos convectivos y en ocasiones existe otro máximo relativo en febrero, asociado a invasiones de aire de origen africano en la capa de mezcla marítima, pero que no suele alcanzar la altura del Observatorio gracias a la presencia del mar de nubes (recientemente acuñado como “mar de polvo”) que lo retiene. En la figura 3 [14] se muestra el ciclo anual de la altura media del estrato de inversión. En cualquiera de los meses esta altura está siempre por debajo del nivel de los Observatorios y además, la presencia de polvo contribuiría al descenso en altura de esta capa de inversión térmica debido al calentamiento atmosférico que produce. En la figura 3 vemos que existe un máximo en invierno, período más variable, y un mínimo en verano dada la casi permanencia del anticiclón de las Azores que la hace más estable. Pero existe un mínimo secundario al final del invierno (en febrero) asociado a las invasiones de aire africano que calientan la atmósfera haciendo decrecer la altura de la capa de inversión. El máximo secundario en primavera se asocia a advecciones frías del norte en esta época [14]. En esta capa de inversión se forma el conocido mar de nubes o estratocúmulos que no sólo actúa de tapadera de la contaminación lumínica, sino que además retiene el polvo.

## 5. Efecto de los aerosoles en las nubes.

Uno de los efectos atmosféricos más importantes de los aerosoles es que permiten formar nubes, de hecho, el vapor de agua necesita estas partículas para poder condensar. El tamaño y número de partículas también pueden modificar la microfísica de la nube (tamaño y número de gotitas), el potencial de precipitación y sus propiedades ópticas (<http://www.atmsophere.mpg.de>). El efecto del polvo y otros aerosoles en las nubes es muy complejo, los aerosoles no desarrollan nubes normales que provocan precipitaciones. Las nubes que se forman con aerosoles muy pesados tienden a

no precipitar en forma de lluvia, o no lo hacen fácilmente, por lo que duran más tiempo (<http://www.belt.es/noticias/2004/julio/12/entrevista.htm>). Algunos autores han encontrado a partir de medidas de nubes y polvo obtenidas de satélites de la NASA durante 16 años, medidas en suelo y modelos, que las bajas nubes (cúmulos y supercúmulos) en zonas próximas al desierto del Sahara, atrapan las partículas de polvo. Las altas concentraciones de polvo suprimen la lluvia por la dispersión del agua por las partículas de polvo de manera que las gotitas de agua no son lo suficientemente pesadas como para caer. Esto genera más nubes delgadas y menos lluvia (<http://www.gsfc.nasa.gov/news-release/releases/2003/03-73.htm>). La presencia de polvo sería capaz de acelerar el proceso de formación de nubes más estables originando lo que denominamos mar de polvo que favorece a la conservación de la transparencia atmosférica sobre los Observatorios.

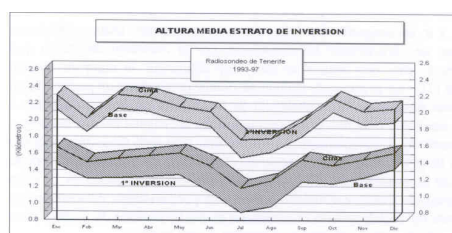


Figura 3. Ciclo anual de la altura de la capa de inversión [14].

## 6. Conclusiones

Desde el punto de vista de calidad de las imágenes astronómicas nos interesa caracterizar la distribución y propiedades de las intrusiones de masas de aire que aportan partículas que pueden producir efectos de extinción o dispersión de la radiación en el visible e infrarrojo. Una de las causas de la falta de correlación entre las técnicas remotas que proporcionan espectrógrafos a bordo de satélites y las medidas in situ (extinción atmosférica proporcionada por telescopios en tierra y detectores de partículas) es debida a la presencia de una capa de inversión estable (mar de nubes o de polvo) que hace de tapadera de estas nubes de polvo evitando que alcancen la altitud de los Observatorios (2400msnm). El polvo además interviene en procesos de estabilización de las nubes y en el calentamiento de la atmósfera, contribuyendo al descenso de la capa de inversión.

## 7. Agradecimientos

Queremos agradecer al Ozone Processing Team (OPT) del TOMS (NASA) por el cálculo del índice de aerosoles y al CAMC del Isaac Newton Group en la Palma por los datos del coeficiente de extinción atmosférica, y en ambos casos por su publicación gratuita en internet.

## 8. Referencias

- [1] Muñoz-Tuñón, C., IAU Site 2000, ASP Conference Series, Vol. 266, 498, J. Vernin, Z. Benkhaldoun, C. Muñoz-Tuñón Eds., 2002
- [2] Muñoz-Tuñón, C., Vernin, J. & Sarazin, M., 2<sup>nd</sup> Bäckaskog Workshop on Extremely Large Telescopes, September 9- 11, Sweden, 2003
- [3] Varela, A.M., Muñoz-Tuñón, C., Gurtubai, A., & Saviron, C., IAU Site 2000, ASP Conference Series, Vol. 266, 454, J. Vernin, Z. Benkhaldoun, C. Muñoz-Tuñón Eds., 2002
- [4] Varela, A.M. & Muñoz-Tuñón, C., IV Encuentro Nacional de Meteorología Aficionados, May 4-9, La Palma, 2004
- [5] Font-Tullot, I., Servicio Meteorológico Nacional (INM), Serie A, N°26, 1956
- [6] Huetz-de Lempis, A., Publ. Des Lettres et des Sciences Humaines de Paris (Sorbonne). Ed. Societé d'Édition et d' Enseignement Supérieur. Serie Recherche, 54, 15. Paris, 1969
- [7] Bustos, J.J., IV Encuentro Nacional de Meteorología Aficionados, La Palma, 2004
- [8] Torres, C., Cuevas, E. & Guerra, J.C., Proc. 1er Encuentro sobre Meteorología y Atmósfera de Canarias, ISBN84- 8320-251-4, CMTCO, p.74. Centro de Publicaciones, Secretaría Gral. Técnica, Ministerio de Medio Ambiente Eds., 2003
- [9] Guerrero, M.A. et al., New Astronomy Reviews, 42, 529, Muñoz-Tuñón Ed., Elsevier, 1998
- [10] Varela, A.M. et al, SPIE Vol. 5489, 245, 2004
- [11] Varela, A.M. et al., SPIE Vol. 5571, 105, 2004.
- [12] Siher, E.A et al., SPIE Vol.5489, 138, 2004
- [13] Romero, P.M. & Cuevas, E., Proc. 3<sup>a</sup> Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, February 3-8, Valencia, p.1, 2002
- [14] Bustos, J.J. & Marrero, C., Proc. 1er Encuentro sobre Meteorología y Atmósfera de Canarias, ISBN84- 8320-251-4, CMTCO, p.71. Centro de Publicaciones, Secretaría Gral. Técnica, Ministerio de Medio Ambiente Eds., 2003.