

Caracterización de las propiedades ópticas del aerosol de la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México

Francisco Javier Rodríguez Caballero

FÍSICO

2004

Universidad Nacional Autónoma de México



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Guillermina y Francisco Javier por su amor, estímulo, apoyo y sacrificio durante mi formación académica, lo cual me permitió llegar a esta etapa de mi vida.

A mi hermano Carlos Vladimir, por su valioso apoyo e invaluable comentarios en la realización de esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme proporcionado una educación de calidad en la Preparatoria y en la Universidad.

A mis amigos de la preparatoria Claudia, Epigmenio, Karla, Luis y Víctor, por su valiosa y duradera amistad.

A mis colegas Adrián, Alejandro, Carlos Esteban, Jose Luis y Oscar, con quienes compartí muchas horas de estudio.

Al Dr. Agustín Muhlia V., por su amistad e invaluable asesoría durante la realización de la tesis.

A los sinodales Dr. Martín José Montero M., Dr. Darrel Gibson B., Dr. Amando Leyva C. y M. en C. Guillermo Montero M., por su revisión y sus valiosos comentarios que contribuyeron a mejorar el presente trabajo de tesis.

A Ernesto Jiménez de la Cuesta, Rogelio Montero, Luis Galindo y Héctor Estebes, por su estímulo y apoyo durante la realización de la tesis.

A CONACYT por el apoyo económico otorgado para la realización de este trabajo de tesis, a través del proyecto J 38238 T: Monitoring biomass burning aerosols in Southeast Mexico to characterize their optical and radiative properties and determine their regional climate impact.

Al Dr. Brent Holben y a sus colaboradores, por el establecimiento y mantenimiento del fotómetro solar CIMEL, utilizado en este trabajo de tesis, ubicado en Ciudad Universitaria (México, D.F.).

RESUMEN

El estudio del aerosol es de suma importancia para comprender la manera en que se modifica el clima de la Tierra a través la interacción de la radiación solar con el aerosol. Para poder lograr esta comprensión, se han realizado algunos estudios de las propiedades ópticas del aerosol en distintos lugares sobre la superficie de la Tierra. En la zona Suroeste de la Ciudad de México se encuentra en funcionamiento el fotómetro solar CIMEL, que ha estado operando desde marzo de 1999. Con este fotómetro que está automatizado (robotizado), se realizaron mediciones durante los años de 1999, 2000, 2001 y 2002. A los datos obtenidos de las mediciones realizadas en tiempo real se les aplicaron algoritmos de recuperación por inversión, a través del programa de computadora llamado *demonstrat* (propiedad de la NASA), para obtener entre otras propiedades ópticas, los índices de refracción y la distribución por tamaños de las partículas aerosólicas. Ambas propiedades se obtuvieron de la base de datos pública de la red de fotómetros espectrales AERONET. Utilizando estas dos propiedades, se calcularon las siguientes propiedades ópticas mediante el uso de algunos programas de computadora contruidos y elaborados en lenguaje FORTRAN y C: el albedo por esparcimiento simple¹, el factor de asimetría, los coeficientes de turbiedad de Ångstrom, la visibilidad y la función fase del aerosol.

Para poder calcular (en este trabajo de tesis), entre otras propiedades, el albedo por esparcimiento simple del aerosol es necesario contar, para un día y una hora en particular, con una pareja de datos correspondiente al índice de refracción y a la distribución por tamaños del aerosol. En la base de

¹ El albedo por esparcimiento simple es la razón de flujo de salida y entrada de la radiación solar en el aerosol.

datos AERONET correspondiente a la Ciudad de México, se cuenta con 237 parejas de datos que se encuentran entre el 5 de marzo de 1999 y el 7 de mayo de 2002. Esta base de datos, además de proporcionar, como ya se mencionó anteriormente, el índice de refracción y la distribución por tamaños, también proporciona las propiedades ópticas calculadas en este trabajo. La diferencia entre estas propiedades radica en la manera como se calcularon. Las que están disponibles en la base de datos AERONET se calcularon aplicando un modelo de recuperación por inversión, directamente a los datos obtenidos en tiempo real. En cambio, las propiedades calculadas en este trabajo de tesis son obtenidas utilizando un modelo de recuperación por inversión diferente, debido a que se calculan a partir de los índices de refracción y la distribución por tamaños del aerosol. Además el modelo aplicado en este trabajo usa algoritmos más sencillos y sin aplicar criterios de aproximación, en comparación con los utilizados en el programa *demonstrat* de la NASA. Por lo tanto, se tiene que al realizar una comparación por medio de cocientes² entre las propiedades ópticas calculadas por dos modelos distintos, las diferencias entre los albedos y entre los factores de asimetría, varían entre el 0% y el 1.1%. En cambio, las diferencias entre los parámetros de Ångstrom varían entre el 0% y el 8.9%. Esto demuestra que el modelo utilizado en este trabajo está bien elaborado. Para complementar las comparaciones arriba mencionadas, se realizó una comparación cualitativa mediante el uso de gráficas.

Para explicar el porqué hay máximos y mínimos locales en las gráficas correspondientes a las propiedades ópticas mencionadas líneas arriba...

1. La gráfica del albedo por esparcimiento simple se comparó con la gráfica de la parte real del índice de refracción. Lo que se obtuvo fue:

a) Para cada mínimo local en el albedo, hay un máximo local en la parte real del índice de

² Por ejemplo, para el caso del albedo: $\text{cociente} = \omega_{AERONET} / \omega_{Estetrabajo}$

- refracción, y viceversa.
- b) Los mínimos locales correspondientes a la parte real del índice de refracción están posiblemente asociados a la existencia de una humedad relativamente alta y a un crecimiento higroscópico en las partículas aerosólicas. En cambio, los máximos locales están asociados a altas concentraciones de partículas de carbón negro.
2. La gráfica del factor de asimetría se comparó con la gráfica del espesor óptico de absorción. Lo que se obtuvo fue:
- a) Para cada máximo local en el factor de asimetría hay un mínimo local en el espesor óptico de absorción, y viceversa.
- b) Cuando hay un mínimo local en la absorción de radiación, las partículas aerosólicas tienen un mayor *lóbulos frontal*³ de esparcimiento. Y cuando hay un máximo en la absorción, el *lóbulos frontal* se reduce.
- c) Los máximos locales están presentes en las mañanas entre las 7:00 hrs y la 10:00 hrs, en cambio los mínimos locales se localizan entre las 16:00 hrs y las 17:30 hrs.
3. Para obtener mayor información acerca del factor de asimetría se realizó un promedio de la distribución volumétrica por tamaños correspondiente a las fechas en las que los máximos y los mínimos locales se observaron. Lo que se obtuvo fue:
- a) En las mañanas, cuando la concentración volumétrica de partículas de la moda correspondiente a los radios entre $0.05 \mu m$ y $0.44 \mu m$ es la predominante, hay un máximo en

³ El término *lóbulos frontal* se refiere a la forma en que la radiación incidente sobre una partícula es esparcida hacia adelante. Para una partícula cuyo radio es ligeramente mayor a la de la longitud de onda, el esparcimiento hacia adelante tiene una forma esférica o de un ovoide (ver figura 2.3). Si el tamaño de la partícula es mayor que la longitud de onda, el esparcimiento se realiza predominantemente hacia a delante, con un *lóbulos frontal* parecido a como se muestra en el esquema de la figura 2.3

el esparcimiento y un mínimo en la absorción de radiación.

- b) Cuando las concentraciones volumétricas de las modas de las partículas mencionadas en el inciso anterior, y las de las partículas con radios entre $0.576 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ no difieren significativamente entre sí, hay un mínimo local en el factor de asimetría y un máximo local en el espesor óptico de absorción.

Para aprovechar la información obtenida al calcular las propiedades ópticas del aerosol en estudio, se tomaron los resultados publicados por Dubovik et al., (2002). En este artículo se dan a conocer las propiedades ópticas para partículas aerosólicas cuyos radios se encuentran en el intervalo $0.05 \mu\text{m} \leq r \leq 15 \mu\text{m}$, proporcionadas en la base de datos AERONET.

En el artículo se describe que se compararon las propiedades ópticas de los siguientes lugares:

1. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. (1993-2000),
2. Creteil-París, Francia (1999),
3. Ciudad de México (1999-2000), y
4. Maldivas (1999-2000).

Estos cuatro lugares fueron elegidos porque todos ellos son asentamientos tipo urbano-industrial, además de que tienen condiciones y fuentes de emisión variables de partículas aerosólicas.

En este trabajo de tesis se realizó una comparación entre las propiedades ópticas calculadas aquí y las reportadas por Dubovik et al, (2002) para encontrar si hay o no diferencias entre las propiedades mencionadas, considerando que los 4 lugares arriba mencionados tienen algo en común. En esta comparación se encontró que las partículas aerosólicas de la Ciudad de México y de las Maldivas esparcen menos radiación que el aerosol de Greenbelt, Maryland (E.U.A).

Por otra parte, al analizar las gráficas correspondientes a las contribuciones de los espesores ópticos de extinción y de esparcimiento, se encontró que las partículas ópticamente activas⁴ tienen radios entre los $0.065 \mu m$ y los $0.6 \mu m$, constituyendo aproximadamente el 5.4% de las partículas estudiadas, cuyo intervalo de radios se encuentran entre los $0.005 \mu m$ y los $10 \mu m$.

La información proporcionada por los coeficientes de turbiedad de Ångstrom, nos indica que la atmósfera de la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México es turbia, y que el aerosol está formado por partículas, cuyos radios se encuentran entre los $0.1 \mu m$ y los $1 \mu m$ que aumentan en su concentración de la mañana a la tarde y que esparcen la radiación que incide sobre ellas predominantemente hacia adelante.

Por último, es importante mencionar que, pese a variaciones, no existe un cambio en el albedo por esparcimiento simple entre el 5 de marzo de 1999 y aproximadamente el 9 de abril de 2001. Después de esta fecha y hasta el 7 de mayo de 2002 puede observarse un ligero incremento general en las variaciones. Sin embargo, para el factor de asimetría y el parámetro de Ångstrom, durante los cuatro años no hay un incremento o decremento significativo.

⁴ Cuando la radiación que es emitida por el sol atraviesa el aerosol, ciertas longitudes de onda van a ser esparcidas o extinguidas más que otras. Si una longitud de onda en particular se esparce o se extingue con mayor facilidad en una población de partículas, y no en otras. A las primeras se les dice que son *partículas ópticamente activas* a esa longitud de onda en particular. La segunda población de partículas tiene un efecto despreciable en el esparcimiento o en la extinción de la radiación, y por lo tanto no son *ópticamente activas*.

ÍNDICE GENERAL

1.. <i>Introducción</i>	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Aerosol y Clima	3
1.2. Objetivos	6
2.. <i>Aerosol Atmosférico</i>	9
2.1. Definición y Características del Aerosol	9
2.2. Fuentes de las Partículas Aerosólicas	14
2.3. Características Ópticas	16
2.4. Teoría de Rayleigh	19
2.5. Teoría de Mie	26
2.5.1. Albedo por Esparcimiento Simple	30
2.5.2. Factor de Asimetría	31
2.6. Propiedades Ópticas de un Grupo de Partículas	32
2.6.1. Factor de Asimetría	33
2.6.2. Albedo por Esparcimiento Simple	34
2.6.3. Masa óptica	36
2.6.4. Ley de Ångstrom	38

3.. Metodología	42
3.1. Instrumentación	42
3.1.1. Secuencia de mediciones	42
3.1.2. Ventajas y Desventajas del Fotómetro Solar CIMEL	45
3.2. Sitio de Muestreo	46
3.3. Base de Datos	47
3.4. Reducción de Datos	49
3.5. Cálculo de Parámetros Ópticos	53
4.. Análisis y Discusión de Resultados	57
4.1. Comparación con la base de datos de AERONET	57
4.2. Comparación con otro trabajo	66
4.3. Partículas Ópticamente Activas	69
4.4. Pruebas de Normalidad	72
4.5. Comparación entre Medias	78
4.6. Función Fase	83
4.7. Coeficientes de Turbiedad de Angstrom y Visibilidad	84
5.. Conclusiones	93
6.. Apéndices	97
7.. Bibliografía	98

ÍNDICE DE CUADROS

2.1. Intervalos para el coeficiente de turbiedad de Ångstrom, el cual está directamente relacionado con la concentración de partículas ópticamente activas en una columna atmosférica de sección transversal unitaria.	40
2.2. Intervalos para el parámetro de Ångstrom, el cual es un indicador de la distribución por tamaños de las partículas aerosólicas y del dominio relativo en cantidad de las partículas con radios menores a 1 micrómetro contra las partículas con radios entre 0.1 y 1 micrómetros, que son consideradas como partículas grandes.	41
2.3. Parámetros para varios grados de turbiedad, manteniendo alfa constante. En esta tabla se observa como disminuye la visibilidad conforme beta se incrementa.	41
3.1. Ejemplo de la tabla obtenida de la base de datos AERONET. En esta tabla se muestra la parte real (REFR) y la parte imaginaria (REFI) del índice de refracción del aerosol para cada una de las siguientes longitudes de onda: 441 nm, 673 nm, 873 nm y 1022 nm.	52
3.2. Ejemplo de la salida de datos del programa lrkespkextg. Re(m) es la parte real e Im(m) es la parte imaginaria del índice de refracción del aerosol, Kesp y Kext son los factores de eficiencia de esparcimiento y de extinción, respectivamente, y g es el factor de asimetría.	54

3.3.	Ejemplo de la salida de datos del programa flmtwgabr. $\text{Re}(m)$ es la parte real e $\text{Im}(m)$ es la parte imaginaria del índice de refracción del aerosol; τ_{ext} y τ_{aesp} y τ_{aabs} son los espesores ópticos de extinción, de esparcimiento y de absorción, respectivamente; ω es el albedo por esparcimiento simple; g es el factor de asimetría; α y β son los parámetros de turbiedad de Ångström y Vis. es la visibilidad.	56
4.1.	Tabla de ejemplo que muestra como se compararon las cantidades correspondientes al albedo por esparcimiento simple del aerosol.	58
4.2.	Tabla que muestra las diferencias máximas en porcentajes entre las cantidades proporcionadas por AERONET y las calculadas en <i>este trabajo</i>	64
4.3.	Resumen de las propiedades ópticas calculadas en este trabajo y por Dubovik et al. (2002). g es el factor de asimetría, $\text{Re}(m)$ es la parte real e $\text{Im}(m)$ es la parte imaginaria del índice de refracción del aerosol.	70
4.4.	Intervalos de partículas ópticamente activas con radio r , correspondientes a las gráficas de las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16. En estas gráficas se muestra la contribución al espesor óptico de extinción y de esparcimiento a una longitud de onda de 0.441 micrómetros.	72
4.5.	Tabla de los radios de las partículas ópticamente activas que corresponden a los máximos (picos) en las gráficas de las de las contribuciones al espesor óptico de extinción y de esparcimiento (ver figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16).	72
4.6.	Tabla de intervalos para cada <i>masa óptica relativa</i> , utilizada para agrupar las propiedades ópticas calculadas en este trabajo de tesis.	76

4.7. Resumen de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a las muestras correspondientes al albedo por esparcimiento simple y al factor de asimetría del aerosol. La aplicación de esta prueba se realizó para poder reportar con seguridad las medias calculadas de cada muestra, ya que la mayoría de ellas provienen de una distribución normal.	77
4.8. Resumen de la comparación entre medias por año para el albedo por esparcimiento simple y para el factor de asimetría. Esta comparación se realizó para saber si hay o no diferencias en las propiedades ópticas entre la mañana y la tarde para cada uno de los 4 años en estudio: 1999, 2000, 2001 y 2002.	80
4.9. Resumen de la comparación entre medias antes y después del medio día, para el albedo por esparcimiento simple y para el factor de asimetría. Esta comparación muestra que prácticamente no hay diferencias entre las medias.	81
4.10. Tabla de medias en la mañana para el albedo por esparcimiento simple y el factor de asimetría. Los números sombreados con gris son las medianas de los grupos que no tuvieron una distribución normal.	81
4.11. Tabla de medias en la tarde para el albedo por esparcimiento simple y el factor de asimetría. Los números sombreados con gris son las medianas de los grupos que no tuvieron una distribución normal.	82
4.12. Resumen de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los coeficientes de turbiedad de Ångstrom y para la visibilidad. La aplicación de esta prueba se realizó para poder reportar con seguridad las medias calculadas de cada muestra, ya que la mayoría de ellas provienen de una distribución normal.	90

4.13. Resumen de la comparación entre medias por año para los coeficientes de turbiedad de Ångstrom y para la visibilidad. Esta comparación muestra que prácticamente no hay diferencias entre las medias.	90
4.14. Resumen de la comparación entre medias antes y después del medio día para los coeficientes de turbiedad de Ångstrom y para la visibilidad. Esta comparación muestra que prácticamente no hay diferencias entre las medias.	90
4.15. Tabla de comparación entre las medias en la mañana y en la tarde correspondientes al parámetro de Ångstrom alfa.	91
4.16. Tabla de comparación entre las medias en la mañana y en la tarde correspondientes al coeficiente de turbiedad de Ångstrom. El número sombreado con gris es la mediana del grupo que no tuvo una distribución normal.	91
4.17. Tabla de comparación entre las medias en la mañana y en la tarde correspondientes a la visibilidad. La visibilidad presentada en esta tabla no es en dirección horizontal, sino en dirección del almucantar.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Intervalos de tamaño de las partículas que forman el aerosol.	11
2.2. Tipos de partículas aerosólicas.	12
2.3. Patrones angulares de la intensidad de esparcimiento de tres partículas de diferente tamaño.	18
2.4. Diagrama polar de la intensidad esparcida.	23
3.1. En esta fotografía se muestran las partes principales del fotómetro solar CIMEL: Antena Satelital, Celda Solar, Caja de Control, Soporte y Colimadores.	43
3.2. Solicitud electrónica para bajar los datos recuperados por inversión de la base de datos pública de la red de fotómetros espectrales AERONET.	50
3.3. Ejemplo de tabla obtenida de la base de datos. En esta tabla se muestra la distribución volumétrica columnar de las partículas aerosólicas, proporcionada en 22 columnas. Los valores que se encuentran en el primer renglón corresponde a los radios de las partículas en micrómetros. Los valores que se encuentran del segundo renglón en adelante, corresponden a la distribución volumétrica columnar para partículas con radios iguales a los mostrados en el primer renglón.	55
4.1. Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del albedo por esparcimiento simple a una longitud de onda de 0.441 micrómetros.	59

4.2. Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del albedo por esparcimiento simple a una longitud de onda de 0.673 micrómetros.	59
4.3. Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del albedo por esparcimiento simple a una longitud de onda de 0.873 micrómetros.	60
4.4. Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del albedo por esparcimiento simple a una longitud de onda de 1.022 micrómetros.	60
4.5. Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del factor de asimetría a una longitud de onda de 0.441 micrómetros.	61
4.6. Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del factor de asimetría a una longitud de onda de 0.673 micrómetros.	61
4.7. Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del factor de asimetría a una longitud de onda de 0.873 micrómetros.	62
4.8. Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del factor de asimetría a una longitud de onda de 1.022 micrómetros.	62
4.9. Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del parámetro de Ångstrom (alfa).	63
4.10. Gráficas de comparación, de máximos y mínimos locales, del albedo por esparcimiento simple y del Índice de Refracción a una longitud de onda de 0.441 micrómetros. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes	64
4.11. Gráficas de comparación, de máximos y mínimos locales, del factor de asimetría y del espesor óptico de absorción a una longitud de onda de 0.441 micrómetros. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes.	67

-
- 4.12. Gráficas de las distribuciones volumétricas promedio para los días en que hay máximos y mínimos locales en el factor de asimetría. La gráfica etiquetada como *otros días* representa la distribución promedio para los días en los que no hay picos que sobresalgan por encima o por debajo de todos los demás. 68
- 4.13. Gráficas de las contribuciones (en porcentajes) al espesor óptico de extinción. Las tres gráficas mostradas representan el comportamiento general de las contribuciones durante el año de 1999. 73
- 4.14. Gráficas de las contribuciones (en porcentajes) al espesor óptico de esparcimiento. Las tres gráficas mostradas representan el comportamiento general de las contribuciones durante el año de 1999. 73
- 4.15. Gráficas de las contribuciones (en porcentajes) al espesor óptico de extinción. Las tres gráficas mostradas representan el comportamiento general de las contribuciones durante el año de 2002. 74
- 4.16. Gráficas de las contribuciones (en porcentajes) al espesor óptico de esparcimiento. Las tres gráficas mostradas representan el comportamiento general de las contribuciones durante el año de 2002. 74
- 4.17. Gráfica de comparación (AERONET-Este trabajo) de la Función Fase para una longitud de onda de 0.441 micrómetros. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes. 85
- 4.18. Gráfica de comparación (AERONET-Este trabajo) de la Función Fase para una longitud de onda de 0.673 micrómetros. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes. 86

4.19. Gráfica de comparación (AERONET-Este trabajo) de la Función Fase para una longitud de onda de 0.873 micrómetros. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes.	87
4.20. Gráfica de comparación (AERONET-Este trabajo) de la Función Fase para una longitud de onda de 1.022 micrómetros. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes.	88

1. INTRODUCCIÓN

1.1. *Antecedentes*

El estudio del aerosol atmosférico se volvió muy importante a partir de la década pasada debido a la evidencia experimental de que las partículas que forman el aerosol, en interacción con la radiación solar y terrestre, producen de manera directa cambios en el clima de la Tierra y de manera indirecta cambios en la microfísica de las nubes y en la precipitación (Kaufman et al., 1997). Por esta razón, es imprescindible caracterizar las propiedades ópticas del aerosol para entender mejor estos fenómenos. La existencia de una gran variedad de fuentes de aerosol, tanto naturales como antropogénicas, con un corto tiempo de vida (de 5 a 10 días), hace que la caracterización de las propiedades ópticas del aerosol sea difícil. Sin embargo, durante los últimos cinco años se han llevado a cabo alrededor del mundo varias investigaciones experimentales que tienen como objetivo caracterizar las propiedades ópticas de todos los tipos de aerosol existentes. Por ejemplo: los realizados por Kaufman et al. (1998) en América del Sur, Russell et al. (1999) al Este de los Estados Unidos, Bates et al. (1998) en los océanos Atlántico y Pacífico, Raes et al. (2000) en el Océano Atlántico, Ramanathan et al. (2001) en el Océano Índico, King et al. (1999) en África del Sur, Campanelli et al (2001) en el Mediterráneo, Smirnov et al. (2002) en los océanos Atlántico y Pacífico, Kikas et al. (2001) en la costa este del Mar Báltico, y Lata et al. (2003) en las regiones urbanas y suburbanas de Hyderabad y Anantapur (India).

Otros estudios se han llevado a cabo utilizando satélites, como por ejemplo el *Nimbus-7* y el *Earth*

Probe que sirvieron para realizar observaciones de los retroesparcimientos¹ del ultravioleta cercano (Torres et al., 2002). En Chiba, Japón se obtuvo información acerca del espesor óptico² del aerosol a través de los datos satelitales NOAA AVHRR (Asakuma et al., 2002).

También se han hecho estudios teóricos para obtener por inversión de las características radiacionales del aerosol, los índices de refracción y las distribuciones por tamaño de las partículas (Dubovik y King, 2000). En otros estudios, se han utilizado bases de datos, que contienen las propiedades ópticas y microfísicas de varios tipos de partículas aerosólicas, para la creación de programas de cómputo que sirvan como herramientas para el estudio del comportamiento del clima de la Tierra (Hess et al., 1998; Dubovik et al., 2000). También se ha utilizado la base de datos de la red de fotómetros espectrales AERONET (AErosol RObotic NETwork) para probar la eficacia de nuevos algoritmos que se utilizarán en nuevos satélites meteorológicos (Dammen et al., 2002).

En la zona suroeste de la Ciudad de México se encuentra en funcionamiento el fotómetro solar marca CIMEL, que desde marzo de 1999 ha estado integrado a la red AERONET de la NASA, dedicada al monitoreo del aerosol y la humedad atmosféricos a escala global. Este fotómetro, fabricado en Francia, está automatizado (robotizado) y realiza diferentes tipos de mediciones de la radiación que llega desde el Sol (irradiancia) y el cielo (radiancia) al punto de observación.

Las mediciones de ambos tipos de flujos de radiación (del Sol y del cielo) proveen información, la cual ha sido obtenida por inversión, usando el modelo de AERONET para obtener la función de distribución volumétrica columnar³ de las partículas que forman el aerosol y el índice de refracción

¹ Uno de los términos manejados en lengua inglesa es *scattering*. La traducción adecuada de este término al español es *esparcimiento*, el cual se refiere a la forma en que la radiación incidente sobre una partícula se desplaza en el espacio después de abandonar dicha partícula. Al desplazamiento hacia adelante, en la dirección de incidencia se le llama *esparcimiento hacia adelante*, y al desplazamiento hacia atrás se le denomina *retroesparcimiento* (ver figura 2.3).

² El espesor óptico es la fracción de un rayo de luz con una intensidad incidente (I_0) que viaja en una dirección determinada, el cual alcanza la superficie de la Tierra sin ser esparcida o absorbida.

³ La distribución volumétrica columnar se refiere al volumen que ocupan las partículas aerosólicas por unidad de volumen de una columna que va desde la superficie de la Tierra hasta la parte superior de la atmósfera

complejo (equivalente) del aerosol.

La Ciudad de México, como muchas otras grandes ciudades, tiene problemas de contaminación del aire debido al crecimiento de la población y de la industria. Su atmósfera tiene altas concentraciones de partículas ópticamente activas (Vasilyev et al., 1995; IMADA, 1997; PROAIRE, 1996) con características de esparcimiento y de absorción de la radiación solar muy particulares.

Para explicar la naturaleza y la causa de las concentraciones del aerosol en la Ciudad de México y sus alrededores se han realizado varias campañas, como la del 23 de Febrero al 22 de Marzo de 1997 (Edgerton et al., 1999). Esta campaña incluyó la realización de mediciones de la absorción y del esparcimiento en las zonas de la Merced y del Pedregal. En otros trabajos se han caracterizado las propiedades ópticas del aerosol de la Ciudad de México (Raga et al., 1998, 2000 y 2001a; Baumgardner et al., 2000; Castro et al., 2001) Raga et al. (2001b) resume los resultados de los estudios realizados entre los años 1960 y 2000, los cuales estuvieron enfocados a la contaminación atmosférica de la Ciudad de México, y dedica un apartado a las propiedades ópticas del aerosol en donde se presentan 4 tablas que muestran las principales características del aerosol obtenidas en tales estudios.

Aún con todas estas contribuciones, faltan por hacer muchos estudios de las propiedades ópticas del aerosol en la Ciudad de México que nos permitan entender mejor su naturaleza y la manera en que afectan el clima urbano.

1.1.1. Aerosol y Clima

Benjamín Franklin fue quizás la primera persona en relacionar las perturbaciones climáticas con el aerosol atmosférico cuando en 1784 postuló que el frío extremo del invierno de 1783-84 se debió a la disminución de la intensidad de la luz solar causada por las partículas aerosólicas (Ackerman,

1988).

El aerosol atmosférico es un componente importante que afecta el balance de radiación del sistema suelo-agua-atmósfera:

1. Al esparcir y absorber la radiación solar incidente.
2. Al esparcir y absorber la radiación solar reflejada desde la superficie de la Tierra.
3. Al influenciar la formación y el tiempo de vida de las nubes mediante la concentración y coagulación de gotas de agua, y en el caso de las nubes más frías (a temperaturas cercanas a los 0°C) al influenciar en la formación de cristales.
4. Al esparcir y absorber la radiación infrarroja emitida en una atmósfera libre de nubes.
5. Al influir en la formación de las nubes como se afirma en el punto 3, y por lo tanto influir en la emisión de la radiación infrarroja emitida.

Algunas de esas influencias representan efectos de calentamiento o de enfriamiento en la atmósfera del planeta. La absorción de la radiación incidente (solar o terrestre) por partículas aerosólicas siempre es una influencia de calentamiento que generalmente ocurre de manera simultánea con el esparcimiento. El retroesparcimiento de la radiación solar entrante es un efecto de enfriamiento (Twomey, 1977).

En investigaciones relacionadas con el cambio climático, las partículas aerosólicas son clasificadas en estratosféricas y en troposféricas. Las estratosféricas están generalmente asociadas con las erupciones volcánicas. Las partículas aerosólicas resultantes de la actividad volcánica pueden alcanzar la estratosfera donde son transportadas alrededor del globo terrestre por los vientos. Estas partículas pueden permanecer flotando durante meses o años, y afectar las condiciones de iluminación de la

superficie terrestre por periodos prolongados, como ocurrió después de las erupciones del Chichón y el Pinatubo. Las erupciones arrojan gases azufrosos que a través de reacciones fotoquímicas forman partículas que se quedan atrapadas en la estratosfera. Estas partículas tienen diámetros menores a $1 \mu m$, con poca absorción en el espectro visible, y como consecuencia de la retrodispersión de la luz solar producen enfriamiento en la superficie terrestre, siendo mayor mientras mayor es el espesor óptico de la capa aerosólica de la estratosfera. Los efectos del aerosol sobre la temperatura del planeta no dependen únicamente de su profundidad óptica, de la absorción de radiación y del tamaño promedio, sino también de la variación de estas propiedades con el tiempo.

Las partículas troposféricas son producidas por procesos naturales e industriales, y se encuentran bajo continuas transformaciones físicas y químicas, particularmente en las nubes, y son eliminados de la atmósfera principalmente por precipitación.

Los cambios en la transferencia de energía por radiación, debido a las partículas generadas por la industria y los vehículos automotores, han sido reconocidos como una causa importante del cambio climático. El aerosol que contiene dióxido de azufre (SO_2), producto de fuentes naturales y antropogénicas, produce un cambio sobre el clima de manera directa debido a sus propiedades ópticas. El aerosol que se compone de partículas de carbón, se produce principalmente en fuentes antropogénicas y está compuesto por partículas de carbón negro y de carbón orgánico. El carbón orgánico es similar al dióxido de azufre (SO_2) en términos de sus propiedades de esparcimiento. Sin embargo, las partículas de carbón negro absorben grandes cantidades de radiación solar e incrementan la cantidad de radiación absorbida por la atmósfera.

Por otra parte, las partículas producidas por el impacto de un asteroide (Toon et al., 1982) o por guerra nuclear (Turco et al., 1983) podrían tener un gran espesor óptico que impediría a la radiación solar incidente alcanzar la superficie terrestre. Esto originaría un calentamiento en la atmósfera de-

bido a la convección de las partículas aerosólicas y un enfriamiento posterior de la superficie de la Tierra, cuando la atmósfera llegara al equilibrio termodinámico. A este suceso se le llama *invierno nuclear*.

Para concluir, falta decir que algunos científicos (Dubovik et al., 2002; Charlson et al. 1992; Houghton et al., 1996; Tegen et al., 1996; Hansen et al., 1997 y 2000; Heintzenberg et al., 1997) concuerdan en que hasta el momento no se tiene un conocimiento detallado de las propiedades ópticas del aerosol que nos permita comprender los cambios en el clima de la Tierra, originados por la interacción de las partículas que forman al aerosol, con la radiación solar y terrestre, y con las nubes.

1.2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo de tesis son:

1. Contribuir al conocimiento de las propiedades ópticas del aerosol en la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México, mediante el análisis del:
 - a) albedo por esparcimiento simple del aerosol,
 - b) factor de asimetría,
 - c) espesor óptico de extinción y de esparcimiento,
 - d) coeficientes de turbiedad de Ångstrom,
 - e) visibilidad, y
 - f) función fase

de las partículas que forman el aerosol, proporcionados por la base de datos AERONET (AErosol RObotic NETwork), en particular los correspondientes a la Ciudad de México.

2. Mostrar que las propiedades ópticas que pueden calcularse con el modelo creado en este trabajo no difieren significativamente de las propiedades ópticas proporcionadas en la base de datos AERONET. La diferencia entre estos modelos, radica en que el modelo AERONET, las propiedades ópticas son calculadas directamente de los datos obtenidos en tiempo real (los espesores ópticos). En cambio, en el modelo utilizado en este trabajo de tesis, las propiedades ópticas se calculan a partir de la distribución por tamaños y de los índices de refracción de las partículas aerosólicas proporcionadas en la base de datos AERONET, los cuales fueron calculados de los datos en tiempo real. Además, el modelo utilizado en este trabajo es más sencillo que el de AERONET, porque las ecuaciones utilizadas son más sencillas, al no involucrar una gran variedad de métodos de aproximación en las recuperaciones por inversión.
3. Determinar si existe o no un incremento, a lo largo de los años 1999, 2000, 2001 y 2002, en las propiedades ópticas mencionadas líneas arriba.
4. Encontrar si hay o no diferencias entre las propiedades ópticas de las partículas aerosólicas entre la mañana y la tarde en cada uno de los cuatro años ya mencionados.

Para cumplir con estos objetivos se construyeron y se adecuaron un conjunto de programas de cómputo, en FORTRAN (Muhlia, A.;2004) y C, basados en la teoría de G. Mie. Utilizando estos programas se calculó: el albedo por esparcimiento simple, el factor de asimetría, los coeficientes de turbiedad de Ångstrom y la visibilidad.

Estas propiedades ópticas tienen una participación fundamental en la solución de la ecuación de la transferencia por radiación en el aerosol atmosférico y en algunas de las menos compli-

cadras (Grenoble, 1984). Las soluciones aproximadas de esta ecuación sirven para determinar los efectos, sobre el clima, de las emanaciones de las erupciones volcánicas y de la contaminación atmosférica generada por el hombre.

5. Crear una base de datos con las propiedades ópticas calculadas en este trabajo de tesis, almacenada en un disco compacto (CD), para futuros estudios enfocados en la evolución, en el tiempo, de las propiedades ópticas del aerosol de la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México.
6. Guardar el paquete de programas que se construya en este trabajo en un CD, para una utilización posterior, como por ejemplo:
 - a) Calcular las propiedades ópticas del aerosol de otros lugares del mundo.
 - b) Complementar otro paquete de programas que pueda construirse en el futuro. Dicho paquete tendría que trabajar con los datos obtenidos en tiempo real por el fotómetro solar CIMEL, para depurarlos y calcular la distribución por tamaños y el índice de refracción del aerosol que se desea estudiar. La creación de este paquete de programas daría independencia al usuario, en la obtención y manejo de datos, y por lo tanto, ya no se dependería de cuando pueda el AERONET proporcionar una base de datos lo más actualizada posible.

2. AEROSOL ATMOSFÉRICO

2.1. *Definición y Características del Aerosol*

Aerosol: Es un coloide formado por partículas (sólidas, líquidas o mixtas) que se encuentran en suspensión en el aire. Las partículas forman la fase dispersa, mientras que el aire forma la fase continua de dicho coloide. Las partículas sólidas constituyen los humos y los polvos, mientras que las líquidas y las mixtas forman las nubes y las neblinas. Las partículas mixtas son generalmente gotas líquidas con un núcleo sólido; en la fase líquida se encuentran sustancias que formaron en un principio parte del núcleo, pero que se integraron a la envoltura líquida por ser solubles en agua (Leyva, 2003).

Partículas aerosólicas: En este trabajo de tesis, se maneja el término **partículas aerosólicas**, en sustitución de su equivalente en inglés **aerosols**, porque hablar de **aerosoles** en español no tiene sentido. Se define **partículas aerosólicas** como aquellas partículas que se encuentran en suspensión en el aire y que constituyen el aerosol. De esta manera se puede hablar de distintos tipos de partículas aerosólicas de acuerdo a su origen y/o composición. Entonces, de acuerdo con lo descrito anteriormente, es incorrecto hablar de **tipos de aerosoles**.

Las partículas que forman el aerosol, idealmente consideradas esféricas, son gobernadas por distintas leyes físicas debido a que tienen tamaños diferentes (Twomey, 1997). Por ejemplo, la trayectoria de las partículas que forman el aerosol atmosférico, con radios de aproximadamente 1 nm llamadas *núcleos de Aitken* (Hobbs., 2000) obedecen al movimiento Browniano, mientras que las partículas

con radios entre $0.1\mu\text{m}$ y $1\mu\text{m}$ denominadas *gigantes* caen al suelo debido a la fuerza de la gravedad. En los párrafos siguientes se hará una breve descripción de las principales características que tienen las partículas en cada orden de magnitud (ver figura 2.1). Las partículas con radios del orden de:

- 1 nm son las más pequeñas. Pueden detectarse utilizando contadores de núcleos de condensación. Tienen movimientos Brownianos que les permiten alcanzar las paredes del recipiente que los contiene, y por lo tanto coagulan muy rápidamente cuando entran en contacto con partículas de mayor radio.
- 10 nm su coagulación no es excesivamente rápida. Estas partículas pueden observarse utilizando un microscopio electrónico.
- De $0.1\mu\text{m}$ a $1\mu\text{m}$ son denominadas *partículas grandes*.
- $10\mu\text{m}$ son, por ejemplo, gotas de agua que se encuentran en las nubes. La velocidad de caída de estas partículas, que tienen una densidad aproximada de 2 g/cm^3 , es de 2 cm/s . Estas partículas se ven a simple vista y sus dimensiones pueden medirse utilizando un microscopio óptico.
- $100\mu\text{m}$ son, por ejemplo, gotas de agua que se encuentran en las lloviznas. Su velocidad de caída es de 1 m/s . Las gotas de este tamaño son producidas por el rocío del mar y caen rápidamente, por lo que no viajan grandes distancias.
- 1 mm son, por ejemplo, gotas de agua que forman parte de la lluvia. Se producen alrededor de 4×10^{22} gotas por año en la atmósfera.

La composición del aerosol atmosférico depende principalmente del lugar geográfico en donde se localice y/o se genere. Esto da origen a distintos tipos de partículas aerosólicas que se clasifican

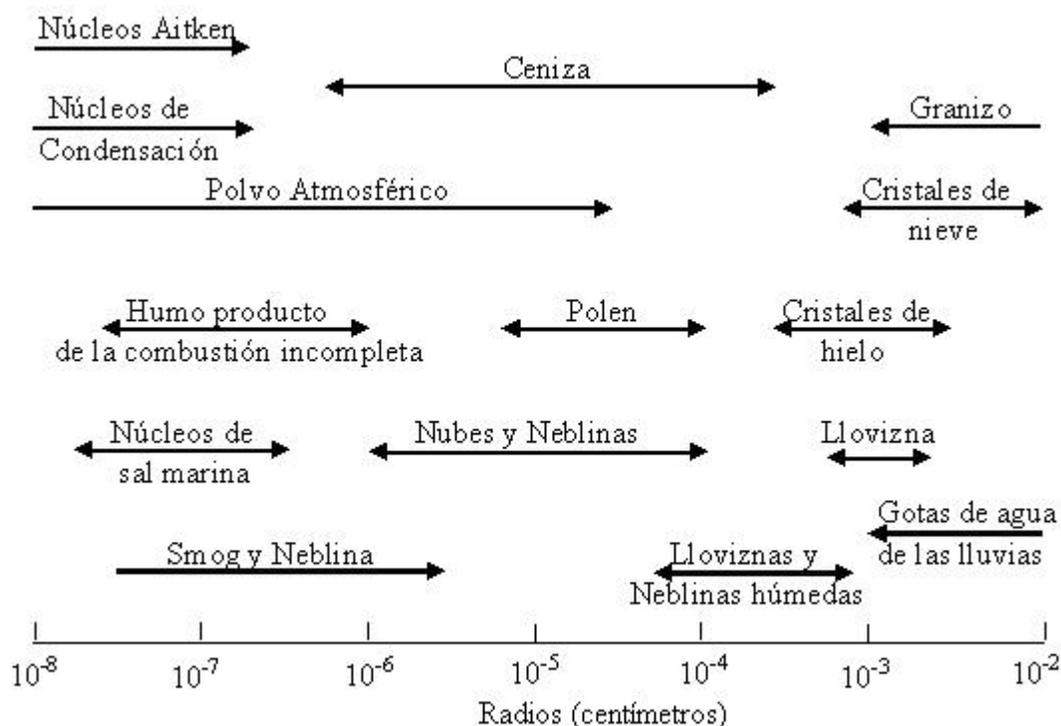


Fig. 2.1: Intervalos de tamaño de las partículas que forman el aerosol. Modificada de Kyle (1991).

como se muestra en la figura 2.2.

1. Las **partículas de polvo** provienen del suelo y de los yacimientos minerales. El proceso fundamental para su incorporación al aerosol atmosférico lo constituye el viento. Estas partículas contienen una alta proporción de silicatos, óxidos de aluminio y de hierro, y sales de calcio. El espectro de diámetros es amplio, llegando hasta las $20 \mu\text{m}$, aunque a alturas de 1 a 2 Km predominan los diámetros de 0.7 a $2.0 \mu\text{m}$ en verano, y en invierno son aún menores. En las zonas planas, su densidad se sitúa entre los 10 y los $30 \text{ mg}/\text{m}^3$, comúnmente.
2. Las **partículas orgánicas** son generalmente bacterias (de 1 a $15 \mu\text{m}$), esporas (de 20 a $60 \mu\text{m}$) y restos de materia orgánica.
3. El **polvo volcánico** es producto de las erupciones volcánicas mayores que arrojan grandes

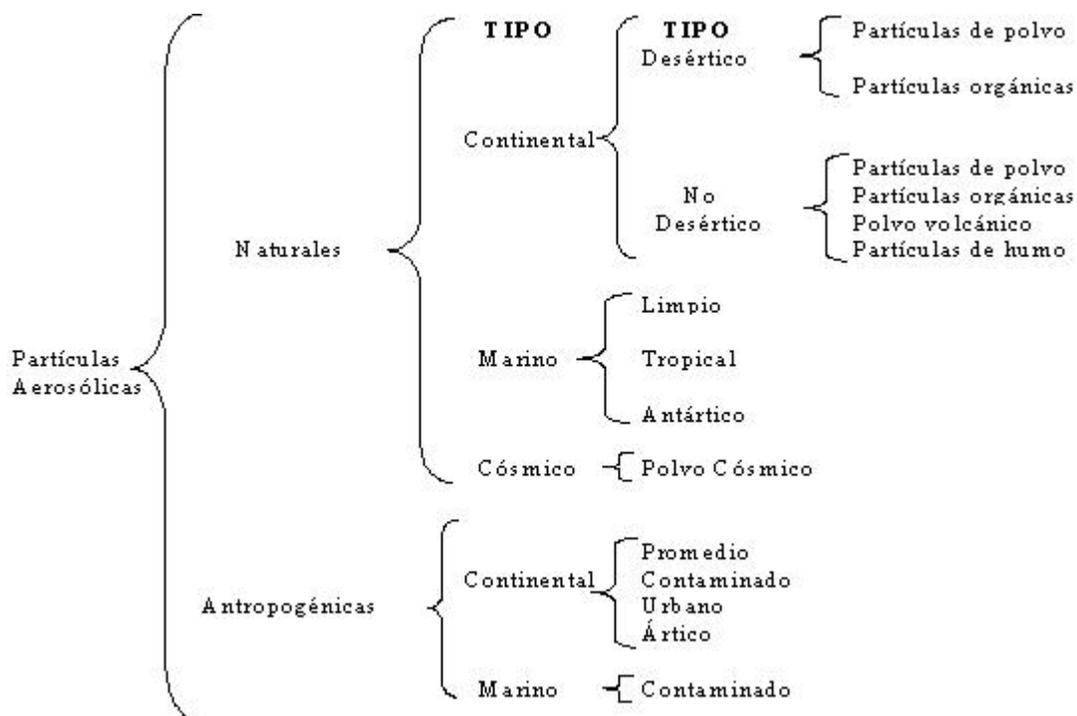


Fig. 2.2: Tipos de partículas aerosólicas. Modificada de Leyva., 2003 y Hess et al., 1998

cantidades de polvo y cenizas, del orden de $10^{10} m^3$ cada vez, hasta alturas de 50 Km, es decir, hasta el tope de la estratosfera. Una vez allí, estos productos se dispersan por toda la estratosfera, precipitándose hacia la superficie muy lentamente (del orden de años). De acuerdo con los resultados obtenidos por H. Kimball (1931), la reducción de la transparencia atmosférica puede alcanzar entre 15 y 25 % en las erupciones importantes, y tardar entre 2 y 3 años en regresar a sus valores pre-eruptivos. Estas velocidades de precipitación indican que las partículas deben tener radios menores a $1 \mu m$.

4. Las **partículas de humo**, o cenizas, se forman en los grandes incendios forestales. El humo producido por el gran incendio forestal que tuvo lugar en el Canadá occidental en septiembre de 1950, se propagó hasta Inglaterra y Noruega, y dio lugar al fenómeno que se llamó *luna azul*, coloración del disco lunar que pudo ser producido por una gran abundancia de partículas

con radios característicos cercanos a las $0.35 \mu\text{m}$.

5. El **polvo cósmico** está constituido por micrometeoritos atrapados por el campo gravitatorio terrestre del espacio cósmico interplanetario. Las partículas con radios menores a $4 \mu\text{m}$ pierden su velocidad al penetrar a las primeras capas atmosféricas, calentándose muy levemente para después precipitarse con mayor o menor velocidad hacia la superficie. Los meteoritos de mayores dimensiones se calientan por fricción y se evaporan; sin embargo, los vapores bajo condiciones ambientales adecuadas se condensan nuevamente y forman partículas con radios menores a $0.01 \mu\text{m}$. En el fondo de los océanos hay una acumulación muy importante de esferas metálicas, con alto contenido de Níquel y Fierro. También se ha determinado la presencia de isótopo radiactivo de Aluminio Al^{26} de origen cósmico. Gracias al polvo cósmico, en los eventos conocidos como *lluvia de estrellas*, por ejemplo el de las *perseidas*, estrellas fugaces observadas a mediados del mes de agosto y que parecen provenir de la Constelación de Perseo, el flujo de radiación solar disminuye hasta en 1 o 2%. El flujo de material cósmico hacia la Tierra puede estimarse en $1.4 \times 10^7 \text{ ton año}^{-1}$.

Las partículas aerosólicas del tipo:

6. **Marino limpio** se localizan en áreas marinas con escasa actividad humana. El aerosol no contiene hollín, ni dióxido de azufre de origen antropogénico (SO_2). Su composición es fundamentalmente de sales marinas.
7. **Marino tropical** forman un aerosol con una baja densidad de sales marinas.
8. **Marino antártico**, que se encuentran sobre el continente antártico, componen un aerosol con partículas de mineral y de sales marinas.

9. **Continental promedio** forman un aerosol que contiene hollín y gran cantidad de partículas solubles e insolubles al agua.
10. **Continental contaminado** se localizan en áreas altamente contaminadas por el hombre. La densidad de masa de las partículas solubles en agua es de más del doble que en el aerosol formado por partículas aerosólicas del tipo **continental promedio**.
11. **Urbano** se localizan en las áreas urbanas grandemente contaminadas. La densidad de masa de las partículas solubles e insolubles al agua es dos veces más que en el aerosol formado por partículas aerosólicas del tipo **continental contaminado**.
12. **Ártico** forman un aerosol que contiene una gran cantidad de hollín que es transportado desde las áreas continentales situadas en latitudes medias.
13. **Marino contaminado** forman un aerosol que contiene una gran cantidad de hollín y de partículas solubles en agua. Sin embargo, la cantidad de sales marinas constituyentes permanecen constantes.

2.2. Fuentes de las Partículas Aerosólicas

Existe una gran variedad de fuentes de partículas aerosólicas. Las principales fuentes son:

1. **Las olas**. Las partículas del tipo marino son creadas gracias a la evaporación de las gotas de agua que son transportadas, a través de una turbulencia, por encima de la superficie marina después de romperse las olas del mar. La composición de aerosol es casi completamente salino.
2. **La vegetación**. La vegetación produce aproximadamente el 25 % de las partículas troposféricas del planeta. El reino vegetal libera a la atmósfera polen, líquidos y savia. También emite

compuestos que forman partículas aerosólicas por reacciones químicas.

3. **Las fábricas, las industrias y los medios de transportes.** Los gases producidos por plantas termoeléctricas, refinerías de petróleo, fábricas y motores de combustión interna, incorporan a la atmósfera grandes cantidades de partículas contaminantes.
4. **Incendios forestales y volcanes.** Un gran incendio forestal que se origine en el oeste de los Estados Unidos produciría soles rojos en la costa este. Los soles rojos son producidos por el esparcimiento de las partículas de humo. Los gases producidos por la erupción de los volcanes contienen grandes volúmenes de materiales sólidos y de partículas sulfatadas. Estos materiales volcánicos no solo se limitan a la troposfera, sino que también llegan a la estratosfera. Una vez ahí permanecen durante varios años a una altitud de aproximadamente 20 Km.

En el Valle de México, las fuentes principales de contaminantes son las siguientes (SEMARNAP, 1996):

1. **Fuentes Móviles.** A este grupo pertenecen los vehículos automotores, de los cuales un 82% corresponde a autos particulares y un 18% a vehículos oficiales, transporte urbano y de carga.
2. **Fuentes Fijas.** Se estima que existen 130,000 establecimientos industriales muchos de los cuales se ubican en el norte y noroeste del Valle de México.
3. **Fuentes Naturales.** Las tolvánicas que se producían sobre todo en el área del vaso de Texcoco han disminuido por la urbanización de la zona. Aún así, el número de hectáreas erosionadas se estima en 22,000.

Sin embargo, no se cuenta con un estudio que permita calcular en qué porcentaje contribuyen estas fuentes a la contaminación por partículas. En México, más del 90% de la energía utilizada

proviene de la combustión de los hidrocarburos, el 95 % del CO₂ es emitido por el sector transporte y el 75 % del SO₂ es emitido por la industria, producción de energía y servicios. De igual manera, las industrias de la elaboración de papel y de cemento son emisoras de partículas junto con las refinerías industriales (Díaz, 1999).

Una fuente adicional de partículas que se debe considerar es el levantamiento de polvo asociado con la actividad de la agricultura y los tiraderos de basura a cielo abierto.

2.3. Características Ópticas

Las propiedades ópticas de las partículas que forman el aerosol atmosférico no sólo son responsables de la reducción de la visibilidad en una atmósfera contaminada y de muchos efectos espectaculares (arcoiris, coloreados atardeceres, halos alrededor del sol y de la luna, etc.), sino que también son uno de los constituyentes atmosféricos responsables de perturbar el clima de nuestro planeta (la variabilidad del flujo de radiación solar, el efecto invernadero, etc.). Fue hasta la década pasada cuando algunos científicos decidieron incorporar las propiedades ópticas de las partículas aerosólicas (Pender et al., 1994), y su interacción con la radiación térmica y solar (Twomey, 1984; Charlson et al., 1992; IPCC, 1994) en modelos climáticos, para poder entender entre otros fenómenos, el efecto de los gases de invernadero sobre los climas pasados y sobre el futuro cambio climático (Hansen et al., 2000). En consecuencia, las últimas versiones de los modelos climáticos, como las del National Center for Atmospheric Research (NCAR), incorporan los efectos del calentamiento por radiación del metano, óxidos de nitrógeno y CFCs (Briegleb, 1992).

Una de las propiedades ópticas es la *extinción*, la cuál está definida como el proceso en el cuál disminuye la intensidad de un haz de luz incidente, a lo largo del eje de incidencia, después de que

ha sido esparcido y absorbido por las partículas aerosólicas.

El esparcimiento es un proceso físico mediante el cuál una partícula que se encuentra en la trayectoria de una onda electromagnética, subtrae la energía de la onda incidente para luego emitirla en todas direcciones. Por lo tanto la partícula se comporta como una fuente puntual de la energía esparcida. El tamaño de las partículas que forman el aerosol atmosférico está directamente relacionado con la manera en como las partículas esparcen la radiación absorbida.

Para una partícula esférica, el *parámetro de tamaño*, x , está definido como la razón que hay entre la longitud de la circunferencia de la partícula y la longitud de onda (λ) de la radiación incidente, es decir, $x = 2\pi a/\lambda$; donde a es el radio de la partícula. Si $x \ll 1$, el esparcimiento es llamado ***esparcimiento de Rayleigh***. Para aquellas partículas con tamaños mayores o iguales a las longitudes de onda ($x \geq 1$), el esparcimiento es llamado ***esparcimiento de Lorenz-Mie*** (Liou, 1980). La figura 2.3 ilustra los patrones de esparcimiento de las partículas esféricas con un tamaño del orden de $10^{-4} \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$, que son iluminadas con una longitud de onda de $0.5 \mu\text{m}$, perteneciente al espectro visible. Una partícula pequeña esparce la luz incidente de igual manera hacia delante y hacia atrás sobre el eje de incidencia. Cuando la partícula llega a ser más grande, la energía dispersada se incrementa concentrándose en la dirección delantera con características de esparcimiento complejas. Debido a la simetría esférica con respecto al eje de incidencia, los patrones de esparcimiento para otros planos son los mismos que los presentados en la figura 2.3. El esparcimiento de la luz del sol por medio de las gotas de agua que forman las nubes y las gotas de lluvia, produce magníficos arcoiris y glorias que vemos en la vida diaria (Liou, 2002).

Una aplicación importante de la teoría del *esparcimiento* y de la *extinción* de la luz es el estudio del *rango visual* o *Visibilidad*. El *rango visual* expresa qué tan lejos se puede ver hacia una dirección determinada, o bien, expresa la distancia a la cuál un objeto es apenas perceptible. El *rango visual*

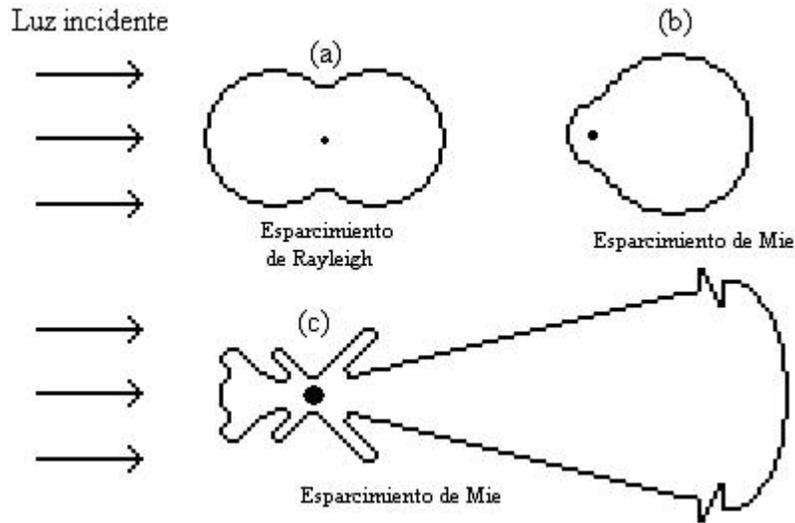


Fig. 2.3: Patrones angulares de la intensidad de esparcimiento de tres partículas de diferente tamaño, iluminadas a una longitud de onda de $0.5 \mu\text{m}$: (a) $10^{-4} \mu\text{m}$, (b) $0.1 \mu\text{m}$ y (c) $1 \mu\text{m}$.

atmosférico está principalmente gobernado por el esparcimiento y la absorción de la luz por las partículas que forman el aerosol atmosférico. El *rango visual* está dado por dos factores: el contraste entre un objeto y sus alrededores, y la agudeza visual. Una persona puede ver fácilmente las estrellas en una noche clara debido al contraste extremo entre la brillantez de la estrella y lo oscuro del espacio. En la mayoría de las situaciones, es la falta de contraste aparente entre un objeto y sus alrededores lo que limita la facilidad de observar un objeto. Las partículas aerosólicas, principalmente en el rango de tamaños de $0.1 \mu\text{m}$ a $1 \mu\text{m}$, son las que reducen el contraste aparente por el esparcimiento de la luz (Hinds, 1999). Para un objeto visto hacia el horizonte a la luz del día, la *visibilidad* se obtiene, utilizando la ecuación de Koschmeider (ec. 2.1) para un valor de $\epsilon = 0.02$. Este valor es por definición el límite del contraste¹ que permite distinguir los objetos oscuros del fondo. La distancia a la cual el contraste cae a este valor es conocida como el *rango visual*

¹ El contraste C entre un objeto de brillantez B y el fondo de brillantez (B_0) es por definición: $C = \frac{B-B_0}{B_0}$.

(Twomey, 1977).

$$Vis = \frac{3.912}{B_{ext}}, \quad (2.1)$$

Bajo estas condiciones la visibilidad es una función inversa del coeficiente de extinción atmosférico (B_{ext}).

2.4. Teoría de Rayleigh

Rayleigh, en su teoría de esparcimiento, considera un rayo de luz linealmente polarizado que ilumina a una partícula esférica, dieléctrica, homogénea e isotrópica, que tiene un radio mucho menor a la longitud de onda (λ) de la radiación incidente. Esta radiación cubre a la partícula esférica con un campo eléctrico homogéneo \bar{E}_0 llamado *campo aplicado*. En presencia de este campo, las cargas contenidas dentro de la partícula se redistribuyen para formar un dipolo eléctrico orientado en la dirección del campo \bar{E}_0 . A este fenómeno se le llama *polarización*, que no debe confundirse con la polarización de la luz. El campo eléctrico dentro de la partícula, producido por el dipolo eléctrico es uniforme y paralelo al campo externo. Fuera de la partícula, el campo eléctrico existente es el resultado de la superposición del *campo aplicado* (\bar{E}_0) en ausencia de la partícula y del campo producido por el dipolo eléctrico. Como el *campo aplicado* oscila armónicamente, variando su magnitud desde un valor positivo a un valor negativo y viceversa, también lo hace el dipolo. Su oscilación produce una onda electromagnética plana y polarizada: la *onda esparcida*. Es importante mencionar que aunque la radiación esparcida por la partícula tiene la misma frecuencia que la de la radiación incidente, su polarización y dirección de propagación es diferente.

Para poder calcular el campo eléctrico esparcido, hay que considerar un punto P de observación situado a una distancia $r \gg \lambda$ del dipolo y a un ángulo γ con respecto al momento dipolar.

El campo eléctrico obtenido de esta manera es:

$$\overline{E} = -\overline{E}_0 \frac{e^{-ik(r-ct)}}{r} k^2 \alpha \text{sen} \gamma, \quad (2.2)$$

donde k es el número de onda, y $kc = \omega$ es la frecuencia circular. El vector de Poynting de la radiación incidente y el de la radiación esparcida, en dirección a un punto de observación, determinan el *plano de referencia*, o bien, el *plano de esparcimiento*. Como el campo eléctrico (\overline{E}) puede descomponerse en sus componentes ortogonales, tenemos que el campo eléctrico del dipolo en el punto P de observación posee una componente perpendicular $E(r)$ y una paralela $E(l)$ al plano de esparcimiento. Este campo eléctrico, puede descomponerse en sus componentes perpendicular y paralelo:

$$\overline{E}_r = -E_{0r} \frac{e^{-ik(r-ct)}}{r} k^2 \alpha \text{sen} \gamma_1, \quad (2.3)$$

$$\overline{E}_l = -E_{0l} \frac{e^{-ik(r-ct)}}{r} k^2 \alpha \text{sen} \gamma_2, \quad (2.4)$$

donde $\gamma_1 = \pi/2$, $\gamma_2 = \pi/2 - \Theta$ y Θ es el ángulo de esparcimiento, entre la dirección de propagación de la onda incidente y la de la onda esparcida. Sus intensidades correspondientes son:

$$I_r = \frac{I_{0r} k^4 \alpha^2}{r^2}, \quad (2.5)$$

$$I_l = \frac{I_{0l} k^4 \alpha^2 \cos^2 \Theta}{r^2}, \quad (2.6)$$

donde I_r e I_l son las componentes perpendicular y paralela de la intensidad polarizada. Y para la luz incidente despolarizada, su intensidad es:

$$I = \frac{I_0}{r^2} \alpha^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \frac{1 + \cos^2 \Theta}{2}. \quad (2.7)$$

Esta es la ecuación original derivada por Rayleigh. De acuerdo con las ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.7, la intensidad dispersada por una partícula depende de las características de polarización de la luz incidente. Cuando luz polarizada incide perpendicularmente sobre el plano de referencia, la intensidad de esparcimiento es independiente de la dirección en la que se encuentre el punto de observación sobre el *plano de esparcimiento* (en este caso, el esparcimiento es isotrópico), y cuando incide paralelamente la intensidad esparcida es una función del $\cos^2 \Theta$. Ahora bien, si la luz incidente está despolarizada (como la luz solar) la intensidad esparcida depende de $1 + \cos^2 \Theta$. Los patrones de esparcimiento angular para los tres tipos de polarización incidente, se ilustran en la figura 2.4. En este diagrama se observa que para la luz incidente despolarizada, el esparcimiento tiene dos máximos: uno hacia delante (0°) y otro hacia atrás (180°); y dos mínimos, uno a la izquierda (90°) y otro a la derecha (270°). El esparcimiento de la luz por pequeñas partículas no está confinada solamente al plano de incidencia, sino que además es visible en todas las direcciones azimutales. La función de fase $P(\cos \Theta)$ es un parámetro adimensional que ayuda a describir la distribución angular de la energía esparcida junto con el esparcimiento múltiple y la teoría de la transferencia por radiación, y puede aplicarse al estudio de diferentes atmósferas planetarias. Por definición, la función de fase debe estar normalizada a la unidad:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{P(\cos \Theta)}{4\pi} \sin \Theta d\Theta d\phi = 1. \quad (2.8)$$

Resolviendo esta última integral, se obtiene

$$P(\cos \Theta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \Theta). \quad (2.9)$$

Despejando $1 + \cos^2 \Theta$ de la ec.2.9 y sustituyendo en la ec.2.7, se obtiene:

$$I(\Theta) = \frac{I_0}{r^2} \alpha^2 \frac{128\pi^2}{3\lambda^4} \frac{P(\Theta)}{4\pi}, \quad (2.10)$$

donde se observa que la intensidad esparcida es directamente proporcional a la función fase, e inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda.

El flujo esparcido (o potencia, en unidades de energía por unidad de tiempo), f , puede ser evaluado integrando la densidad de flujo de esparcimiento ($I\Delta\Omega$) sobre un área apropiada a una distancia, r , de la partícula:

$$f = \int_{\Omega} (I\Delta\Omega) r^2 d\Omega, \quad (2.11)$$

donde $r^2 d\Omega$ es el área subtendida de acuerdo a la definición del ángulo sólido. Utilizando la diferencial del ángulo sólido

$$d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi, \quad (2.12)$$

y las ecs. 2.10, 2.11 y 2.12 se obtiene el flujo esparcido isotrópicamente:

$$f = \frac{F_0 \alpha^2 128\pi^5}{3\lambda^4}, \quad (2.13)$$

donde la densidad de flujo incidente F_0 es igual a $I_0\Delta\Omega$.

Definimos, ahora la sección transversal de esparcimiento σ_s de una partícula como

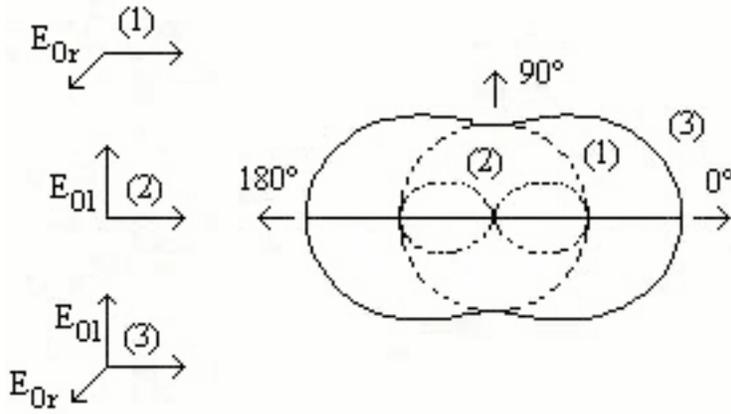


Fig. 2.4: Diagrama polar de la intensidad esparcida; (1) luz incidente polarizada con el vector eléctrico perpendicular al plano de esparcimiento, (2) luz incidente polarizada con el vector eléctrico sobre el plano de esparcimiento, y (3) luz incidente despolarizada. Tomada de Liou, K. N. 1980.

$$\sigma_s = \frac{f}{F_0} = \frac{\alpha^2 128 \pi^5}{3 \lambda^4}. \quad (2.14)$$

La sección transversal de dispersión (en unidades de área) representa la cantidad de energía incidente que es eliminada de la dirección original debido a un simple evento de esparcimiento, de tal manera que la energía está redistribuida isotrópicamente sobre el área de una partícula de radio r , cuyo centro se encuentra donde se halla la partícula. En términos de la sección transversal de esparcimiento, la intensidad dispersada puede expresarse como

$$I(\Theta) = I_0 \frac{\sigma_s}{r^2} \frac{P(\Theta)}{4\pi}. \quad (2.15)$$

Esta es la condición de esparcimiento de Mie y de la óptica geométrica. La polarizabilidad α , puede ser derivada del principio de dispersión de las ondas electromagnéticas, y está dada por

$$\alpha = \frac{3}{4\pi N_s} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right), \quad (2.16)$$

donde N_s es el número total de partículas por unidad de volumen, y m es el índice de refracción adimensional de las partículas. A esta ecuación se le llama la *fórmula de Lorentz-Lorentz*. Generalmente, los índices de refracción de las partículas atmosféricas están compuestos de una parte real (m_r) y una parte imaginaria (m_i) correspondiendo, respectivamente a las propiedades de esparcimiento y de absorción de las partículas. Para longitudes de onda del espectro solar visible, la parte imaginaria de los índices de refracción es insignificamente pequeña, tal que la absorción de la radiación solar debe ser despreciada en las discusiones de esparcimiento. La parte real del índice de refracción del espectro solar está muy cercano a 1, sin embargo, dependen significativamente de la longitud de onda (o de la frecuencia) de la radiación incidente.

Tomando en cuenta la parte real del índice de refracción en la polarizabilidad, la sección transversal de dispersión (ec.2.14) puede reescribirse como

$$\sigma_s = \frac{8\pi^3 (m_r^2 - 1)^2}{3\lambda^4 N_s^2} f(\delta), \quad (2.17)$$

donde $f(\delta)$ es un factor de corrección, que es introducido para considerar la propiedad anisotrópica de las partículas. Esto significa que el índice de refracción de las partículas varía a lo largo de las direcciones X, Y, Z; y por lo tanto el índice de refracción es un vector no un escalar.

El espesor óptico de las partículas que se encuentran flotando en la atmósfera, puede ser calculada partiendo de la sección transversal de esparcimiento, para obtener

$$\tau(\lambda) = \int_0^{z_t} \sigma_s(\lambda, z) dz, \quad (2.18)$$

donde $N(Z)$ la densidad numérica de moléculas como una función de la altura, y z_t es la frontera superior de la atmósfera. La profundidad óptica es un parámetro físico que indica la potencia de atenuación de las partículas con respecto a una longitud de onda específica de la luz incidente.

Uno de los fenómenos que explica la teoría de esparcimiento de Rayleigh, es la polarización del cielo. El grado de polarización lineal es un parámetro que es utilizado en la percepción remota, y está definido como

$$LP = - \left(\frac{Q}{I} \right), \quad (2.19)$$

donde I es la intensidad y Q es el grado de polarización. Entonces de las ecuaciones 2.5 y 2.6 puede obtenerse el grado de polarización lineal en el caso del esparcimiento único de Rayleigh

$$LP(\Theta) = - \frac{I_l - I_r}{I_l + I_r} = - \frac{\cos^2 \Theta - 1}{\cos^2 \Theta + 1} = \frac{\text{sen}^2 \Theta}{\cos^2 \Theta + 1}. \quad (2.20)$$

La teoría de esparcimiento de Rayleigh predice la existencia de puntos neutrales, es decir, puntos de cero polarización en direcciones hacia delante y hacia atrás. De hecho, Arago descubrió en 1809 la existencia de un punto neutral a los 25° por encima de la dirección antisolar (dirección exactamente opuesta a la del sol). Otros dos puntos neutrales fueron descubiertos por Babinet en 1840 y por Brewster en 1842. Las posiciones relativas de estos tres puntos neutrales en el cielo, varían alrededor de 5° dependiendo de la turbiedad (una indicación de la cantidad de aerosol presente en la atmósfera), la elevación del ángulo del sol y las características de reflexión de la superficie en las cuales las observaciones son realizadas. Como los dos últimos parámetros pueden fácilmente ser medidos mediante un experimento, las variaciones en los puntos neutrales dan una indicación de la turbiedad de la atmósfera.

2.5. Teoría de Mie

La teoría de Mie (1908) es el resultado de resolver las ecuaciones de Maxwell para la interacción entre una partícula esférica, isotrópica y homogénea de radio r , con índice de refracción m (que puede ser real o complejo), y una onda incidente plana y linealmente polarizada de longitud de onda λ .

El problema de Mie está expresado en términos de los siguientes parámetros básicos:

- El *parámetro de tamaño* $x = kr$, donde $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda que denota la constante de propagación en el vacío, λ es la longitud de onda en el vacío y r es el radio de la esfera.
- El *índice de refracción* (m) de la partícula, que puede ser real o complejo, y el del vacío o aire ($m_2 = 1$), que es el medio en el que se considera que se encuentra inmersa la partícula.
- El *ángulo de esparcimiento* (Θ) determinado por la dirección de la onda incidente, el punto de esparcimiento y la dirección del punto de observación.

Para encontrar la solución del problema de Mie, se toma como origen el centro de la partícula esférica, el eje z se orienta paralelamente a la dirección de propagación de la onda incidente y el eje x se sitúa en el plano de vibración eléctrica de la onda incidente.

La onda incidente que satisface las condiciones a la frontera (entre el medio exterior y el medio de la partícula) y al infinito se expresa de la siguiente manera:

$$u = e^{i\omega t} \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} (-a_n) (-1)^n \left(\frac{2n+1}{n(n+1)} \right) P_n^l(\cos \theta) h_n(kr), \quad (2.21)$$

$$v = e^{i\omega t} \sin\varphi \sum_{n=1}^{\infty} (-b_n) (-1)^n \left(\frac{2n+1}{n(n+1)} \right) P_n^l(\cos\theta) h_n(kr), \quad (2.22)$$

La solución al problema de esparcimiento consiste en encontrar las constantes a_n y b_n que hagan a las ecuaciones de Maxwell satisfacer las condiciones a la frontera. Estas condiciones requieren la continuidad de v , $1/m$, mu , ∂_{ru}/∂_r y ∂_{rv}/∂_r . Los valores aceptables para las constantes están establecidos en términos de las funciones $F_n(z) = (\pi z/2)^{\frac{1}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(z)$, $J_{n+\frac{1}{2}}(z) = (\pi z/2)^{\frac{1}{2}} N_{n+\frac{1}{2}}(z)$ y $Q(z) = F_n(z) + iG_n(z)$, y son:

$$a_n = \frac{F_n'(y) F_n(x) - m F_n(y) F_n'(x)}{F_n'(y) Q_n(x) - m F_n(y) Q_n'(x)}, \quad (2.23)$$

$$b_n = \frac{m F_n'(y) F_n(x) - F_n(y) F_n'(x)}{m F_n'(y) Q_n(x) - F_n(y) Q_n'(x)}. \quad (2.24)$$

Las funciones complejas $S_1(\theta)$ y $S_2(\theta)$ describen el proceso de esparcimiento de manera completa. La simetría esférica de la partícula, combinada con la dirección de la radiación incidente, produce una simetría cilíndrica causando que la distribución de la radiación esparcida sea independiente del ángulo azimutal. Las funciones $S_1(\theta)$ y $S_2(\theta)$, son:

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2n+1}{n(n+1)} \right) [a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)], \quad (2.25)$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2n+1}{n(n+1)} \right) [b_n \pi_n(\cos\theta) + a_n \tau_n(\cos\theta)], \quad (2.26)$$

donde las funciones angulares son:

$$\pi_n(\cos \theta) = \frac{P_n^{(l)}(\cos \theta)}{\text{sen} \theta}, \quad (2.27)$$

$$\tau_n(\cos \theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^{(l)}(\cos \theta). \quad (2.28)$$

La intensidad de esparcimiento de la radiación incidente polarizada en los ángulos azimutales θ y ϕ es:

$$I_\phi = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} |S_1|^2 \text{sen}^2 \phi = \frac{\lambda^2}{4\pi r^2} i_1 \text{sen}^2 \phi, \quad (2.29)$$

$$I_\theta = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} |S_2|^2 \cos^2 \phi = \frac{\lambda^2}{4\pi r^2} i_2 \cos^2 \phi, \quad (2.30)$$

donde i_1 e i_2 son llamadas las funciones de intensidad, las cuales dependen del *índice de refracción* (m), del parámetro de tamaño (x) y del ángulo de esparcimiento (Θ). I_ϕ e I_θ son la componentes perpendicular y paralela, respectivamente, al plano de esparcimiento.

Este plano contiene el vector de Poynting de la onda de incidencia y de la onda esparcida. Cada una de las componentes de la luz esparcida (I_ϕ e I_θ) pueden surgir de la componente del rayo de luz polarizado en el mismo sentido, es decir, I_ϕ e I_θ surgen de un haz de luz incidente polarizada de intensidad $\text{sen}^2 \phi$ y $\cos^2 \phi$ que inciden sobre la partícula de manera perpendicular y paralela, respectivamente, al plano de esparcimiento.

Consideremos ahora la *sección transversal* o la *energía total sustraída* por un rayo de luz. El problema es un poco más complicado que en el caso del esparcimiento de Rayleigh debido a que cuando el índice de refracción de la partícula es complejo, la energía se pierde al ser absorbida y esparcida

por la partícula. En consecuencia, la *sección transversal* total para la partícula incluye la *energía sustraída* del rayo de luz incidente debido a la absorción y al esparcimiento. A la *energía sustraída* se le llama *sección transversal de extinción*, σ_{ext} , y es la suma de la sección transversal de esparcimiento y de la sección transversal de absorción:

$$\sigma_{ext} = \sigma_{esp} + \sigma_{abs}, \quad (2.31)$$

donde

$$\sigma_{esp} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [|a_n|^2 + |b_n|^2], \quad (2.32)$$

$$\sigma_{ext} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [\text{Re}(a_n + b_n)]. \quad (2.33)$$

Los correspondientes factores de eficiencia para el esparcimiento y la extinción se obtienen al dividirse entre la *sección transversal geométrica* de la partícula (πa^2):

$$Q_{esp} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [|a_n|^2 + |b_n|^2], \quad (2.34)$$

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [\text{Re}(a_n + b_n)], \quad (2.35)$$

donde x es el parámetro de tamaño.

La eficiencia de absorción también es un parámetro importante. La *sección transversal de absorción*, σ_{abs} , es la diferencia entre la *sección transversal de extinción* y la *sección transversal de esparcimiento*.

$$\sigma_{abs} = \sigma_{ext} - \sigma_{esp}, \quad (2.36)$$

Ya que la eficiencia es la razón del área efectiva y del área geométrica, la eficiencia de absorción es la diferencia entre la *eficiencia de extinción* y de *esparcimiento*.

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{esp}. \quad (2.37)$$

La interpretación física de la *sección transversal de extinción* es ahora más clara. El producto del flujo de incidencia y de la *sección transversal de absorción* da el flujo absorbido. El producto del flujo incidente y de la *sección transversal de extinción* da el flujo de luz que era afectada por la partícula, a través de la absorción o a través del esparcimiento. La *sección transversal de esparcimiento* da el flujo de radiación afectada que reaparece con una dirección alterada de la propagación o de la polarización.

2.5.1. Albedo por Esparcimiento Simple

Ahora consideremos un flujo de radiación que a traviesa la atmósfera en la dirección de un vector unitario \hat{r} , cuya intensidad (I) es disminuida por el esparcimiento y por la absorción. El cambio sobre un elemento de trayectoria Δr es $-Q_{ext}I\Delta r$.

La dirección del haz de luz está dada por el coseno del ángulo cenital (μ) medido desde la vertical y por el ángulo azimutal (ϕ), el cuál es medido desde cualquier dirección de referencia conveniente. Por medio de la función fase $p(r, r_0)$ se puede saber cuál es la fracción de radiación eliminada por el esparcimiento. Si la polarización es despreciable, entonces la función fase depende únicamente del ángulo entre r y r_0 , comúnmente denotado como $p(\cos\theta)$, o bien, $p(\mu)$, θ o $\cos^{-1}\mu$, el cuál es

el ángulo subtendido entre r y r_0 . La integración sobre todas las direcciones da la energía total esparcida, es decir,

$$\int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 p(\cos \theta) d\mu d\phi = \frac{Q_{esp}}{Q_{ext}} = \omega. \quad (2.38)$$

Donde ω es el albedo por *esparcimiento simple*, el cuál es una medida de conservación. Si, $\omega = 1$ entonces no hay absorción ($Q_{ext} = Q_{esp}$). Si $\omega = 0$, entonces únicamente hay absorción (Q_{esp}).

El *albedo* disminuye conforme la absorción se incrementa. El *albedo por esparcimiento simple* es la fracción de la energía removida del haz de luz que reaparece como energía esparcida.

2.5.2. Factor de Asimetría

El *factor de asimetría* se generó debido a la necesidad que se tenía en el pasado de resolver el problema de la transferencia de energía por radiación en las capas atmosféricas ópticamente profundas. El problema fue resuelto utilizando los diagramas de esparcimiento isotrópicos las ecuaciones integrales del método de Chandrasekhar. En el caso de los diagramas de esparcimiento de Mie, las soluciones no fueron posibles utilizando los métodos clásicos.

El *factor de asimetría* es un intento de reducir la distribución angular de la radiación esparcida a un único parámetro. Este factor es el promedio o el valor estadísticamente esperado del coseno del ángulo de esparcimiento.

$$g = \frac{\int p(\theta) \cos \theta d \cos \theta}{\int p(\theta) d \cos \theta}. \quad (2.39)$$

Donde $p(\theta)$ describe el diagrama de esparcimiento, lo cuál es la energía esparcida por unidad de

ángulo sólido en la dirección de θ .

El *factor de asimetría* también se puede expresar de la siguiente manera:

$$g = \frac{4}{x^2 Q_s} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n(n+2)}{n+1} \right) \operatorname{Re} (a_n a_{n+1}^* + b_n b_{n+1}^*) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2n+1}{n(n+1)} \right) \operatorname{Re} (a_n b_n^*). \quad (2.40)$$

El *factor de asimetría* (g) puede ser nulo, positivo o negativo:

1. Si g es igual a cero ($g = 0$), entonces el radio de las partículas aerosólicas es mucho menor a la longitud de onda de la radiación incidente ($r \ll \lambda$). El esparcimiento de la radiación es isotrópico, con igual esparcimiento hacia adelante y hacia atrás (Esparcimiento de Rayleigh).
2. Si g es positiva ($g > 0$), entonces el esparcimiento se realiza predominantemente hacia adelante.
 - a) Cuando el aerosol es seco, g vale aproximadamente 0.7.
 - b) El *factor de asimetría* toma valores entre 0.8 y 0.9 cuando hay nubes y nieblas.
3. Si g es negativo ($g < 0$), entonces el esparcimiento se realiza predominantemente hacia atrás.

2.6. Propiedades Ópticas de un Grupo de Partículas

La teoría desarrollada por G. Mie (1908) ha servido en este trabajo para calcular los factores de eficiencia del esparcimiento y de la extinción de la radiación de una cierta longitud de onda, λ , que incide sobre una partícula esférica y homogénea caracterizada por su radio, r , y su índice de refracción, m . Estos factores generalmente se denotan como $Q_{esp}(\lambda, r, m)$ para el esparcimiento y $Q_{ext}(\lambda, r, m)$ para la extinción (Van de Hulst, 1981). Según la teoría de Mie, estos factores se pueden expresar de la siguiente forma:

$$Q_{esp} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [|a_n(\lambda, r, m)|^2 + |b_n(\lambda, r, m)|^2], \quad (2.41)$$

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}[a_n(\lambda, r, m) + b_n(\lambda, r, m)], \quad (2.42)$$

en donde $x = 2\pi r/\lambda$. a_n y b_n son las bien conocidas funciones complejas de Mie, que dependen de λ , r y m (por razones prácticas en este texto se han omitido estas variables como argumentos de las funciones mencionadas).

2.6.1. Factor de Asimetría

También, basándose en los resultados de esta teoría, se calcula el llamado factor de asimetría, g , del patrón de esparcimiento o función fase normalizada, $P(\cos\Theta)$, que una partícula de radio (r) e índice de refracción (m) conocidos, produce al incidir sobre ella radiación de una cierta longitud de onda, este factor se define de la siguiente manera:

$$g(\lambda, r, m) = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} P(\cos\Theta) \cos\Theta d(\cos\Theta), \quad (2.43)$$

en donde Θ es el ángulo en el que la radiación fue esparcida, medido respecto de la dirección de propagación de la radiación incidente. Este factor se puede expresar en términos de a_n y b_n como:

$$g(\lambda, r, m) = \frac{4}{x^2} \frac{1}{Q_{esp}} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n(n+2)}{n+1} \right) \operatorname{Re}(a_n a_{n+1}^* + b_n b_{n+1}^*) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2n+1}{n(n+1)} \right) \operatorname{Re}(a_n b_n^*) \right\}, \quad (2.44)$$

en esta expresión a_n^* y b_n^* representan los complejos conjugados de a_n y b_n , respectivamente.

2.6.2. Albedo por Esparcimiento Simple

Por definición, el albedo por esparcimiento simple del aerosol, $\omega_{aerosol}$, se calcula como:

$$\omega = \frac{B_{esp}}{B_{ext}}, \quad (2.45)$$

en donde B_{esp} y B_{ext} son los coeficientes de esparcimiento y de extinción, respectivamente. Integrando estos coeficientes con respecto al radio (r) y a la altura (z'), se obtienen los espesores ópticos de esparcimiento y de extinción.

$$\tau_{esp,ext}(r, z) = \int_{z_0}^{z_t} \int_{r_1}^{r_2} B_{esp,ext}(r, z') dr dz', \quad (2.46)$$

donde z_t es la altura correspondiente a la parte superior de la atmósfera, z_0 es la altura sobre la superficie de la Tierra, r es el radio de las partículas aerosólicas que son consideradas esféricas.

El coeficiente de esparcimiento y de extinción es una función que depende de r y z' , y que puede ser separada en dos funciones:

$$B_{esp,ext}(r, z') = n(r, z') \sigma_{esp,ext}(r), \quad (2.47)$$

donde:

1. $n(r, z')$ es una función de distribución por tamaños dependiente del radio (r) y de la altura (z').
2. $\sigma(r)$ es la sección transversal correspondiente al área ocupada por las partículas aerosólicas

de radio (r).

A su vez, $n(r, z')$ es una función que puede separarse de la siguiente manera:

$$n(r, z') = f(r)h(z'), \quad (2.48)$$

donde $f(r)$ es la función de distribución de partículas dependiente del radio (r) y $h(z')$ es la función de distribución dependiente de la altura (z').

Entonces de las ecuaciones 2.46, 2.47 y 2.48, se tiene que

$$\tau_{esp,ext}(z) = \int_{z_0}^{z_t} \int_{r_1}^{r_2} f(r)h(z')\sigma_{esp,ext}(r) dr dz' = \int_{z_0}^{z_t} h(z') dz' \int_{r_1}^{r_2} f(r)\sigma_{esp,ext}(r) dr, \quad (2.49)$$

donde $H(z) = \int_{z_0}^{z_t} h(r, z') dz'$ es una función que se refiere a la concentración de partículas aerosólicas a distintas alturas, y

$$\sigma_{esp,ext}(r) = \pi r^2 Q_{esp,ext}(\lambda, m, r), \quad (2.50)$$

es la sección transversal de esparcimiento y de extinción descrita en términos del factor de eficiencia de esparcimiento y de extinción, respectivamente. Entonces:

$$\tau_{esp,ext}(\lambda, m, f(r)) = H(z) \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{esp,ext}(\lambda, m, r) f(r) dr, \quad (2.51)$$

con

$$f(r) = \frac{dN_c}{d \log_{10} r} = \frac{3 \ln 10}{4\pi r^3} \frac{dV_c}{d \ln r}. \quad (2.52)$$

Donde $dNc/d\log_{10}r$ (partículas/ μm^2) representa el número de partículas con radios entre r_1 y r_2 que contiene una columna de altura igual a la de la capa atmosférica y de sección transversal unitaria, $Q_{esp,ext}$ es igual a las ecuaciones 2.41 y 2.42, y $dVc/d\ln r$ es la distribución volumétrica columnar respecto de los tamaños de las partículas aerosólicas. Esta distribución está disponible en la base de datos AERONET.

Por lo tanto, una expresión equivalente a la ecuación 2.45 es:

$$\omega = \frac{\sigma_{esp}}{\sigma_{ext}} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{esp}(\lambda, m, r) f(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{ext}(\lambda, m, r) f(r) dr} \quad (2.53)$$

De acuerdo con lo anterior, el factor de asimetría del aerosol puede calcularse también de la siguiente manera:

$$g_{aerosol} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{esp}(\lambda, m, r) g(\lambda, m, r) f(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{esp}(\lambda, m, r) f(r) dr}, \quad (2.54)$$

de esta forma ($g_{aerosol}, \lambda, m, f(r)$) representa un promedio de $g(\lambda, m, r)$ ponderado por los coeficientes de esparcimiento de las partículas de radio r .

2.6.3. Masa óptica

La densidad del aerosol multiplicada por la longitud de camino óptico representa la masa del aerosol en una columna de sección transversal unitaria. A esta masa se le llama *masa óptica*. La

masa óptica real se define como

$$m_{\text{real}} = \int_0^{\infty} \rho ds, \quad (2.55)$$

donde ds es la longitud de camino óptico de un rayo de luz proveniente del Sol y ρ es la densidad del aerosol. La trayectoria, s , a lo largo de la cual se realiza la integración, es una trayectoria oblicua que comienza en el límite superior de la atmósfera y termina en la superficie de la Tierra.

La *masa óptica relativa* (m_r) está definida como

$$m_r = \frac{\int_0^{\infty} \rho ds}{\int_0^{\infty} \rho dz}, \quad (2.56)$$

en donde la integral del denominador se realiza en la dirección vertical. Ignorando la curvatura de la Tierra y suponiendo que en la atmósfera no hay refracción y que es homogénea, entonces la masa óptica relativa para cualquiera de los constituyentes atmosféricos es

$$m_r = \sec \theta_z, \quad (2.57)$$

Donde θ_z es el ángulo cenital del Sol. Esta expresión da una buena aproximación cuando $\theta_z \leq 60^\circ$.

La aplicación de las leyes de la refracción como se usan en Astronomía, da como resultado la siguiente expresión

$$m_r = \frac{1}{\rho_0 H_0} \int_0^\infty \left[1 - \left(\frac{R}{R+z} \frac{n_0}{n} \right)^2 \text{sen}(\theta_z) \right]^{-\frac{1}{2}} \rho d\theta_z, \quad (2.58)$$

en donde n es el índice de refracción del aire a la altura z , n_0 es el índice de refracción al nivel de superficie, H es la altura de una atmósfera homogénea de densidad ρ_0 (la densidad a nivel de superficie), R es el radio terrestre y θ_z es el ángulo cenital del Sol.

Una solución a la última expresión, la obtuvo Kasten usando el modelo de atmósfera ARDC (1959), la cual nos permite calcular m_r como sigue

$$m_r = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}}, \quad (2.59)$$

Esta expresión da una buena aproximación hasta ángulos θ_z de 86° ; cuando $\theta \leq 60^\circ$, $m_r \approx \text{sec}\theta_z$.

2.6.4. Ley de Ångstrom

La teoría de Mie (1908) nos permite hacer estimaciones del espesor óptico de la capa del aerosol atmosférico para modelos simples de partículas que forman el aerosol atmosférico. En particular, si consideramos que las partículas son esféricas con un espectro de tamaños que siguen una ley potencial (Junge) y con un índice de refracción cuya parte imaginaria es pequeña (despreciable), es posible construir un espesor óptico que depende de la longitud de onda de la radiación incidente

$$\tau_{a,\lambda}^A = \beta \lambda^{-\alpha}. \quad (2.60)$$

en donde β es el llamado *coeficiente de turbiedad de Ångstrom*, y está directamente relaciona-

do con la concentración de partículas ópticamente activas en una columna atmosférica de sección transversal unitaria. A la ecuación 2.60 se le llama Ley de Ångstrom.

El parámetro α es un exponente relacionado con la pendiente de la distribución potencial (Jungueana) en un sistema de coordenadas logarítmico, esto es, si una distribución de éste tipo la escribimos como sigue

$$\frac{dN}{dr} = Cr^{-(v+1)}, \quad (2.61)$$

entonces puede demostrarse que

$$\tau_{a,\lambda}^A = \pi C \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^{-v+2} \int_0^{\infty} x^{-v+1} Q(x) dx, \quad (2.62)$$

donde $x = 2\pi r/\lambda$ y $Q(x)$ es el coeficiente de dispersión eficaz obtenido de la teoría de Mie. La integral converge si $2 < v < 6$. Comparando esta expresión con la fórmula de Ångstrom, puede verse que

$$\alpha = v - 2, \quad (2.63)$$

$$\beta = \pi \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{-v+2} C', \quad (2.64)$$

con

$$C' = C \int_0^{\infty} x^{-v+1} Q(x) dx. \quad (2.65)$$

El parámetro α es un indicador de la distribución por tamaños de las partículas aerosólicas y del dominio relativo en cantidad de las partículas pequeñas contra las partículas con radios entre $0.1\mu m$ y $1\mu m$.

En la ecuación 2.60, β puede variar entre 0 y 0.5 (o un valor más alto; ver tabla 2.1), en cambio α varía entre 4 y 0.

Cuando las partículas aerosólicas son muy pequeñas, de tamaño similar a las de las moléculas de aire, α se aproxima a un valor de 4, y cuando son muy grandes α se acerca a 0 (ver tabla 2.2). De acuerdo con Ångstrom un buen valor promedio para una atmósfera natural es $\alpha=1.3\pm 0.5$.

La tabla 2.3 muestra 4 parejas de valores (α y β) que describen varios grados de turbiedad.

Al igual que muchas variables climáticas, α y β pueden variar a lo largo de un día debido a cambios en la temperatura.

McClatchey & Selby et al. (1927), desarrollaron la siguiente expresión para calcular β

$$\beta = (0.55)^\alpha \left(\frac{3.912}{Vis} - 0.01162 \right) [0.02472 (Vis) + 1.132], \quad (2.66)$$

donde Vis es la visibilidad en kilómetros.

Intervalo	Cantidad
[0.0, 0.1]	Muy Pocas
(0.1, 0.2]	Pocas
(0.2, 0.3]	Muchas
(0.3, 0.4]	Demasiadas

Tab. 2.1: Intervalos para el coeficiente de turbiedad de Ångstrom (β), el cual está directamente relacionado con la concentración de partículas ópticamente activas en una columna atmosférica de sección transversal unitaria.

Intervalo	Partículas
[0, 1]	Muy Grandes
(1, 2]	Grandes
(2, 3]	Pequeñas
(3, 4]	Muy pequeñas

Tab. 2.2: Intervalos para el parámetro de Ångstrom (α), el cual es un indicador de la distribución por tamaños de las partículas aerosólicas y del dominio relativo en cantidad de las partículas con radios menores a $1 \mu\text{m}$ contra las partículas con radios entre $0.1 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$, que son consideradas como partículas grandes.

Atmósfera	β	α	Visibilidad (Km)
Limpia	0.00	1.30	340
Clara	0.10	1.30	28
Turbia	0.20	1.30	11
Muy Turbia	0.40	1.30	< 5

Tab. 2.3: Parámetros para varios grados de turbiedad, manteniendo α constante. En esta tabla se observa como disminuye la visibilidad conforme β se incrementa. Tomada Iqbal, M. (1983).

3. METODOLOGÍA

3.1. Instrumentación

Las mediciones se realizaron con el fotómetro solar marca CIMEL, calibrado en las instalaciones de la NASA. El fotómetro es un instrumento automatizado (robotizado) que utiliza una celda solar como fuente de energía y una antena satelital como medio de comunicación (ver figura 3.1). El instrumento cuenta también con dos colimadores de 33 cm para llevar a cabo mediciones directas del Sol (irradiancia, $W/m^2/\mu m$) y del cielo (radiancia, $W/m^2/\mu m/str$). Estos colimadores están protegidos por una ventana de cuarzo que permite la observación de la radiación ultravioleta por medio de un detector de silicio con suficiente proporción señal/ruido se pueden realizar observaciones espectrales entre los 300 nm y los 1020 nm, en el caso del primer colimador. Para el segundo colimador, este rango es más amplio.

3.1.1. Secuencia de mediciones

El fotómetro solar realiza las siguientes secuencias de mediciones a lo largo de un día, (Holben et al., 1998):

1. Medición directa al Sol.

- a) **Medición directa al Sol.** Las mediciones se realizan en 8 bandas espectrales angostas centradas nominalmente en longitudes de onda de: 440 nm, 670 nm, 870 nm, 940 nm y



Fig. 3.1: En esta fotografía se muestran las partes principales del fotómetro solar CIMEL: antena satelital, celda solar, caja de control, soporte y colimadores.

1020 nm, y para cualquier valor entre 340 nm y 1020 nm. Para las bandas del ultravioleta el ancho de banda es de 2.5 nm y para el resto es de 10 nm. La secuencia de medición dura alrededor de 8 segundos por cada longitud de onda.

- b) **Observación de triplete.** Esta observación, que dura aproximadamente 30 segundos, realiza 3 mediciones por longitud de onda.
- c) **Langley.** Las secuencias de calibración de Langley son cada 15 minutos.

2. Medición directa al Cielo.

- a) **Medición directa al cielo.** Se realiza una medición en cada una de las cuatro bandas espectrales centradas nominalmente en 440 nm, 670 nm, 870 nm y 1020 nm, elegidas de tal manera que prácticamente en ellas no se tiene absorción por gases.
- b) **Langley del Sol.** Se hace una medición de la masa de aire Langley a un ángulo cenital

de 20° .

- c) **Langley del cielo.** Es una secuencia de medición simple del Cielo. Se hacen 16 mediciones entre $m_r = 2$ y $m_r = 7$.

3. Almucantar¹.

El fotómetro realiza una secuencia de almucantar cada hora entre las 9:00 hrs y las 15:00 hrs del *tiempo solar local*, excepto a las 12:00hrs debido a la *polarización del fotómetro*, tiempo en el cual la *masa óptica relativa* va cambiando de $m_r = 4$ hasta $m_r = 1,7$, pasando por $m_r = 3$ y 2. Hace más de cuatro secuencias de mediciones al día para una *masa óptica relativa* de 1,7, 2, 3 y 4, por la mañana y por la tarde. Una secuencia de almucantar es realizada cada hora

4. Plano Principal².

Esta secuencia de mediciones comienza con una observación al Sol, moviéndose 6° por debajo del disco solar, y entonces realiza un recorrido a través del Sol, tomando alrededor de 30 segundos por cada una de las 4 longitudes de onda (440 nm, 670 nm, 870 nm y 1020 nm). Las observaciones se realizan cuando la m_r es menor que dos para minimizar las variaciones en la radiancia ($W/m^2/sr$).

5. Polarización.

La secuencia de mediciones es llevada a cabo en el plano principal a incrementos de 5° entre los ángulos cenitales de -85° y $+85^\circ$. Una observación toma aproximadamente 5 segundos, y

¹ Las mediciones realizadas en el almucantar se toman con respecto al ángulo cenital. El rango de los ángulos de esparcimiento decrece conforme disminuye el ángulo cenital. Por esta razón, al realizar las secuencias de mediciones en el almucantar a una $m_r = 2$ o superior, se consiguen ángulos de esparcimiento de 120° o superior.

² La secuencia de mediciones llevadas a cabo en el plano principal del Sol, es similar a las realizadas en el almucantar con la diferencia de que no se toman en cuenta los ángulos de esparcimiento con respecto al ángulo cenital. La secuencia comienza con una observación a 6° por debajo del disco solar y entonces realiza un recorrido a través del Sol, tomando aproximadamente 30 segundos por cada una de las 4 bandas espectrales. Las observaciones realizadas en el plano principal se hacen cada hora cuando la m_r es menor que dos para minimizar las variaciones en la radiancia.

la secuencia completa alrededor de 3 minutos.

Es importante mencionar que al fotómetro utilizado se le proporciona mantenimiento durante la temporada de lluvias, aprovechando que no pueden realizarse mediciones en presencia de precipitaciones.

3.1.2. *Ventajas y Desventajas del Fotómetro Solar CIMEL*

Ventajas

1. Está automatizado (robotizado), y por lo tanto no se requiere de personal que se ocupe de realizar mediciones todos los días del año.
2. Se cuenta con algoritmos para la detección de nubes para realizar una limpieza de aquellos datos obtenidos en presencia de nubes entre el sol y el campo visual del fotómetro.
3. Mediante la aplicación de modelos para la recuperación por inversión, se pueden calcular varias propiedades ópticas.
4. Las mediciones se hacen sobre una columna de aerosol desde la superficie terrestre hasta la parte superior de la atmósfera, lo cual permite estudiar las propiedades ópticas del conjunto de partículas aerosólicas que se encuentran distribuidas en todas las capas atmosféricas.
5. Las mediciones son mínimamente afectadas por las reflexiones de la superficie terrestre.
6. Las mediciones se realizan a 4 longitudes de onda ($0.441 \mu m$, $0.673 \mu m$, $0.873 \mu m$ y $1.022 \mu m$), de tal manera que no hay absorción por gases.
7. Se pueden detectar mediante el análisis de las propiedades ópticas, diferentes tipos de partículas aerosólicas entre los distintos lugares en donde se realizan las mediciones.

8. La red AERONET cuenta con fotómetros solares distribuidos en todo el mundo, permitiendo de esta manera contar con una base de datos de las propiedades ópticas del aerosol obtenidas en presencia de diferentes condiciones atmosféricas.
9. Con las propiedades ópticas depuradas y recuperadas por inversión, se pueden realizar comparaciones de varios años en distintos lugares de nuestro planeta.
10. Las propiedades ópticas obtenidas por los fotómetros solares dan apoyo a la metodología de recuperación por inversión realizadas con el uso de satélites meteorológicos.

Desventajas

1. El fotómetro solar no realiza mediciones en presencia de precipitaciones.
2. No pueden realizarse mediciones durante la noche.
3. Los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas en presencia de nubes no sirven para poder calcular las propiedades ópticas del aerosol.
4. Sin tomar en cuenta el tiempo en el que se tarda la NASA en calibrar un fotómetro desde el envío hasta la devolución del instrumento a su lugar de mediciones, no es posible tener un registro diario de datos recuperados por inversión, debido a los criterios de depuración y a la presencia de precipitaciones.

3.2. Sitio de Muestreo

Las mediciones realizadas por el fotómetro solar CIMEL fueron llevadas a cabo en la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México, ZMCM (Cd. Universitaria: 19°:20' N;

99°:11' W; 2268 msnm) cuyas características, producto de los altos niveles de contaminación por gases y específicamente por partículas, lo hacen de gran interés en cuanto que su estudio podría ayudar a un mejor conocimiento del comportamiento del balance de la energía de radiación en atmósfera urbano-industrial.

3.3. Base de Datos

La razón por la cuál se hace uso de la base de datos que se describe a continuación, es para:

1. Obtener la distribución por tamaños y el índice de refracción de las partículas aerosólicas, y a partir de ellas calcular el albedo por esparcimiento simple, el factor de asimetría, los coeficientes de turbiedad de Ångstrom, la visibilidad y la función fase del aerosol.
2. Comparar las propiedades ópticas calculadas en este trabajo de tesis, con las proporcionadas por la base de datos AERONET. Es importante mencionar aquí que el método de cálculo utilizado aquí es distinto del utilizado por AERONET. La diferencia entre estos modelos, radica en que en el modelo AERONET, las propiedades ópticas son calculadas directamente de los datos obtenidos en tiempo real (los espesores ópticos). En cambio, en el modelo utilizado en este trabajo de tesis, las propiedades ópticas se calculan a partir de la distribución por tamaños y de los índices de refracción de las partículas aerosólicas proporcionadas en la base de datos AERONET, los cuales fueron calculados de los datos en tiempo real. Además, el modelo utilizado en este trabajo es más sencillo que el de AERONET, porque las ecuaciones utilizadas son más sencillas, al no involucrar una gran variedad de métodos de aproximación en las recuperaciones por inversión.

Los datos son transmitidos desde la memoria del fotómetro solar, a través del DCS (Data Collection Systems), hacia alguno de los satélites geoestacionarios GOES-E, GOES-W o METEOSAT y luego retransmitidos a una estación receptora situada en tierra. El DCS es un sistema gubernamental de los Estados Unidos operado con el propósito de transmitir datos desde sitios lejanos hacia las instalaciones de la NASA en el Centro de Vuelos Espaciales *Goddard*, en Greenbelt, Maryland, EUA.

Generalmente, los datos son almacenados en las computadoras de la estación receptora durante 3 ó 5 días antes de que sean procesados. El procesamiento de los datos se realiza utilizando algoritmos que tienen como principal objetivo eliminar la influencia de la nubosidad en las observaciones.

Estos algoritmos son parte de un programa de computadora llamado *demonstrat* el cual, entre otras cosas, provee un acceso gráfico a la base de datos pública de interés a través de la página web <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>. Este programa incluye tres categorías principales: 1) recuperaciones dependientes del tiempo tales como el *espesor óptico del aerosol* y la precipitación pluvial, 2) evaluación de la calibración, y 3) recuperaciones por inversión de la radiancia del cielo.

El programa *demonstrat* prueba automáticamente la calidad de los datos en el almucantar, mediante la evaluación de la simetría de las radiancias del disco solar. Aquellas parejas de radiancias que excedan el 10 % del valor de la asimetría angular definida como $|(i - d)/(i + d) \cdot 0.5|$, donde i es el valor del lado izquierdo y d es valor del lado derecho, serán eliminadas del proceso de inversión. Si la desviación estándar de la diferencia entre las parejas del disco solar, se divide por el valor promedio de las parejas angulares y se excede del 10 %, o bien, si no hay un número suficiente de datos con simetría, los datos no son invertidos. En aquellos casos en los que los datos del *almucantar* o del *plano principal* no están disponibles, se realiza una inversión interactiva a partir de los datos de los espesores ópticos del aerosol. Sin embargo, la recuperación del rango del tamaño de las partículas aerosólicas será más pequeña debido a la sensibilidad reducida para partículas con radios entre 0.1

y $1 \mu m$.

Los datos del *plano principal* son procesados utilizando la misma recuperación por inversión, sin embargo solamente los datos del lado cenital del disco solar son usados en la inversión debido a la asimetría inducida por la reflectancia de la superficie y por un incremento en la *masa óptica relativa*. Existen dos tipos de datos que pueden consultarse. Los del primer tipo son los que pueden consultarse en tiempo real a través del Internet (espesores ópticos del aerosol). Este tipo de datos, que no están depurados, son aquellos que son transmitidos directamente de la memoria del fotómetro solar. Los del segundo tipo son obtenidos después de la aplicación de un algoritmo de inversión. Un ejemplo de este tipo de datos son los índices de refracción y la distribución por tamaños de las partículas aerosólicas, utilizadas en este trabajo.

En esta base de datos, en particular, existen tres formatos en los que se pueden consultar los datos de interés: 1) Todos los datos, 2) Promedios diarios y 3) Promedios mensuales (ver figura 3.2). En el primero de ellos se encuentran contenidos los datos invertidos por horas; en el segundo, los datos presentados son los promedios diarios de estos últimos. En el tercer formato de datos, se hallan los promedios mensuales. En este trabajo se eligió trabajar con la base de datos, en el formato de *todos los datos*, correspondiente a la Ciudad de México para poder estudiar el comportamiento de las propiedades ópticas del aerosol a lo largo del tiempo.

3.4. Reducción de Datos

1. El primer paso para calcular las propiedades ópticas de interés, es seleccionar en la solicitud electrónica (ver figura 3.2) la distribución por tamaños (Size Distribution) y los índices de

Almucantar Retrievals

Total Only		Total/Fine/Coarse Modes	
9. <input checked="" type="checkbox"/> Size Distribution		12. <input type="checkbox"/> Volume	
10. <input checked="" type="checkbox"/> Refractive Index		13. <input type="checkbox"/> AOT Absorption	
11. <input type="checkbox"/> AOT Coincident		14. <input type="checkbox"/> AOT Extinction	
		15. <input checked="" type="checkbox"/> SSA	
		16. <input checked="" type="checkbox"/> Asymmetry Factor	
		17. <input checked="" type="checkbox"/> Phase Functions	
<input type="checkbox"/> Select All Retrievals		18. <input type="checkbox"/> Combined Retrievals (9-16)	

ALMUCANTAR RETRIEVAL MODELS				
Models	SPHERICAL	SPHEROID	COMBINED SPHERICAL AND SPHEROID	
Levels	<input type="radio"/> 1.5	<input type="radio"/> 1.5	<input type="radio"/> 2.0	
	<input checked="" type="radio"/> 2.0 (Spherical Particles)	<input type="radio"/> 2.0		
	<input type="radio"/> 2.0 (Non-spherical Particles)			
Data Mode	<input checked="" type="radio"/> Recommended Default Parameters		<input type="radio"/> User-defined Options	
User-defined Almucantar Retrieval Options				
Angles (No.)	Solar Zenith Angle Range		Spherical Sky Error Limit (%)	Spheroid Sky Error Limit (%)
Min	Min	Max	Max	Max
21	25	77	5	10
Angstrom Parameter Limit (870-440)	Solar Zenith Angle (Fine Mode Filter)	AOT at 440nm (Fine Mode Filter)		
Max	Min	Min		
0.6	45	0.4		

Data Format		
<input checked="" type="radio"/> All Points	<input type="radio"/> Daily Averages	<input type="radio"/> Monthly Averages

Fig. 3.2: Solicitud electrónica para bajar los datos recuperados por inversión de la base de datos pública de la red de fotómetros espectrales AERONET.

refracción (Refractive Index) de las partículas aerosólicas.

2. Se selecciona el nivel 2, correspondiente a las partículas esféricas.

NOTAS:

- a) En este trabajo de tesis se eligió trabajar con la suposición de que las partículas aerosólicas son esféricas y homogéneas, por lo que las:
 - 1) partículas no esféricas (esferoides), y

-
- 2) partículas esféricas y no esféricas combinadas,
no son de interés.
- b) El nivel 1.5 se refiere a los datos obtenidos en tiempo real por el fotómetro solar CIMEL, sin depuración. Dichos datos pueden haberse obtenido con o sin presencia de nubes. El nivel 2.0 se refiere a los datos ya depurados con los criterios ya mencionados en el apartado 3.3, que se refiere a la *Base de Datos*. Por esta razón, se eligió trabajar con datos de este último nivel.
3. Las demás opciones que aparecen por default en la solicitud electrónica se dejan tal como están. A continuación se presenta una descripción de estas últimas opciones:
- a) Se utilizaron únicamente los datos correspondientes a las partículas esféricas del nivel 2 con parejas de radiancias simétricas en el almucantar (los criterios de simetría fueron satisfechos a ángulos de esparcimiento mayores o iguales a los 21°).
- b) El error límite máximo (%) para las mediciones de las radiancias del cielo es del 5 %.
- c) Los valores correspondientes al albedo, al factor de asimetría, a los índices de refracción, a la distribución por tamaños, a los coeficientes de turbiedad de Ångstrom y a la función fase, que se seleccionaron en la solicitud electrónica, fueron recuperados por inversión para un espesor óptico del aerosol, con una longitud de onda de $0.440 \mu m$, mayor o igual a 0.4 ($\tau_{aerosol}(0.440\mu m) \geq 0.4$) y para un ángulo cenital mayor o igual a 45° .
4. Finalmente se selecciona en el formato de datos (Data Format) la opción de todos los puntos (All Points). Esta opción proporciona los datos invertidos por recuperación en el formato de horas, es decir, se obtiene la lista en el que a cada dato le corresponde una hora determinada

Date	Time (GMT)	REFR(441)	REFR(673)	REFR(873)	REFR(1022)	REFI(441)	REFI(673)	REFI(873)	REFI(1022)
05/03/1999	15:10:15	1.33	1.35	1.37	1.38	0.007	0.006	0.006	0.007
06/03/1999	22:04:02	1.55	1.55	1.57	1.58	0.012	0.010	0.010	0.010
29/03/1999	22:40:25	1.53	1.53	1.55	1.56	0.016	0.013	0.014	0.014
30/03/1999	14:45:56	1.33	1.35	1.37	1.40	0.010	0.008	0.010	0.011
30/03/1999	15:11:50	1.34	1.36	1.38	1.40	0.012	0.010	0.011	0.011
09/04/1999	23:27:45	1.60	1.60	1.60	1.60	0.011	0.008	0.008	0.008

Tab. 3.1: Ejemplo de la tabla obtenida de la base de datos AERONET. En esta tabla se muestra la parte real (REFR) y la parte imaginaria (REFI) del índice de refracción del aerosol para cada una de las siguientes longitudes de onda: 441 nm, 673 nm, 873 nm y 1022 nm.

a un día en particular (ver tabla 3.1 y figura 3.3).

5. Se hace *click* en el botón *Download* y se guarda en la base de datos solicitada en el disco duro de una computadora personal.
6. Para poder calcular las propiedades ópticas de interés deben calcularse primero los espesores ópticos del esparcimiento y de la extinción (ver ecuaciones 2.46 y 2.51). Ambos espesores son funciones que dependen, además del radio de las partículas aerosólicas, de la distribución por tamaños y del índice de refracción de las partículas en cuestión. Debido a que estas variables deben utilizarse en la misma función para calcular los espesores ópticos, los valores correspondientes a la distribución por tamaños y al índice de refracción deben ser del mismo día y de la misma hora. Por esta razón se deben comparar en la base de datos descargada en el disco duro, los días y las horas de los datos correspondientes a la distribución por tamaños y al índice de refracción. De esta manera, si hay datos que no coinciden en día y hora, deben borrarse. Algunos datos no coinciden debido a los distintos criterios que se utilizan para recuperarlos por inversión.

De un total de 667 datos invertidos, correspondientes al archivo de la distribución por tamaños y de 237 datos invertidos correspondientes al archivo de índices de refracción de las partículas

aerosólicas, se obtuvieron un total de 237 datos invertidos que coincidieron en fechas y horas entre el 5 de marzo de 1999 y el 7 de mayo de 2002, que corresponden a 130 días de mediciones. Es importante mencionar que la base de datos consultada no se ha actualizado desde el día 12 de mayo de 2002.

3.5. Cálculo de Parámetros Ópticos

1. Los índices de refracción que se obtuvieron como se describe líneas arriba se introducen en el programa llamado *lrkespkextg*, construido en lenguaje FORTRAN (Muhlia, 2004). Este programa calcula, entre otras cosas, los factores de eficiencia para el esparcimiento y la extinción de la radiación que incide sobre las partículas aerosólicas (ver ecuaciones 2.41 y 2.42). Estos factores de eficiencia se calculan con sumas discretas mediante el método de los trapecoides, considerando un rango de radios que van desde $r_1 = 0.050 \mu m$ a $r_2 = 10.000 \mu m$, y al que se le hizo una partición en subintervalos de longitud $dr = 0.005 \mu m$, generando de esta manera un total de 1991 partículas. Esto exige que los sumandos se evalúen en cada uno de los radios correspondientes a cada punto por medio de los subintervalos de la partición, considerando fijos los valores de la longitud de onda (λ) y el índice de refracción (m) por hora y día de medición. De manera similar, el programa calcula el factor de asimetría (g). Por lo tanto, la salida del programa proporciona cuatro columnas de datos, como se muestra en la tabla 3.2.
2. Los factores de eficiencia de esparcimiento y de extinción, obtenidos como se describe en el primer inciso, y la distribución por tamaños obtenida de la base de datos como se describe en la sección 3.3, se introducen en el programa llamado *flmtwgabr*, construido en lenguaje C. Este programa contiene en su código, las ecuaciones 2.46 y 2.51 y 2.45 y 2.53, necesarias para

Re(m)	Im(m)	05/03/1999	09:10:15
1.33	0.007	$\lambda=0.441(nm)$	
radio(μm)	Kesp($0.441nm$)	Kext($0.441nm$)	$g(0.441nm)$
0.005	2.86×10^{-6}	1.13×10^{-3}	0.001
0.010	4.57×10^{-5}	2.30×10^{-3}	0.004
0.015	2.31×10^{-4}	3.65×10^{-3}	0.008
0.020	7.27×10^{-4}	5.34×10^{-3}	0.015
0.025	1.77×10^{-3}	7.63×10^{-3}	0.023
0.030	3.65×10^{-3}	1.08×10^{-2}	0.033

Tab. 3.2: Ejemplo de la salida de datos del programa lrkspkextg. Re(m) es la parte real e Im(m) es la parte imaginaria del índice de refracción del aerosol, Kesp y Kext son los factores de eficiencia de esparcimiento y de extinción, respectivamente, y g es el factor de asimetría.

calcular los espesores ópticos de esparcimiento y de extinción, y el albedo por esparcimiento simple del aerosol, respectivamente. Estas ecuaciones, se calculan aproximando las integrales por sumas discretas.

En la función $dNc/d\log_{10}r$ de la ecuación 2.52, se utiliza la distribución volumétrica columnar respecto de los tamaños de las partículas del aerosol ($dVc/d\ln r$), que forma parte de la base de datos AERONET, y que está dada en 22 columnas de datos (ver figura 3.3). El primer renglón contiene los valores de 22 radios de partículas esféricas. A partir del segundo renglón en adelante, las cantidades proporcionadas corresponden a los volúmenes ($\mu m^3/\mu m^2$) que ocupan las partículas que tienen uno de los 22 radios que se encuentran en el primer renglón. En el programa de computadora, antes de utilizar las ecuaciones 2.52 y 2.53, se procede a realizar una interpolación no lineal del tipo *cubic spline*, sobre las 22 parejas de datos (ver figura 3.3), asignando como variable independiente a los 22 radios de partículas y como variable dependiente a la distribución numérica columnar³ ($dNc/d\log_{10}r$). En la interpolación, se interpolan 1991 radios de partículas, entre los 0.005 μm y los 10 μm que se incrementan de 0.005 μm

³ La distribución numérica columnar se refiere al área que ocupan las partículas aerosólicas por unidad de área de la sección transversal de una columna que va desde la superficie de la Tierra hasta la parte superior de la atmósfera

Fecha y Hora	0.050	0.066	0.086	0.113	0.148	0.194	0.255	0.335	0.439	0.576	0.756	0.992	1.302	1.708	2.241	2.940	3.857	5.061	6.641	8.713	11.432	15.000
05/03/99 09:10:15	0.001	0.005	0.024	0.061	0.089	0.069	0.031	0.013	0.006	0.003	0.003	0.004	0.009	0.019	0.031	0.042	0.047	0.037	0.020	0.009	0.004	0.002
06/03/99 16:04:02	0.007	0.011	0.023	0.050	0.080	0.056	0.021	0.008	0.006	0.007	0.013	0.021	0.031	0.048	0.085	0.137	0.125	0.058	0.021	0.009	0.007	0.007
29/03/99 16:40:25	0.016	0.026	0.046	0.081	0.111	0.077	0.028	0.010	0.006	0.007	0.013	0.027	0.034	0.039	0.059	0.110	0.145	0.097	0.041	0.018	0.012	0.014
30/03/99 08:45:56	0.001	0.006	0.025	0.055	0.074	0.061	0.034	0.019	0.012	0.008	0.006	0.006	0.013	0.026	0.034	0.035	0.027	0.015	0.008	0.004	0.003	0.003
30/03/99 09:11:50	0.007	0.024	0.047	0.058	0.059	0.053	0.039	0.021	0.010	0.005	0.005	0.007	0.013	0.021	0.027	0.034	0.045	0.047	0.031	0.014	0.005	0.001
09/04/99 17:27:45	0.010	0.017	0.025	0.031	0.028	0.015	0.007	0.004	0.005	0.007	0.013	0.015	0.017	0.029	0.060	0.102	0.133	0.121	0.075	0.034	0.011	0.003

Fig. 3.3: Ejemplo de tabla obtenida de la base de datos. En esta tabla se muestra la distribución volumétrica columnar de las partículas aerosólicas, proporcionada en 22 columnas. Los valores que se encuentran en el primer renglón corresponde a los radios de las partículas en μm . Los valores que se encuentran del segundo renglón en adelante, corresponden a la distribución volumétrica columnar para partículas con radios iguales a los mostrados en el primer renglón.

en $0.005 \mu\text{m}$. Después se aplican las ecuaciones 2.52 y 2.53 para calcular los espesores ópticos correspondientes. Este cálculo, se realiza de manera similar a como se describe en el inciso anterior.

En este mismo programa, se calculan el coeficiente de turbiedad de Ångstrom (β) y el exponente (α) de la Ley de Ångstrom (ver ec. 2.60), utilizando el método de los mínimos cuadrados para la obtención de α y β . Para encontrarlos, se utilizan los valores de los espesores ópticos calculados por el mismo programa.

La visibilidad se calculó usando la expresión de McClatchey (ver ec. 2.66), con α y β conocidas. Por lo tanto, la salida del programa proporciona la tabla de datos, que se muestra en la tabla 3.3.

3. Para determinar cómo es el patrón de esparcimiento de la radiación que incide sobre las partículas aerosólicas, se elaboró otro programa escrito en lenguaje C que calcula la función fase de un enjambre de partículas, utilizando la distribución por tamaños proporcionado por la base de datos pública de la red de fotómetros espectrales AERONET, para una radiación incidente de longitud de onda λ e índice de refracción m , y para ángulos de esparcimiento de 0 a 180 grados. El manejo del índice de refracción de las partículas aerosólicas, en este

Fecha	Hora	$\lambda(\mu m)$	$Re(m)$	$Im(m)$	τ_{ext}	τ_{esp}	τ_{abs}	$\omega_{aerosol}$	$g_{aerosol}$	α	β	Vis.(Km)
5/3/99	9:10:15	0.441	1.33	0.007	0.41	0.38	0.03	0.92	0.721			
		0.673	1.35	0.006	0.20	0.18	0.02	0.91	0.613			
		0.873	1.37	0.006	0.13	0.12	0.01	0.89	0.561			
		1.022	1.38	0.007	0.11	0.09	0.01	0.87	0.551	1.614	0.11	19.4
6/3/99	16:04:02	0.441	1.55	0.012	0.81	0.73	0.08	0.91	0.661			
		0.673	1.55	0.010	0.41	0.37	0.05	0.89	0.594			
		0.873	1.57	0.010	0.28	0.25	0.04	0.87	0.561			
		1.022	1.58	0.010	0.23	0.20	0.03	0.86	0.562	1.498	0.23	8.08

Tab. 3.3: Ejemplo de la salida de datos del programa flmtwgabr. $Re(m)$ es la parte real e $Im(m)$ es la parte imaginaria del índice de refracción del aerosol; τ_{ext} y τ_{esp} y τ_{abs} son los espesores ópticos de extinción, de esparcimiento y de absorción⁵, respectivamente; $\omega_{aerosol}$ es el albedo por esparcimiento simple; $g_{aerosol}$ es el factor de asimetría; α y β son los parámetros de turbiedad de Ångstrom y Vis. es la visibilidad.

programa, se toma del trabajo de Ivlev y Popova (Zuev et al., 1973) convertido a una función de la longitud de onda.

4. Como el análisis de resultados necesita agrupar datos por *masas ópticas relativas* para poder entender mejor las propiedades ópticas a lo largo del tiempo, se construyó un programa escrito en lenguaje C para calcular la *masa óptica relativa*, utilizando una modificación de la ecuación de Kasten (ver ec.2.59) para el aerosol

$$m_r = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0.15(h + 3.885)^{-1.253}}, \quad (3.1)$$

donde h es la altura de una atmósfera homogénea de densidad ρ_0 (la densidad a nivel de superficie), y θ_z es el ángulo cenital del Sol.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Comparación con la base de datos de AERONET

Las cantidades correspondientes al albedo por esparcimiento simple del aerosol que se calcularon en este trabajo de tesis se compararon con las cantidades proporcionadas por la base de datos pública de la red de fotómetros espectrales AERONET.

La diferencia entre ambos modelos radica en que el modelo AERONET, las propiedades ópticas son calculadas directamente de los datos obtenidos en tiempo real (los espesores ópticos); en cambio, en el modelo utilizado en este trabajo de tesis, las propiedades ópticas se calculan a partir de la distribución por tamaños y de los índices de refracción de las partículas aerosólicas proporcionadas en la base de datos AERONET, los cuales fueron calculados de los datos en tiempo real. Además, el modelo utilizado en este trabajo es más sencillo que el de AERONET, porque las ecuaciones utilizadas son más sencillas, al no involucrar una gran variedad de métodos de aproximación en las recuperaciones por inversión.

En la tabla 4.1, se muestra la forma en como se realizó la comparación. En ella simplemente se calculó el cociente de cada uno de los datos correspondientes al albedo proporcionado por AERONET entre los calculados en este *trabajo de tesis* (cociente= $\omega_{AERONET}/\omega_{Estetrabajo}$). Como puede observarse en la tabla 4.1, las cantidades del cociente varían entre 1 y 0.99 (para el albedo, por ejemplo). Cuando el cociente es igual a la unidad significa que los albedos son iguales. Por otra parte, el valor de 0.99 significa que la diferencia entre los albedos es del 1.1%. En base a esta última cantidad se

Fecha	Hora	Este trabajo	AERONET	Comparación
05/03/99	09:10:15	0.92	0.93	0.99
06/03/99	16:04:02	0.91	0.91	1.00
29/03/99	16:40:25	0.89	0.89	1.00
30/03/99	08:45:56	0.90	0.90	1.00
30/03/99	09:11:50	0.88	0.88	1.00
09/04/99	17:27:45	0.88	0.89	0.99

Tab. 4.1: Tabla de ejemplo que muestra como se compararon las cantidades correspondientes al albedo por esparcimiento simple del aerosol.

confirma que los distintos albedos calculados a partir de dos modelos diferentes (el de AERONET y el de este trabajo de tesis) no son significativamente diferentes.

El mismo procedimiento de comparación se realizó para las cantidades correspondientes al factor de asimetría y al parámetro de Ångstrom (α). Ambas propiedades físicas resultaron, al igual que en el caso del albedo por esparcimiento simple, no ser significativamente diferentes. En la tabla 4.2 se muestra un resumen de las diferencias máximas¹ en porcentajes para cada una de las tres propiedades ópticas arriba mencionadas. Para complementar la comparación recién mencionada, se construyeron gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) para cada propiedad óptica, a cada una de las cuatro longitudes de onda: $0.441 \mu\text{m}$, $0.673 \mu\text{m}$, $0.873 \mu\text{m}$ y $1.022 \mu\text{m}$. Ver gráficas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 para el albedo por esparcimiento simple; 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 para el factor de asimetría; y 4.9 para el parámetro de Ångstrom (α). Observando las gráficas de las figuras 4.1 a la 4.4 hay unos picos que sobresalen por sobre todos los demás. Estos picos son máximos o mínimos locales dentro de ciertos intervalos de tiempo. Estos máximos y mínimos se produjeron tanto en las mañanas como en las tardes en diferentes meses del año. Los máximos y mínimos observados en el albedo por esparcimiento simple, para cada una de las cuatro longitudes de onda ($0.441 \mu\text{m}$,

¹ La diferencia entre cada una de las propiedades ópticas es variable. Estas diferencias van desde una diferencia nula a una diferencia del 1.1% o del 8.9%, en el caso del parámetro de Ångstrom. A esta última diferencia se le llama *diferencia máxima*.

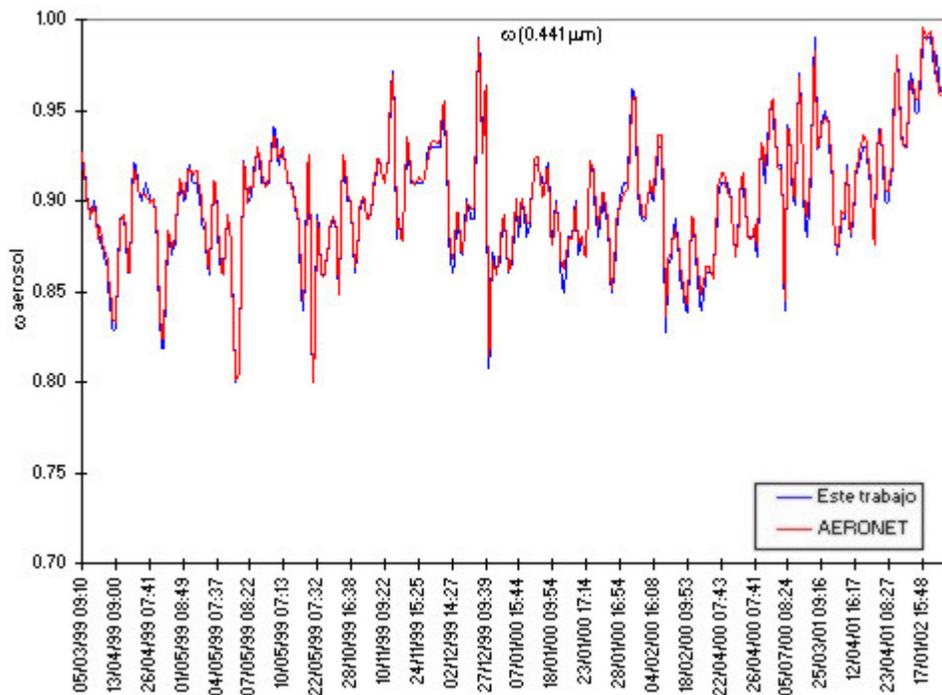


Fig. 4.1: Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del albedo por esparcimiento simple a una longitud de onda de $0.441 \mu\text{m}$.

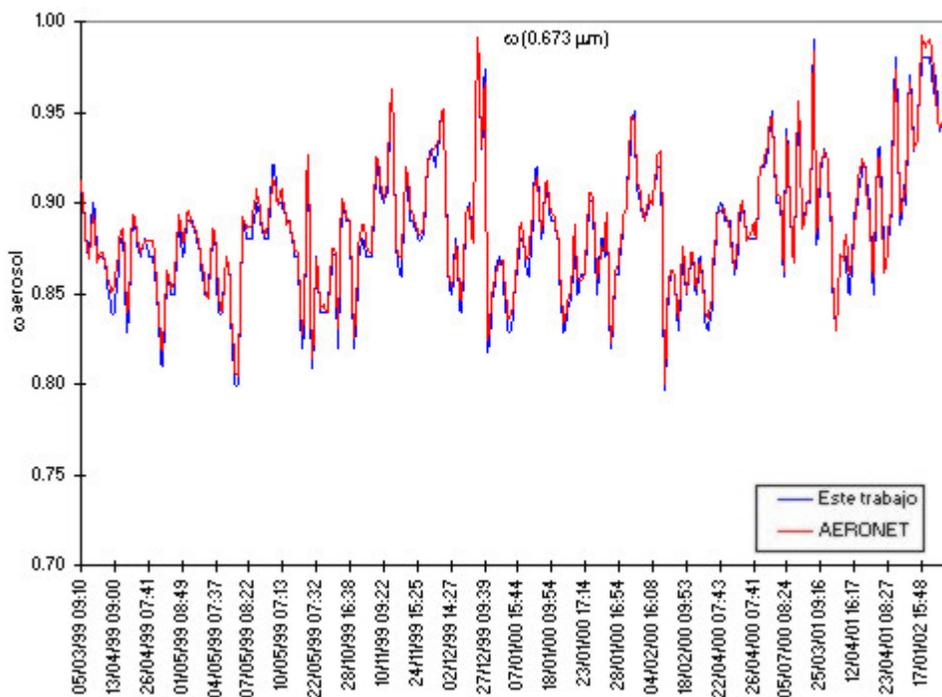


Fig. 4.2: Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del albedo por esparcimiento simple a una longitud de onda de $0.673 \mu\text{m}$.

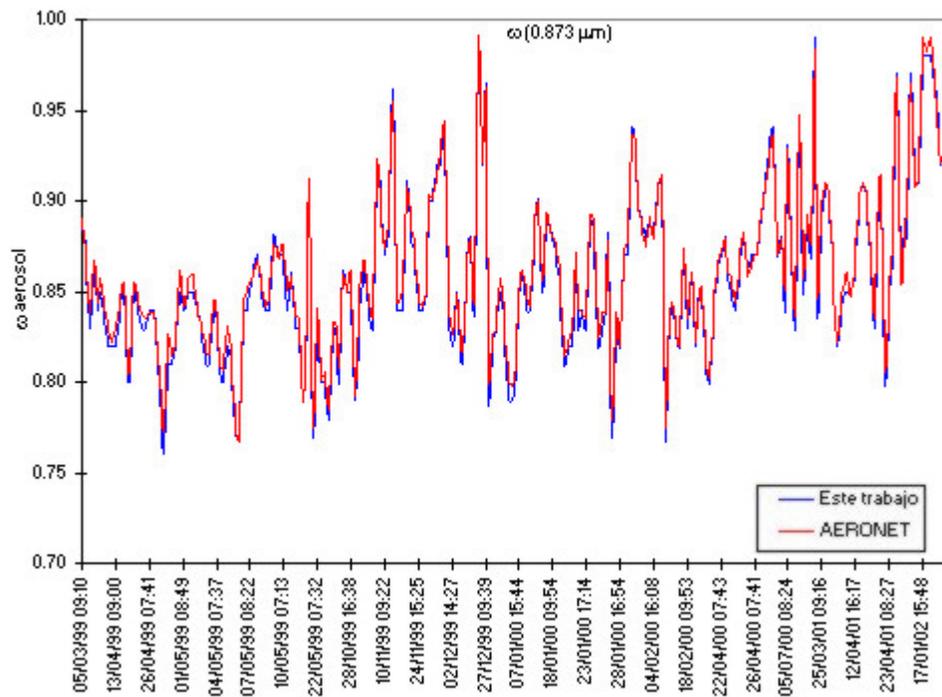


Fig. 4.3: Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del albedo por esparcimiento simple a una longitud de onda de $0.873 \mu\text{m}$.

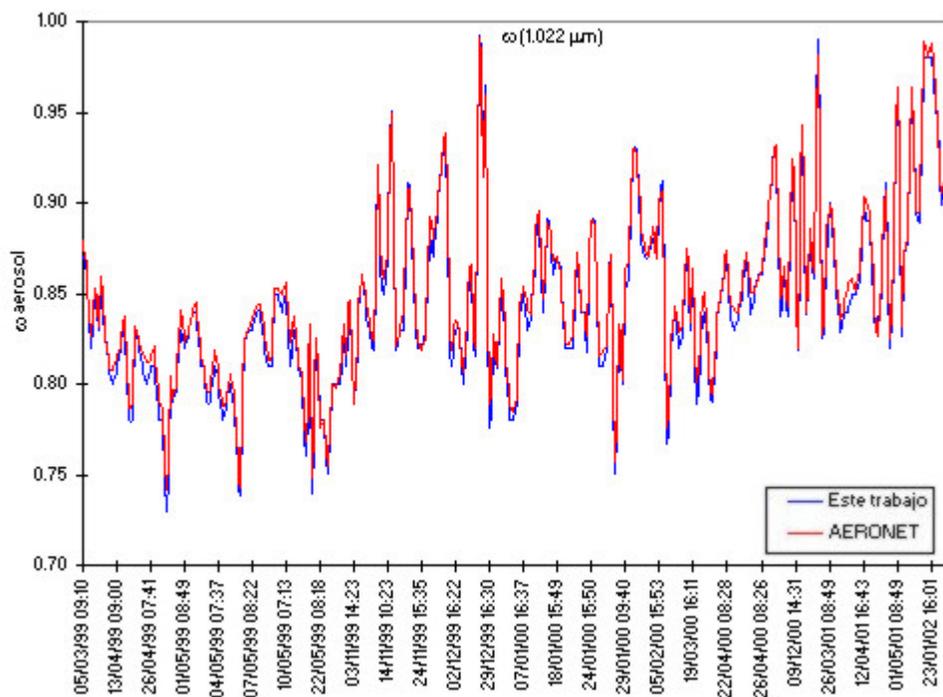


Fig. 4.4: Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del albedo por esparcimiento simple a una longitud de onda de $1.022 \mu\text{m}$.

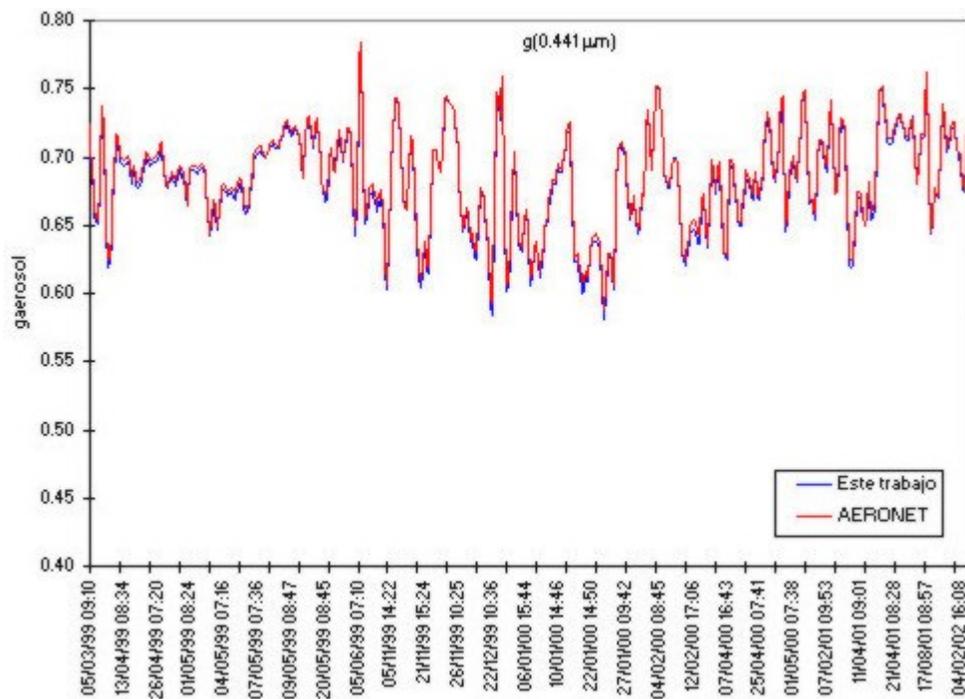


Fig. 4.5: Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del factor de asimetría a una longitud de onda de $0.441 \mu\text{m}$.

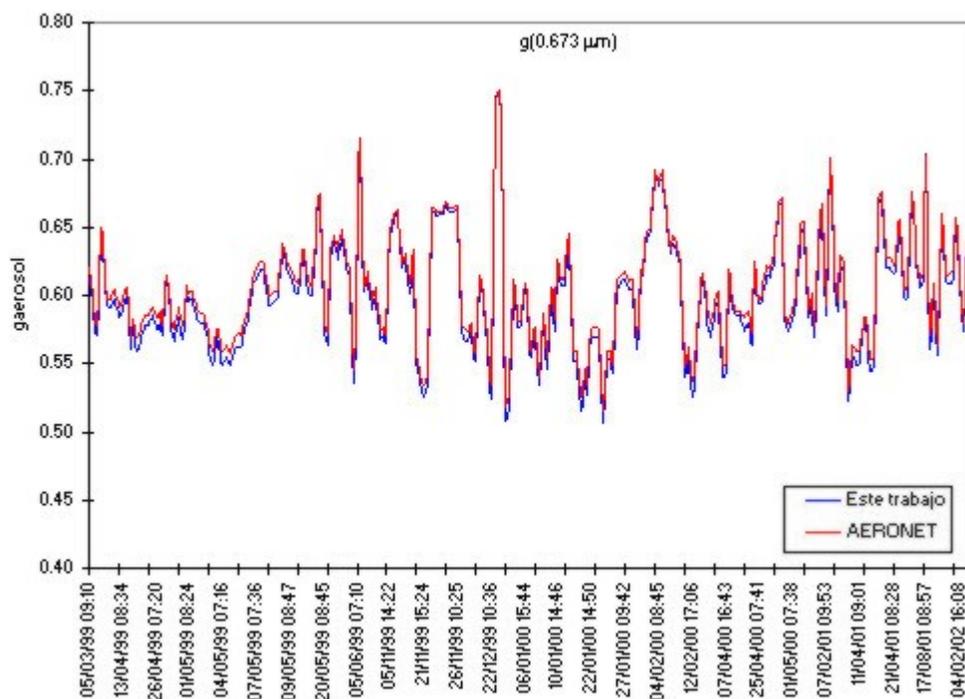


Fig. 4.6: Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del factor de asimetría a una longitud de onda de $0.673 \mu\text{m}$.

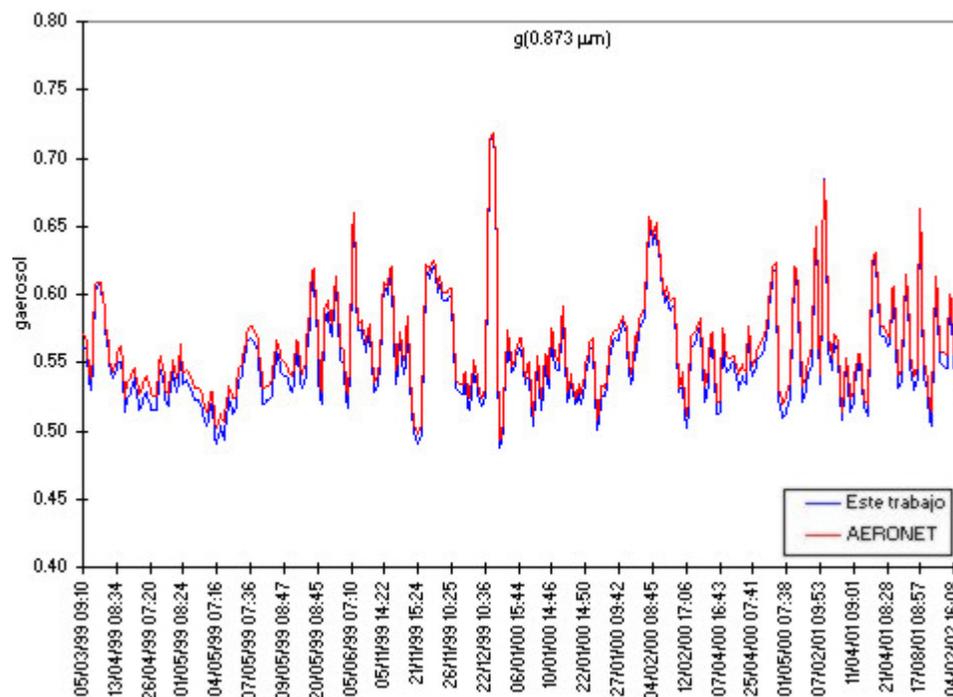


Fig. 4.7: Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del factor de asimetría a una longitud de onda de $0.873 \mu\text{m}$.

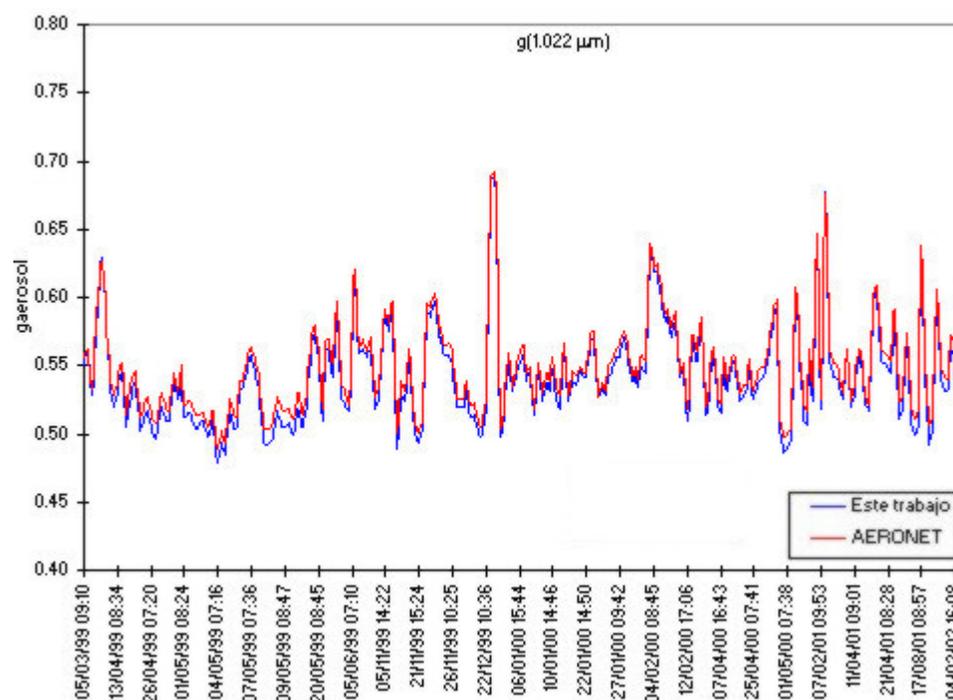


Fig. 4.8: Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del factor de asimetría a una longitud de onda de $1.022 \mu\text{m}$.

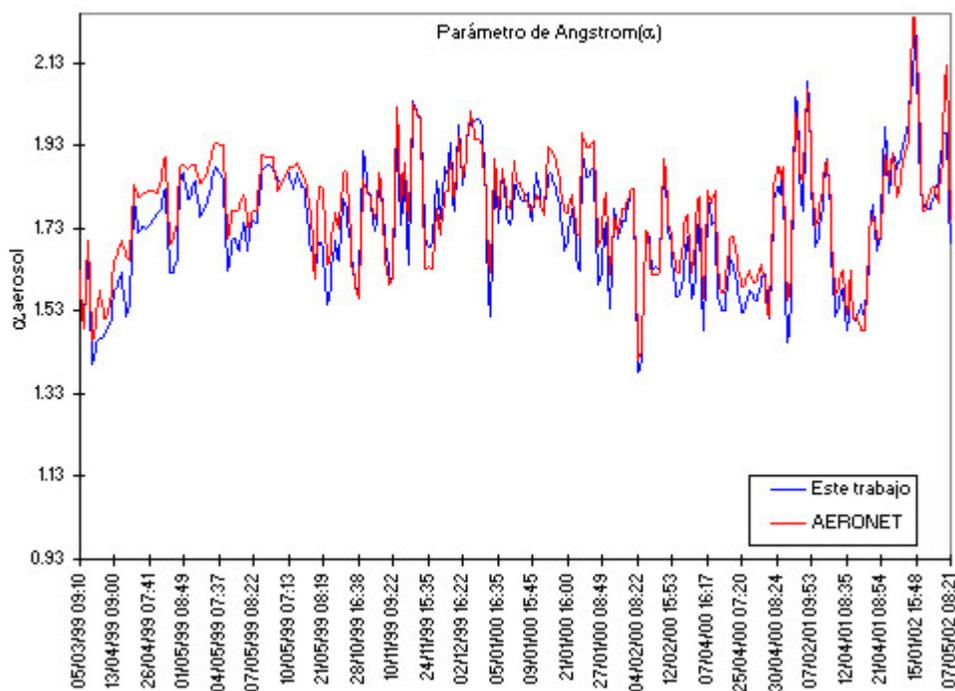


Fig. 4.9: Gráficas de comparación (AERONET-Este trabajo) del parámetro de Ångström (α).

$0.673 \mu\text{m}$, $0.873 \mu\text{m}$ y $1.022 \mu\text{m}$) están relacionados con los mínimos y los máximos de los picos sobresalientes de la parte real del índice de refracción, $Re(m)$, respectivamente. En la gráfica de la figura 4.10, se encuentran graficados el albedo y la parte real del índice de refracción. En esta gráfica puede observarse, con ayuda de las líneas verticales dibujadas, la correspondencia entre los máximos en el albedo y los mínimos en la parte real del índice de refracción, y viceversa.

Los mínimos locales en la parte real del índice de refracción están posiblemente asociados a la existencia de una humedad relativamente alta y a un crecimiento higroscópico en las partículas aerosólicas. En cambio los máximos locales están asociados a altas concentraciones de partículas de carbón negro. En las gráficas de las figuras 4.5 a la 4.8, correspondientes al factor de asimetría para las cuatro longitudes de onda ($0.441 \mu\text{m}$, $0.673 \mu\text{m}$, $0.873 \mu\text{m}$ y $1.022 \mu\text{m}$), también se observan picos que sobresalen por encima o por debajo de los demás. Estos picos corresponden a máximos y mínimos locales están asociados a los mínimos y máximos del *espesor óptico de absorción* (τ_{abs}),

Propiedad Óptica	Diferencia Máxima (%)
Albedo (ω)	1.1 %
Factor de Asimetría (g)	1.1 %
Parámetro de Ångstrom (α)	8.9 %

Tab. 4.2: Tabla que muestra las diferencias máximas en porcentajes entre las cantidades proporcionadas por AERONET y las calculadas en *este trabajo*.

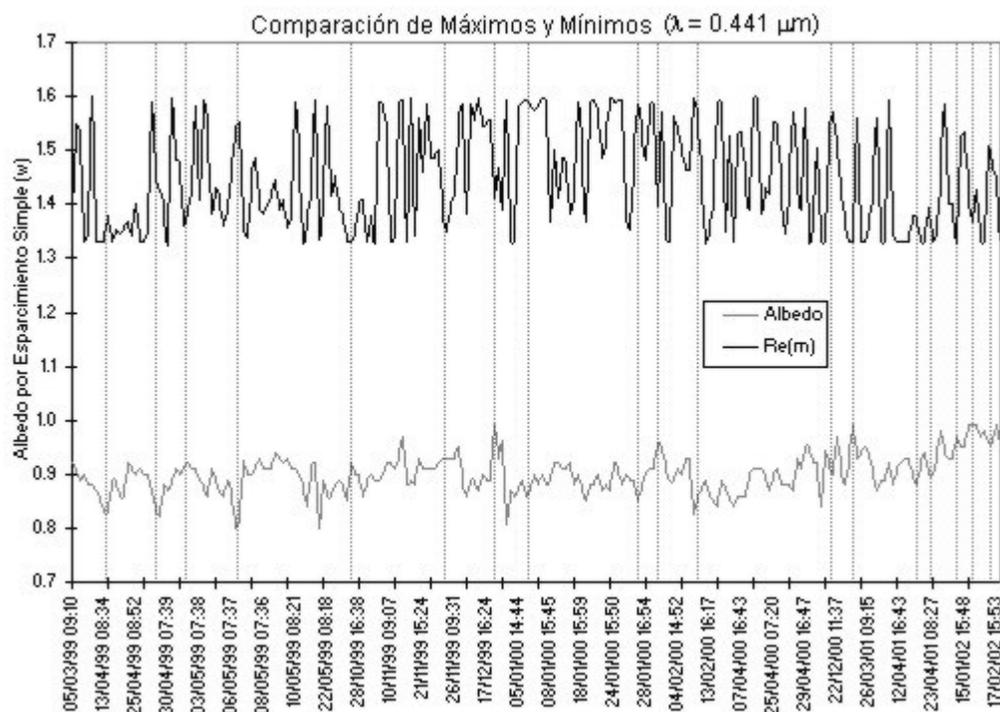


Fig. 4.10: Gráficas de comparación, de máximos y mínimos locales, del albedo por esparsamiento simple y del Índice de Refracción a una longitud de onda de $0.441 \mu\text{m}$. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes: $0.673 \mu\text{m}$, $0.873 \mu\text{m}$ y $1.022 \mu\text{m}$.

respectivamente, que pueden observarse en la gráfica de la figura 4.11. Los máximos locales en el *factor de asimetría* corresponden a los mínimos locales en el *espesor óptico de absorción*. Esto quiere decir que cuando las partículas aerosólicas tienen un mayor *lóbulo frontal* de esparcimiento hay un mínimo en la absorción de la radiación que sobre ellas incide. En cambio, cuando hay un máximo en la absorción, el *lóbulo frontal* se reduce. Los máximos locales observados en el factor de asimetría están presentes en las mañanas entre las 7:30 hrs y las 10:00 hrs. En cambio los mínimos locales se localizan en las tardes entre las 16:00 hrs y las 17:30 hrs.

Para obtener mayor información, se promedió la distribución volumétrica por tamaños correspondiente a las fechas en las que los máximos y los mínimos locales se observaron. También se realizó un promedio de esta distribución para 12 días en los que no hay picos que sobre salgan por sobre todos los demás, para poder realizar una comparación entre las distribuciones volumétricas promedio. Las gráficas que representan estas distribuciones se muestran en la figura 4.12. Teniendo en cuenta que la distribución promedio etiquetada como *otros días* (para fines de comparación), corresponde a todos aquellos días en los que no hubo picos que sobresalieran por sobre todos los demás, se observa que:

1. En los días en los que el *factor de asimetría* tiene máximos locales y el *espesor óptico de absorción* tiene mínimos locales (en las mañanas), la concentración volumétrica de partículas de la moda que se encuentra localizada entre partículas con radios entre $0.050 \mu m$ y $0.440 \mu m$, es mayor que la que se encuentra localizada entre partículas con radios entre $0.576 \mu m$ y $10 \mu m$. Esto indica que, en aquellas mañanas, cuando la concentración volumétrica de partículas con radios entre $0.050 \mu m$ y $0.440 \mu m$ es la predominante, hay un máximo en el esparcimiento y un mínimo en la absorción de la radiación. Debe notarse que, en comparación con la distribución etiquetada como *otros días* el intervalo de radios para la moda de las partículas con radios

entre $0.050 \mu m$ y $0.440 \mu m$ es mayor.

2. La distribución volumétrica promedio, que corresponde a los mínimos locales del *factor de asimetría* y a los máximos locales del *espesor óptico de absorción* (por las tardes), no presenta una diferencia significativa entre las concentraciones volumétricas de las modas correspondientes a las partículas con radios entre $0.576 \mu m$ y $10 \mu m$ y a las partículas con radios entre $0.050 \mu m$ y $0.440 \mu m$. Esto muestra que cuando las concentraciones volumétricas de las modas de las partículas de estos dos intervalos de radios no difieren significativamente entre sí, hay un mínimo local en el *factor de asimetría* y un máximo local en el *espesor óptico de absorción*. Es importante mencionar también que el intervalo de los radios de las partículas grandes en la distribución volumétrica promedio que corresponde a los mínimos locales del factor de asimetría, es mayor que el intervalo correspondiente a los máximos locales del *factor de asimetría* para partículas con radios entre $0.576 \mu m$ y $10 \mu m$.

4.2. Comparación con otro trabajo

En la tabla 4.3 se muestran las propiedades ópticas calculadas por Dubovik et al., (2002) para el aerosol de tipo urbano-industrial y mixto. De acuerdo con esta tabla, se tiene que el aerosol de Greenbelt espere casi completamente toda la radiación que sobre él incide, mientras que las partículas aerosólicas de la Ciudad de México (1999-2000 y 1999-2002; este trabajo) y las de las Maldivas esparcen menos radiación. El esparcimiento de la radiación a través de las partículas aerosólicas de Creteil es intermedio al esparcimiento del aerosol en Greenbelt y en la Ciudad de México.

La baja absorción de radiación por partículas aerosólicas presentes en Greenbelt tiene un valor muy aproximado a los valores esperados para partículas aerosólicas solubles en agua (Shettle & Fenn,

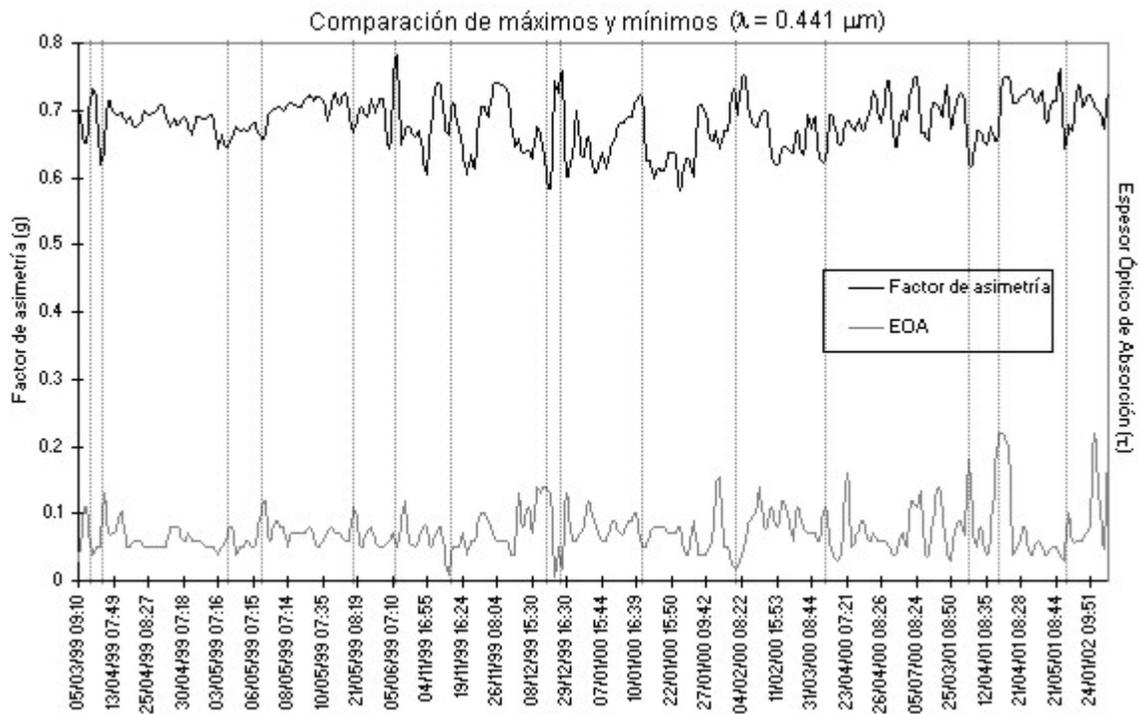


Fig. 4.11: Gráficas de comparación del factor de asimetría y del espesor óptico de absorción a una longitud de onda de $0.441 \mu\text{m}$. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes: $0.673 \mu\text{m}$, $0.873 \mu\text{m}$ y $1.022 \mu\text{m}$.

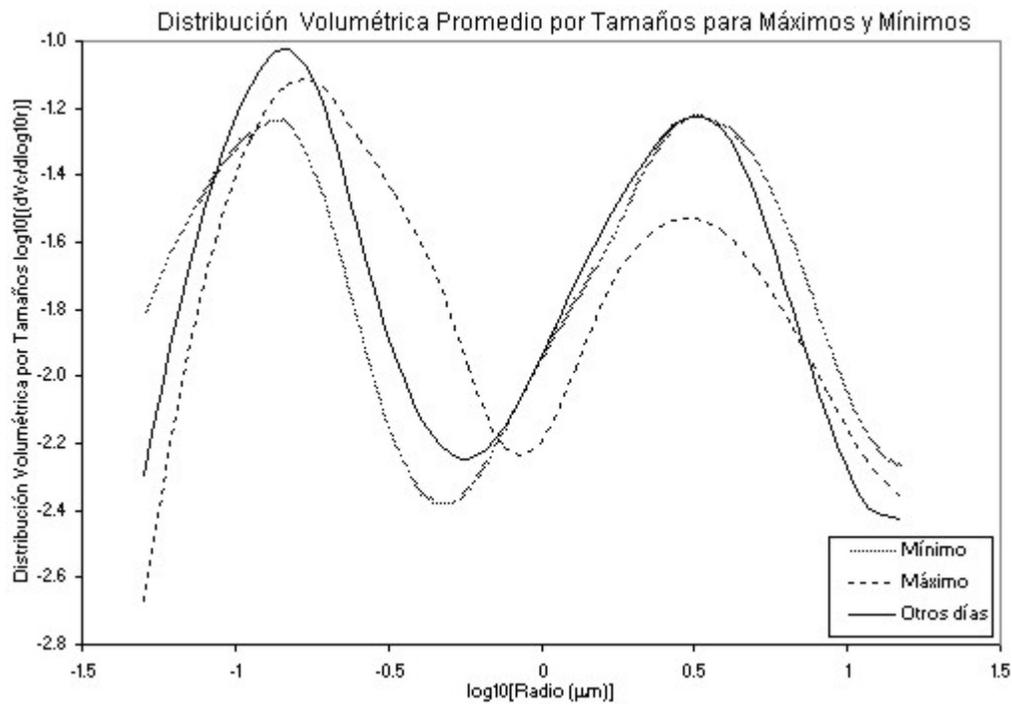


Fig. 4.12: Gráficas de las distribuciones volumétricas promedio para los días en que hay máximos y mínimos locales en el factor de asimetría. La gráfica etiquetada como *otros días* representa la distribución promedio para los días en los que no hay picos que sobresalgan por encima o por debajo de todos los demás.

1979; Koepke et al. 1997) con una alta humedad relativa (Remer & Kaufman, 1998; Tanré et al. 1999).

La variabilidad observada para el albedo por esparcimiento simple para las zonas urbanas, probablemente pueda explicarse por las diferencias en los tipos de combustibles utilizados, las condiciones de emisión de esos combustibles, la cantidad de vehículos automotores y las condiciones ambientales y meteorológicas.

La principal fuente de partículas aerosólicas contaminantes en Greenbelt y en París es el consumo de combustibles fósiles por una gran cantidad de vehículos automotores. En las Maldivas la principal fuente proviene de la quema de la biomasa, y en la Ciudad de México proviene del uso de combustibles fósiles en vehículos automotores, junto con varios procesos industriales (Novakov et al., 2000).

Los controles de emisión de la contaminación por automóviles e industrias está más avanzado en Francia que en México y en la India, lo cual podría contribuir a un aerosol con un mayor esparcimiento de la radiación en París que en la Ciudad de México y en la India.

4.3. Partículas Ópticamente Activas

El albedo por esparcimiento simple del aerosol, mostrado en las gráficas de las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 (ver páginas 59 a la 60), se calculó utilizando la expresión 2.45, en donde

$$\tau_{esp}(\lambda, m, f(r)) = \sum_{i=0}^{1990} \pi r_i^2 Q_{esp}(\lambda, m, r_i) f(r_i) dr, \quad (4.1)$$

$$\tau_{ext}(\lambda, m, f(r)) = \sum_{i=0}^{1990} \pi r_i^2 Q_{ext}(\lambda, m, r_i) f(r_i) dr. \quad (4.2)$$

Propiedades Ópticas	GSFC, Greenbelt, Maryland (1993-2000)	Creteil-París, Francia (1999)	Ciudad de México (1999-2000)	Maldivas (INDOEX) (1999-2000)	Ciudad de México (Este trabajo) (1999-2002)
Número de mediciones	200 (Jun-Sep)	40 (Jun-Sep)	300	150 (Ene-Abr)	237
Rango del parámetro de Ångstrom (α)	$(\tau \sim \lambda^{-\alpha})$ $1.2 \leq \alpha \leq 2.5$	$(\tau \sim \lambda^{-\alpha})$ $1.2 \leq \alpha \leq 2.3$	$(\tau \sim \lambda^{-\alpha})$ $1.0 \leq \alpha \leq 2.3$	$(\tau \sim \lambda^{-\alpha})$ $0.4 \leq \alpha \leq 2.0$	$(\tau = \beta \lambda^{-\alpha})$ $1.2 \leq \alpha \leq 2.2$ $0.07 \leq \beta \leq 0.38$
g 0.440/0.670/0.870/1.022	0.68/0.59/0.54/0.53 ± 0.08	0.68/0.61/0.58/0.57 ± 0.07	0.68/0.61/0.58/0.57 ± 0.07	0.74/0.67/0.64/0.63 ± 0.007	0.68/0.60/0.56/0.54 ± 0.04
Re(m)	(A 0.440 μm) $1.41-0.03\tau(0.440)$ ± 0.01	(A 0.440 μm) 1.40 ± 0.03	(A 0.440 μm) 1.47 ± 0.03	(A 0.440 μm) 1.44 ± 0.02	(A 0.441 μm) 1.45 ± 0.01
Im(m)	0.003 ± 0.003	0.009 ± 0.004	0.014 ± 0.006	0.011 ± 0.007	0.016 ± 0.008
ω 0.440/0.670/0.870/1.022	0.98/0.97/0.96/0.95 ± 0.02	0.94/0.93/0.92/0.91 ± 0.03	0.90/0.88/0.85/0.83 ± 0.02	0.91/0.89/0.86/0.84 ± 0.03	0.89/0.87/0.84/0.83 ± 0.04

Tab. 4.3: Resumen de las propiedades ópticas calculadas en este trabajo y por Dubovik et al. (2002). g es el factor de asimetría, $Re(m)$ es la parte real e $Im(m)$ es la parte imaginaria del índice de refracción del aerosol. Las ciudades nombradas en esta tabla se eligieron porque todas ellas tienen condiciones y fuentes de emisión, de partículas aerosólicas, variables. Modificada de Dubovik et al. (2002).

El valor de $i = 0$ hasta $i = 1990$, corresponde a las 1991 partículas aerosólicas, como previamente se explicó en la sección 3.5 (correspondiente al *cálculo de parámetros ópticos*). La contribución de cada sumando perteneciente a la suma discreta del espesor óptico de esparcimiento y de extinción se muestra en las gráficas de las figuras 4.13 Y 4.14, y 4.15 y 4.16 (ver páginas 73 y 73, y 74 y 74, respectivamente). La contribución está normalizada al 100 %.

Las gráficas de las figuras 4.13 y 4.14 muestran, respectivamente, la contribución al espesor óptico de extinción y de esparcimiento correspondientes al año de 1999. Las de las figuras 4.15 y 4.16 corresponden al año de 2002. Es importante mencionar que las gráficas mostradas, son ejemplos que representan el comportamiento general de las contribuciones en los años 1999 y 2002, para cada una de las cuatro longitudes de onda utilizadas en el estudio de las propiedades ópticas del aerosol.

La información obtenida de las observaciones de las gráficas de las figuras 4.13 y 4.14, y 4.15 y 4.16

(ver páginas 73 y 73, y 74 y 74, respectivamente) es la siguiente:

1. En la tabla 4.4 se muestran los intervalos en los cuales se encuentran los radios que corresponden a las partículas ópticamente activas, para las 4 longitudes de onda. Estas partículas son ópticamente activas porque son aquellas que no tuvieron una contribución despreciable en el espesor óptico de esparcimiento y de extinción. Con despreciable se refiere a todas aquellas partículas que tuvieron una contribución menor o igual al 0.1% en el espesor óptico de esparcimiento y de extinción.
2. Las gráficas de las contribuciones (en porcentajes) al espesor óptico de extinción y de esparcimiento presentan un máximo en la contribución. A este máximo le corresponde un radio en particular, que es distinto para cada longitud de onda (ver tabla 4.5). El máximo en la contribución no se desplaza hacia partículas con radios menores o mayores entre el día 5 de marzo de 1999 a las 9:10:15 hrs y el día 7 de mayo de 2002 a las 8:21:39 hrs.
3. Se observa también que la contribución en ambos espesores ópticos comienza a incrementarse rápidamente a partir de partículas con radios mayores o iguales a $0.065 \mu m$ hasta llegar a un máximo en partículas con radios de 0.160, 0.165, 0.175 o $0.180 \mu m$, según la longitud de onda (ver tabla 4.5), para finalmente decrecer monótonamente hasta un radio de $0.4 \mu m$ con una $\lambda = 0.441 \mu m$, por ejemplo, para luego tender asintóticamente a cero.
4. De 1991² partículas aerosólicas, aproximadamente, el 5.4% de ellas son ópticamente activas y el 94.6% no lo son. De acuerdo con la tabla de la figura 2.1 (ver página 11), las partículas ópticamente activas de la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México

² El porqué del número 1991, ya se explicó previamente en la sección 3.5 que corresponde al *cálculo de parámetros ópticos*.

Figuras 4.13 y 4.15	Figuras 4.14 y 4.16
Radio (μm)	Radio (μm)
[0.065, 0.6]	[0.065, 0.6]

Tab. 4.4: Intervalos de partículas ópticamente activas con radio r , correspondientes a las gráficas de las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16. En estas gráficas se muestra la contribución al espesor óptico de extinción y de esparcimiento a una longitud de onda de $0.441 \mu m$.

	Figuras 4.13 y 4.15	Figuras 4.14 y 4.16
λ (μm)	Radio (μm)	Radio (μm)
0.441	0.160	0.160
0.673	0.165	0.165
0.873	0.175	0.175
1.022	0.180	0.180

Tab. 4.5: Tabla de los radios de las partículas ópticamente activas que corresponden a los máximos (picos) en las gráficas de las de las contribuciones al espesor óptico de extinción y de esparcimiento (ver figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16).

forman parte del polvo atmosférico, polen, ceniza volcánica, humo producto de la combustión incompleta, nubes, neblina y smog.

4.4. Pruebas de Normalidad

Para poder analizar apropiadamente los resultados obtenidos, fue necesario agruparlos en cuatro *masas ópticas relativas* (1, 2, 3 y 4) que corresponden a cuatro ángulos cenitales a diferentes horas del día a lo largo del año (estas masas fueron calculadas utilizando la ecuación 3.1).

En cada uno de los cuatro grupos formados por *masa óptica relativa*, se formaron subgrupos por cada longitud de onda utilizada (0.441 , 0.673 , 0.873 y $1.022 \mu m$) para estudiar las propiedades ópticas del aerosol por cada año de mediciones (1999, 2000, 2001 y 2002), y antes y después del medio día. Entonces se tienen (4 *masas ópticas relativas*)(4 longitudes de onda)(4 años de mediciones)(2 subgrupos: 1 antes del medio día y 1 después del medio día)(2 subgrupos: 1 para el *albedo por*

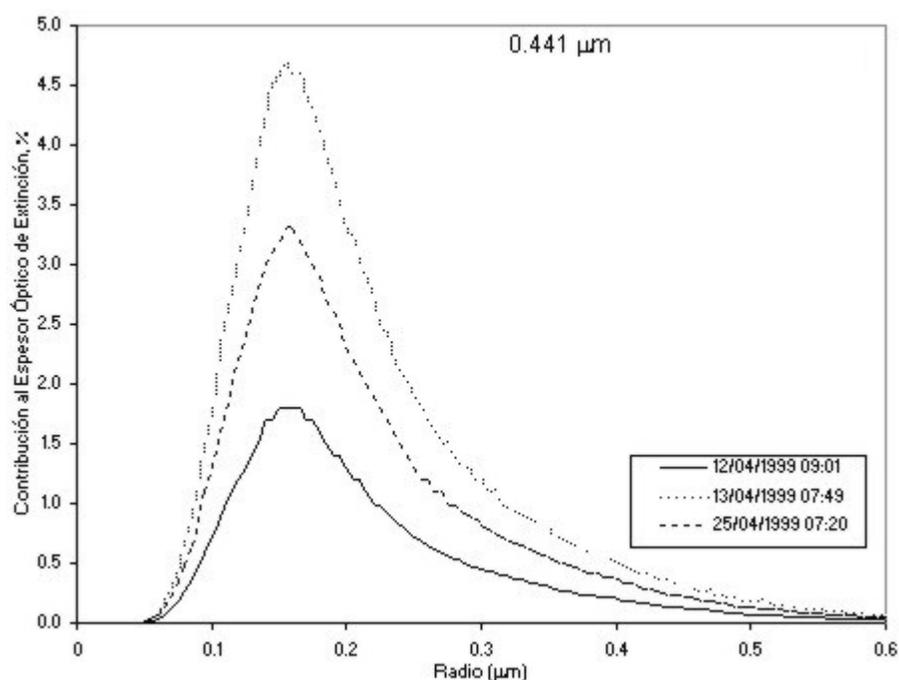


Fig. 4.13: Gráficas de las contribuciones (en porcentajes) al espesor óptico de extinción. Las tres gráficas mostradas representan el comportamiento general de las contribuciones durante el año de 1999.

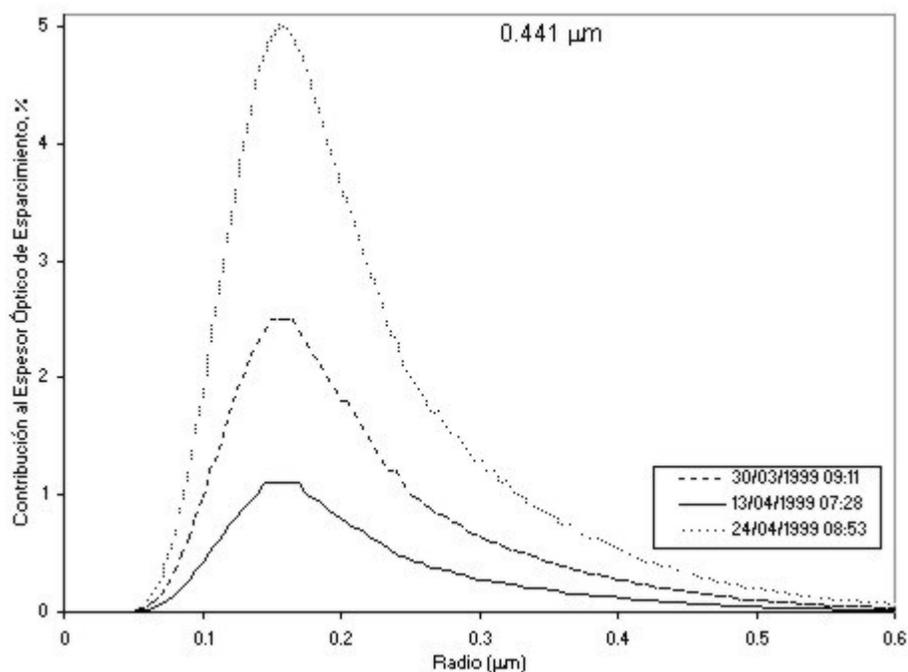


Fig. 4.14: Gráficas de las contribuciones (en porcentajes) al espesor óptico de esparcimiento. Las tres gráficas mostradas representan el comportamiento general de las contribuciones durante el año de 1999.

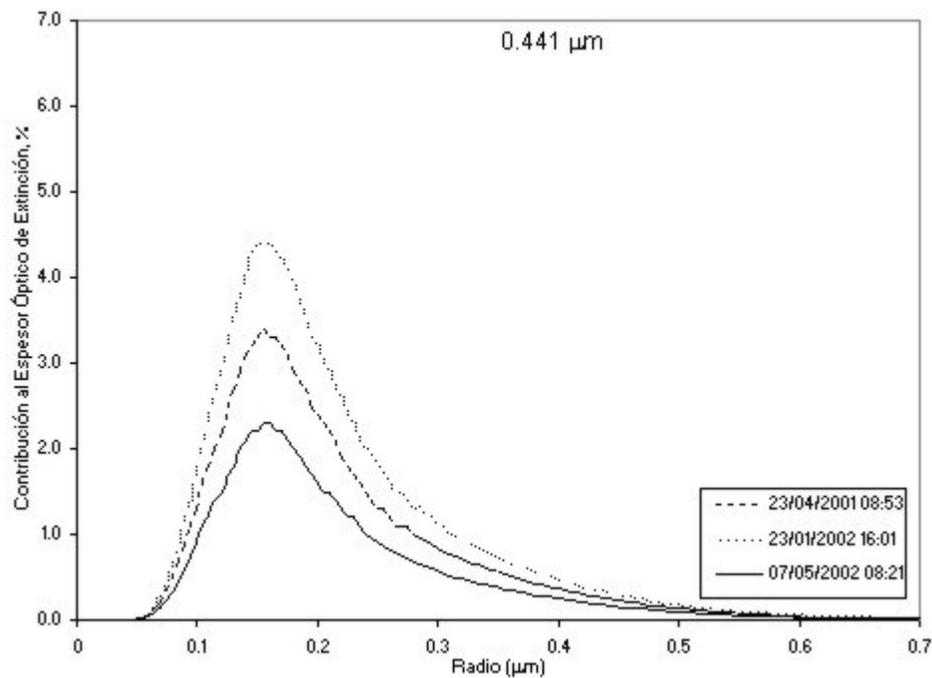


Fig. 4.15: Gráficas de las contribuciones (en porcentajes) al espesor óptico de extinción. Las tres gráficas mostradas representan el comportamiento general de las contribuciones durante el año de 2002.

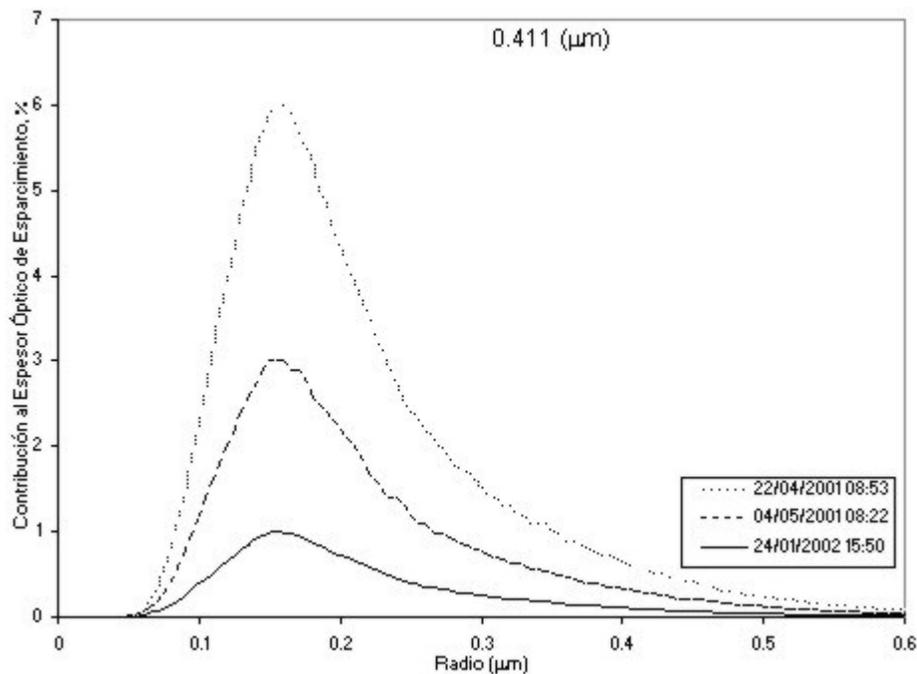


Fig. 4.16: Gráficas de las contribuciones (en porcentajes) al espesor óptico de esparcimiento. Las tres gráficas mostradas representan el comportamiento general de las contribuciones durante el año de 2002.

esparcimiento simple y 1 para el *factor de asimetría*) = $4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 2 = 256$ subgrupos en total.

Cabe mencionar que hubo datos que no quedaron incluidos en alguno de los cuatro grupos por *masa óptica relativa*, debido a que estos datos quedaron fuera de los intervalos mostrados en la tabla 4.6. Por lo cual, de un total de 948 datos por cada longitud de onda, 724 datos quedaron repartidos en alguno de los cuatro grupos ($m_r = 1.7, 2, 3$ o 4), y 224 datos quedaron fuera de ellos.

Como cada uno de los datos que pertenece a un mismo grupo proviene de la recuperación por inversión de las radiancias observadas a un mismo ángulo cenital y longitud de onda, es válido entonces calcular el promedio de los datos invertidos (el albedo por *esparcimiento simple* y el *factor de asimetría*) en cada grupo. Esta validez se basa, ignorando la curvatura de la Tierra y suponiendo que la atmósfera no es refractiva y que es completamente homogénea, en que la radiación proveniente del Sol con longitud de onda λ siempre recorre la misma distancia desde la parte superior de la atmósfera terrestre hasta la superficie de la Tierra.

Para asegurar que los promedios de cada grupo pertenecen a una población con distribución normal, se les aplicó la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk*. Esto es importante, porque más adelante se calculan las medias de los grupos de datos para realizar comparaciones por año, y por mañana y tarde, de las propiedades ópticas calculadas. Si estos grupos no presentan distribución normal, sería incorrecto presentar la media calculada. Si este es el caso, entonces en lugar de reportar el valor de la media, se reportará el valor de la mediana. La mediana, en este caso, representa de una mejor manera el comportamiento central de una muestra de datos que proviene de una distribución no normal.

De un total de 256 grupos resultó que 117 grupos tuvieron distribución normal, 79 grupos no tuvieron ningún dato, 49 grupos no alcanzaron la cantidad mínima de datos para aplicarles la prueba de normalidad y 11 grupos resultaron no tener distribución normal (ver tabla 4.7).

Para un m_r de	el intervalo es
1.7	[1.65,1.75]
2	[1.95,2.05]
3	[2.95,3.05]
4	[3.95,4.05]

Tab. 4.6: Tabla de intervalos para cada *masa óptica relativa* (m_r), utilizada para agrupar las propiedades ópticas calculadas en este trabajo de tesis.

La prueba de normalidad se realizó utilizando el programa de computadora ORIGIN v7.0. Este programa calcula la prueba estadística W mediante la siguiente expresión:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n A_i X_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (4.3)$$

donde

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (4.4)$$

y A_i es el factor de peso. El valor de n debe ser: $3 \leq n \leq 2000$. El criterio utilizado para tomar la decisión acerca de si un grupo de datos en particular pertenece o no a una población con distribución normal es el siguiente: Tradicionalmente se acostumbra elegir el nivel de significación α como 0.10, 0.05 ó 0.01 (10%, 5% ó 1%, respectivamente), para luego decidir si se rechaza una hipótesis H_0 . Como no hay ninguna razón de peso para usar uno de estos valores, en el presente análisis se eligió decidir la normalidad de una población utilizando el criterio del valor *exactamente significativo*. Este criterio se ilustra claramente en el siguiente ejemplo: Si el valor del área de la cola (p) de una distribución normal es igual a 0.044, entonces el valor estadístico W es *exactamente significativo* al nivel de significación $\alpha_0 = 0.044$. Esto implica que la *normalidad* de una población

		Normal	No Normal	1 o 2 datos	Vacío	Total
$\omega_{aerosol}$	Mañana	37	3	4	20	64
$\omega_{aerosol}$	Tarde	20	4	21	19	64
$g_{aerosol}$	Mañana	37	3	4	20	64
$g_{aerosol}$	Tarde	23	1	20	20	64
Total		117	11	49	79	256

Tab. 4.7: Resumen de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a las muestras correspondientes al albedo por esparcimiento simple ($\omega_{aerosol}$) y al factor de asimetría ($g_{aerosol}$) del aerosol. La aplicación de esta prueba se realizó para poder reportar con seguridad las medias calculadas de cada muestra, ya que la mayoría de ellas provienen de una distribución normal.

se debe rechazar para cualquier valor mayor que α_0 , y que no se debe rechazar para cualquier valor menor.

Un valor observado de W es *estadísticamente significativo* si el área de la cola (p) de una distribución normal es menor que los valores tradicionales 0.10, 0.05 ó 0.01 y, por lo tanto, proporciona fuerte evidencia en contra de que una población tenga una distribución normal. Es importante comentar que esta última afirmación es cierta porque el tamaño de las poblaciones analizadas en este trabajo es pequeño. Sin embargo, sería errónea si se analizara una población o muestra muy grande (~ 100). En todos los grupos que resultaron no tener distribución normal, el valor estadístico W fue *estadísticamente significativo*. Los tamaños de las poblaciones correspondientes a estos grupos fueron: 22, 3, 3, 23, 23, 14, 3, 3, 3, 3 y 3 (ver tablas B.1.1, B.1.2, B.2.1 y B.2.2 en el apéndice B). Como la media de cada una de estas poblaciones no representa el comportamiento central de las propiedades ópticas de interés (el albedo por esparcimiento simple y el factor de asimetría), se tomó en cuenta la mediana, y no la media, para tener una mejor descripción del comportamiento central de estas poblaciones.

4.5. Comparación entre Medias

Como uno de los objetivos de este trabajo es conocer si existe o no un incremento a lo largo de los años 1999, 2000, 2001 y 2002 en el *albedo por esparcimiento simple* y en el *factor de asimetría*³ del aerosol en estudio, se procedió a realizar una comparación por parejas entre las medias de los grupos ya mencionados anteriormente. Esta comparación se llevó a cabo, aplicando la prueba t de Student (utilizando el criterio del valor exactamente significativo), entre grupos pertenecientes a una misma *masa óptica relativa* y longitud de onda entre los años 1999 y 2000, 2000 y 2001, y 2001 y 2002.

NOTA: En este trabajo de tesis se eligió comparar las medias utilizando la estadística paramétrica por tres razones.

1. Aprovechar el resultado de la sección anterior (que se refiere a las pruebas de normalidad) de que todas o casi todas las muestras resultaron provenir de una distribución normal. Al conocer esto, es válido entonces, utilizar la prueba t de Student, la cual considera que las muestras provienen de una distribución normal.
2. No se tienen conocimientos suficientes y necesarios acerca de los métodos no paramétricos. Por lo tanto, para este trabajo de tesis de licenciatura no es posible utilizar la *estadística no paramétrica* para realizar la comparación entre las medias.
3. La elección de una prueba estadística y no de otra, depende de lo que una persona considere adecuada para el análisis de sus datos.

³ Esto es importante porque se desea averiguar si estas propiedades cambiaron a lo largo de los 4 años mencionados. Al existir un cambio significaría que hubo un cambio en la composición o en la concentración de las partículas aerosólicas

De un total de 192 comparaciones, resultó que en 115 de ellas las medias fueron iguales, 72 comparaciones no pudieron realizarse porque al menos un grupo no tuvo media debido a la carencia de datos y en 5 comparaciones las medias resultaron ser diferentes (ver tabla 4.8). Otro de los objetivos del presente trabajo es encontrar si hay o no diferencia en las propiedades ópticas del aerosol entre la mañana y la tarde. Para cumplir con este objetivo, se procedió a realizar una comparación entre la media de un grupo de la mañana y la media de un grupo de la tarde. Ambas medias pertenecen a grupos de un mismo año, *masa óptica relativa* y longitud de onda.

De un total de 128 comparaciones (entre la mañana y la tarde de cada año), resultó que en 83 de ellas las medias fueron iguales, 40 comparaciones no pudieron realizarse debido a que al menos un grupo no tuvo media debido a la carencia de datos y en 5 comparaciones las medias resultaron ser diferentes (ver tabla 4.9).

Analizando la información mencionada anteriormente, se obtiene lo siguiente:

Las propiedades ópticas del aerosol de la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México varían a lo largo del tiempo, como puede observarse en las gráficas mostradas en las figuras 4.1 a la 4.4 (ver páginas 59 a la 60). Pese a esta variación, para el albedo por esparcimiento simple, cualitativamente no se observa un incremento o decremento significativo, entre el 5 de marzo de 1999 y aproximadamente el 9 de abril de 2001. Después de esta fecha y hasta el 7 de mayo de 2002 puede observarse un ligero incremento general en las variaciones. Sin embargo, para el factor de asimetría y el parámetro de Ångstrom, durante los cuatro años no hay un incremento o decremento significativo.

Para lo observado en las gráficas correspondientes al albedo por esparcimiento simple, puede afirmarse que el incremento existe entre las fechas mencionadas, fuera de este periodo de tiempo no se puede asegurar que el incremento continúa. Para poder hacerlo, es necesario completar la gráfica

		Iguales	Diferentes	Vacío	Total
$\omega_{aerosol}$	Mañana	23	5	20	48
$\omega_{aerosol}$	Tarde	32	0	16	48
$g_{aerosol}$	Mañana	28	0	20	48
$g_{aerosol}$	Tarde	32	0	16	48
Total		115	5	72	192

Tab. 4.8: Resumen de la comparación entre medias por año para el albedo por esparcimiento simple ($\omega_{aerosol}$) y para el factor de asimetría $g_{aerosol}$. Esta comparación se realizó para saber si hay o no diferencias en las propiedades ópticas entre la mañana y la tarde para cada uno de los 4 años en estudio: 1999, 2000, 2001 y 2002.

utilizando nueva información en la base de datos AERONET, que se espera que se actualice en un futuro próximo. a lo largo de cuatro años en las cantidades correspondientes al *albedo por esparcimiento simple* y al *factor de asimetría* en cada una de las cuatro longitudes de onda que se utilizaron en el presente trabajo.

La conclusión anterior es apoyada por los resultados obtenidos del análisis cuantitativo de los resultados, por *masas ópticas relativas*, de la comparación entre medias porque no hay diferencias significativas entre ellas a lo largo de cuatro años excepto en cinco comparaciones. Esto puede explicarse con la escasez de datos en al menos uno de los dos grupos de comparación. Con escasez se refiere a que un grupo puede tener 1, 2 o 3 datos, los cuales no son suficientes como para que su media represente el comportamiento central de las propiedades ópticas del aerosol a lo largo de todo un año a una *masa óptica relativa* y longitud de onda en particular. Lo mismo ocurre en el análisis realizado de las propiedades ópticas antes y después del medio día ya que de acuerdo con las tablas D.1 al D.4 del apéndice D, no existen diferencias entre las medias de los grupos comparados excepto entre diez de ellas.

Observando las tablas 4.10 y 4.11 que contienen las medias calculadas por año, por masa óptica relativa y por longitud de onda, se tiene que el *albedo por esparcimiento simple* del aerosol, toma

	Iguales	Diferentes	Vacío	Total
$\omega_{aerosol}$	44	0	20	64
$g_{aerosol}$	39	5	20	64
Total	83	5	40	128

Tab. 4.9: Resumen de la comparación entre medias antes y después del medio día, para el albedo por esparcimiento simple y para el factor de asimetría. Esta comparación muestra que prácticamente no hay diferencias entre las medias.

Medias en la mañana									
		$\omega_{aerosol}$				$g_{aerosol}$			
m_r	$\lambda(\mu m)$	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	0.441	0.87	0.85	0.93	—	0.691	0.667	0.715	—
1.7	0.673	0.85	0.85	0.91	—	0.601	0.601	0.625	—
1.7	0.873	0.82	0.85	0.89	—	0.550	0.564	0.577	—
1.7	1.022	0.80	0.83	0.88	—	0.532	0.556	0.561	—
2	0.441	0.89	0.90	0.92	0.96	0.696	0.695	0.705	0.722
2	0.673	0.87	0.89	0.89	0.96	0.606	0.611	0.616	0.622
2	0.873	0.84	0.88	0.87	0.95	0.545	0.567	0.563	0.569
2	1.022	0.82	0.87	0.86	0.94	0.528	0.547	0.546	0.554
3	0.441	0.89	0.90	—	—	0.702	0.698	—	—
3	0.673	0.88	0.89	—	—	0.597	0.612	—	—
3	0.873	0.84	0.87	—	—	0.542	0.565	—	—
3	1.022	0.81	0.85	—	—	0.515	0.550	—	—
4	0.441	0.90	0.89	—	—	0.699	0.699	—	—
4	0.673	0.88	0.88	—	—	0.594	0.608	—	—
4	0.873	0.84	0.85	—	—	0.539	0.563	—	—
4	1.022	0.81	0.83	—	—	0.523	0.551	—	—

Tab. 4.10: Tabla de medias en la mañana para el albedo por esparcimiento simple y el factor de asimetría. Los números sombreados con gris son las medianas de los grupos que no tuvieron una distribución normal.

Medias en la tarde									
		$\omega_{aerosol}$				$g_{aerosol}$			
m_r	$\lambda(\mu m)$	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	0.441	0.88	0.87	0.89	0.99	0.652	0.631	0.620	0.674
1.7	0.673	0.85	0.85	0.86	0.98	0.565	0.563	0.542	0.574
1.7	0.873	0.83	0.83	0.86	0.98	0.540	0.544	0.526	0.525
1.7	1.022	0.83	0.83	0.86	0.89	0.539	0.554	0.538	0.524
2	0.441	0.90	0.89	0.92	0.97	0.672	0.652	0.661	0.681
2	0.673	0.88	0.87	0.90	0.96	0.611	0.583	0.547	0.594
2	0.873	0.84	0.86	0.90	0.94	0.573	0.552	0.512	0.533
2	1.022	0.82	0.85	0.90	0.93	0.560	0.548	0.518	0.518
3	0.441	0.89	0.89	—	—	0.653	0.637	—	—
3	0.673	0.88	0.86	—	—	0.600	0.560	—	—
3	0.873	0.85	0.83	—	—	0.570	0.531	—	—
3	1.022	0.84	0.82	—	—	0.563	0.532	—	—
4	0.441	0.89	0.88	—	—	0.617	0.596	—	—
4	0.673	0.87	0.86	—	—	0.564	0.531	—	—
4	0.873	0.83	0.82	—	—	0.531	0.518	—	—
4	1.022	0.82	0.80	—	—	0.521	0.533	—	—

Tab. 4.11: Tabla de medias en la tarde para el albedo por esparcimiento simple y el factor de asimetría. Los números sombreados con gris son las medianas de los grupos que no tuvieron una distribución normal.

valores mayores o iguales a 0.800 para cualquier longitud de onda y masa óptica relativa, tanto en la mañana como en la tarde. Esto quiere decir que las partículas aerosólicas presentes en la atmósfera esparcen la mayor parte de la radiación que incide sobre ellas. La radiación esparcida por las partículas aerosólicas se lleva a cabo predominantemente hacia adelante porque el factor de asimetría ($g_{aerosol}$), como se observa en las tablas 4.10 y 4.11 toma valores mayores o iguales a 0.5155, los cuales se consideran como valores altos para $g_{aerosol}$. Esto último indica que el aerosol está predominantemente formado por partículas con radios entre $0.1\mu m$ y $1\mu m$, las cuales producen un esparcimiento de Lorenz-Mie.

4.6. Función Fase

El patrón de esparcimiento de estas partículas se conoce a través de la función fase, la cual describe la distribución angular de la energía esparcida. En las gráficas de la figura 4.17 (ver página 85), correspondientes a cada una de las cuatro longitudes de onda de la radiación incidente, se observa que la función fase tiene un máximo a un ángulo de esparcimiento de 0° y que luego decrece monótonamente hacia ángulos mayores hasta aproximadamente los

- 140° (a $0.441\mu m$),
- 130° (a $0.673\mu m$ y a $0.873\mu m$),
- 120° (a $1.022\mu m$), para

para incrementarse después en la zona conocida como la *zona de retroesparcimiento* cercana a los 180° . La intensidad de la radiación esparcida hacia adelante es de 2 órdenes mayor que la esparcida hacia atrás en todos los casos.

En la figura 4.17 (ver página 85) se observa que ambas funciones fase, la correspondiente a la calculada en este trabajo y la proporcionada por la base de datos pública de fotómetros espectrales AERONET, son muy similares⁴ a una longitud de onda de $0.441 \mu m$. Sin embargo, las funciones fase difieren entre los ángulos de esparcimiento de 30° y 180° a otras longitudes de onda: $0.673 \mu m$, $0.873 \mu m$ y $1.022 \mu m$ (ver figuras 4.18 a la 4.20).

Es importante mencionar que a ángulos de esparcimiento menores a los 5° , los valores calculados en este trabajo para la función fase difieren en más de 15 unidades de aquellos proporcionados por la NASA. Esto se debe posiblemente a que, a diferencia de este trabajo, el programa *demonstrat* de la NASA utiliza una solución de aproximación para ángulos de esparcimiento y retroesparcimiento pequeños (≤ 5) en la ecuación de transferencia de radiación con una función fase truncada, utilizando los datos de las radiancias medidas en el almucantar (Nakajima et al., 1983). El comportamiento de la función fase del 6 de marzo de 1999 a las 16:04:02 hrs es similar para las demás longitudes de onda a otros días y horas correspondientes a las propiedades ópticas estudiadas, por lo que las gráficas de la figuras 4.17 a la 4.20, representan el comportamiento general del patrón de dispersión de las partículas aerosólicas.

4.7. Coeficientes de Turbiedad de Angstrom y Visibilidad

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk también fue aplicada a los coeficientes de turbiedad de Ångstrom (α y β) y a la visibilidad para asegurar que las medias calculadas en cada uno de los

⁴ A diferencia del albedo por esparcimiento simple (ω), el factor de asimetría (g) y el parámetro de Ångstrom (α), en la *función fase* no puede realizarse una comparación como la que se llevó a cabo para las propiedades ópticas anteriores (que se mencionó en la sección 4.1 de este capítulo). Esto es debido a que los ángulos para los cuales AERONET proporciona las cantidades correspondientes a la *función fase* no coinciden con los ángulos para los cuales se decidió calcular la *función fase* en este trabajo. Por lo tanto, la única comparación que puede realizarse es la cualitativa (una comparación gráfica).

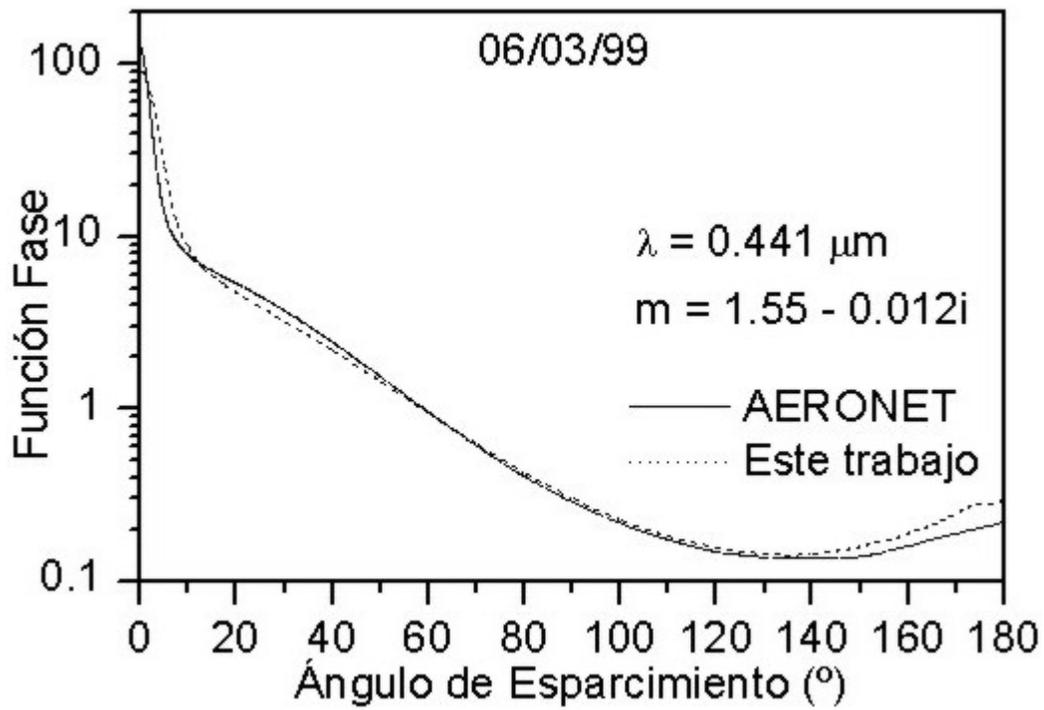


Fig. 4.17: Gráfica de comparación (AERONET-Este trabajo) de la Función Fase para una longitud de onda de $0.441 \mu\text{m}$. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes: $0.673 \mu\text{m}$, $0.873 \mu\text{m}$ y $1.022 \mu\text{m}$.

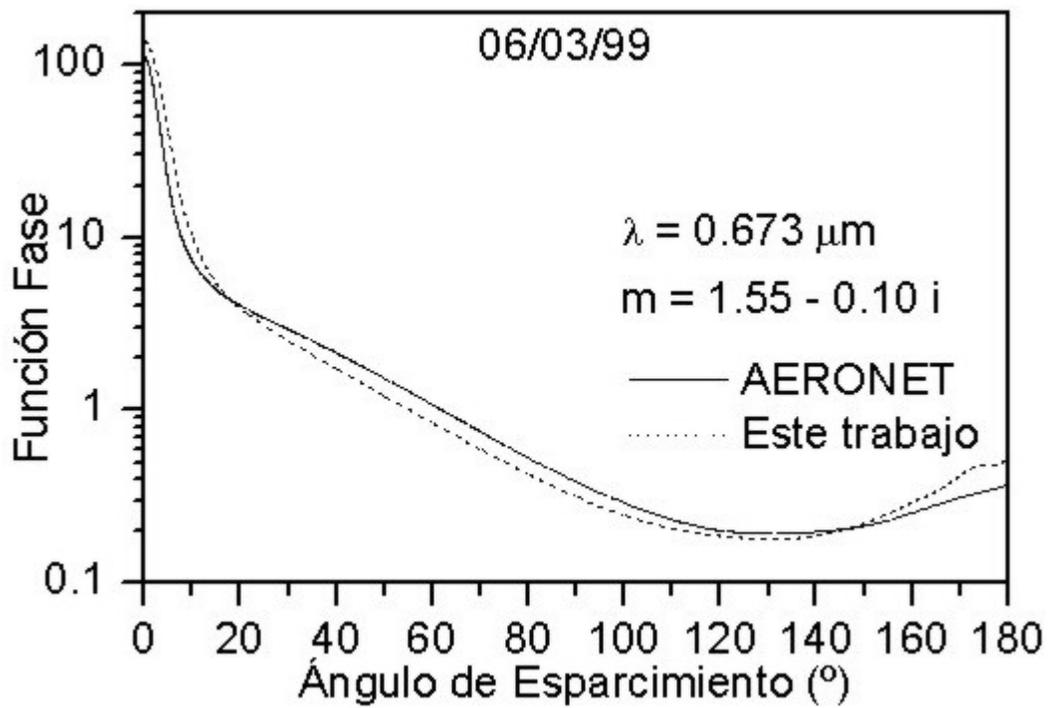


Fig. 4.18: Gráfica de comparación (AERONET-Este trabajo) de la Función Fase para una longitud de onda de $0.673 \mu\text{m}$. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes: $0.441 \mu\text{m}$, $0.873 \mu\text{m}$ y $1.022 \mu\text{m}$.

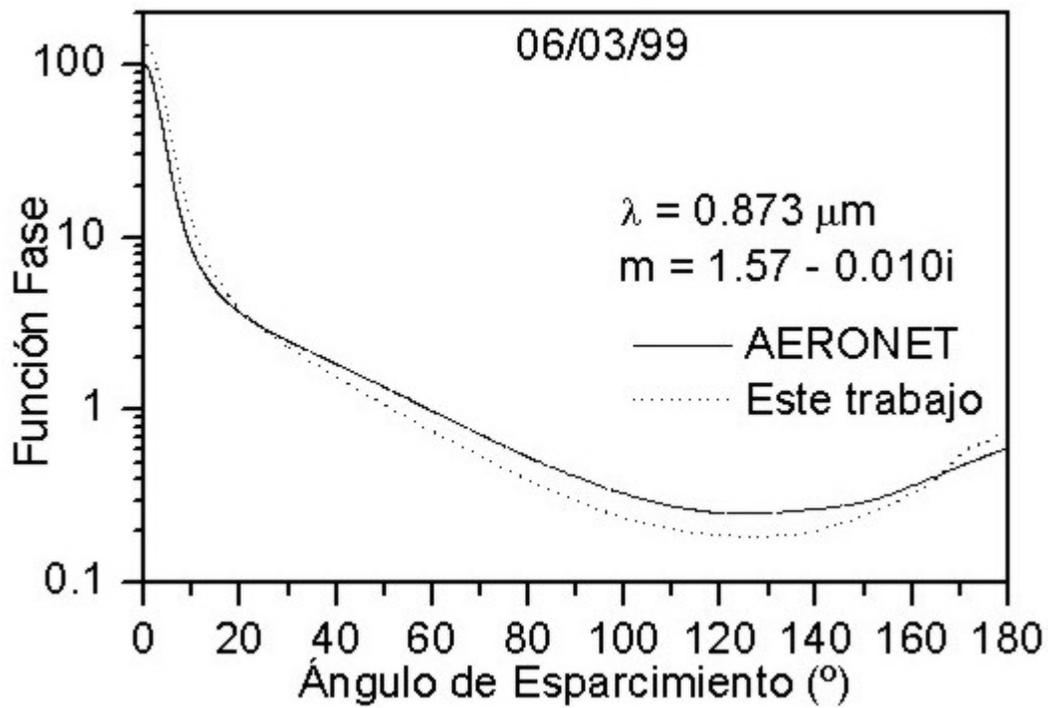


Fig. 4.19: Gráfica de comparación (AERONET-Este trabajo) de la Función Fase para una longitud de onda de $0.873 \mu\text{m}$. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes: $0.441 \mu\text{m}$, $0.673 \mu\text{m}$ y $1.022 \mu\text{m}$.

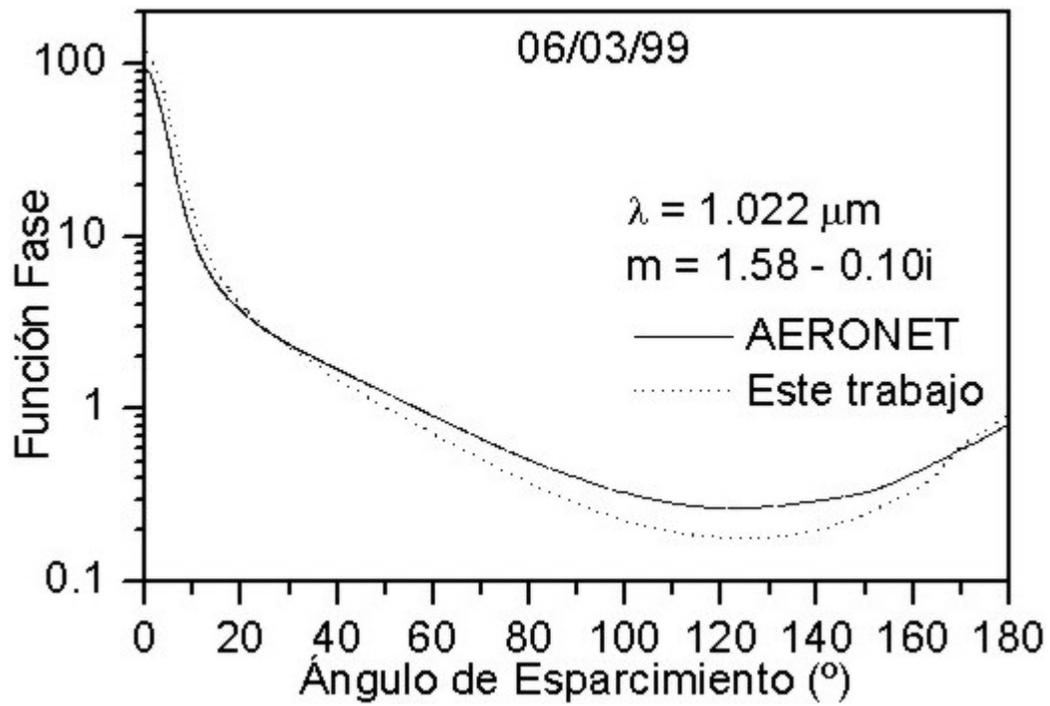


Fig. 4.20: Gráfica de comparación (AERONET-Este trabajo) de la Función Fase para una longitud de onda de $1.022 \mu\text{m}$. El comportamiento es similar para las tres longitudes de onda faltantes: $0.441 \mu\text{m}$, $0.673 \mu\text{m}$ y $0.873 \mu\text{m}$.

grupos formados por las m_r pertenecen a una población con distribución normal.

De un total de 96 grupos resultó que 47 grupos tuvieron distribución normal, 27 grupos no tuvieron ningún dato, 21 grupos no alcanzaron la cantidad mínima de datos para aplicarles la prueba de normalidad y 1 grupo resultó no tener distribución normal (ver tabla 4.12).

De un total de 72 comparaciones entre medias por año, resultó que en 44 de ellas las medias fueron iguales, 27 comparaciones no pudieron realizarse porque al menos un grupo no tuvo media debido a la carencia de datos y en 1 comparación las medias resultaron ser diferentes (ver tabla 4.13).

De un total de 48 comparaciones (entre la mañana y la tarde de cada año), resultó que en 32 de ellas las medias fueron iguales, 15 comparaciones no pudieron realizarse debido a que al menos un grupo no tuvo media debido a la carencia de datos y en 1 comparación las medias resultaron ser diferentes (ver tabla 4.14).

Observando la tabla 4.15, se tiene que la media del parámetro de Ångstrom (α) para cada m_r a lo largo de cuatro años, toma valores entre 1 y 2. Entonces, de acuerdo con la tabla 2.2, se confirma que las partículas aerosólicas son predominantemente de tamaño grande como ya se había mencionado en el análisis correspondiente al factor de asimetría.

Las medias del coeficiente de turbiedad de Ångstrom (β) en la mañana (tabla 4.16) se encuentran dentro del intervalo $(0.1, 0.2]$ como se describe en la tabla 2.1. Esto último indica que hay pocas partículas aerosólicas para cada m_r a lo largo de cuatro años. En cambio en la tarde hay 7 valores que están dentro del intervalo $(0.2, 0.3]$ correspondiendo a que hay muchas partículas aerosólicas presentes en la atmósfera.

Juntando la información de α y β , se sabe que en promedio hay pocas partículas aerosólicas de tamaño grande que hacen que la atmósfera de la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México sea clara. Esta información se confirma observando las tablas 4.17 y 2.3. La tabla

		Normal	No Normal	1 o 2 datos	Vacío	Total
Alfa	Mañana	10	0	1	5	16
Alfa	Tarde	6	0	6	4	16
Beta	Mañana	9	1	1	5	16
Beta	Tarde	6	0	6	4	16
Visibilidad	Mañana	10	0	1	5	16
Visibilidad	Tarde	6	0	6	4	16
Total		47	1	21	27	96

Tab. 4.12: Resumen de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los coeficientes de turbiedad de Ångstrom (α y β) y para la visibilidad. La aplicación de esta prueba se realizó para poder reportar con seguridad las medias calculadas de cada muestra, ya que la mayoría de ellas provienen de una distribución normal.

		Iguales	Diferentes	Vacío	Total
Alfa	Mañana	6	1	5	12
Alfa	Tarde	8	0	4	12
Beta	Mañana	7	0	5	12
Beta	Tarde	8	0	4	12
Visibilidad	Mañana	7	0	5	12
Visibilidad	Tarde	8	0	4	12
Total		42	1	27	72

Tab. 4.13: Resumen de la comparación entre medias por año para los coeficientes de turbiedad de Ångstrom (α y β) y para la visibilidad. Esta comparación muestra que prácticamente no hay diferencias entre las medias.

	Iguales	Diferentes	Vacío	Total
Alfa	10	1	5	16
Beta	11	0	5	16
Visibilidad	11	0	5	16
Total	32	1	15	48

Tab. 4.14: Resumen de la comparación entre medias antes y después del medio día para los coeficientes de turbiedad de Ångstrom (α y β) y para la visibilidad. Esta comparación muestra que prácticamente no hay diferencias entre las medias.

m_r	Medias en la mañana				Medias en la tarde			
	alfa (α)				alfa (α)			
	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	1.7070	1.6880	1.7007	—	1.3880	1.6790	1.5860	1.9610
2	1.7070	1.6506	1.6932	1.7345	1.7307	1.7266	1.5060	2.0363
3	1.7276	1.5859	—	—	1.6890	1.7509	—	—
4	1.7257	1.5620	—	—	1.9090	1.8225	—	—

Tab. 4.15: Tabla de comparación entre las medias en la mañana y en la tarde correspondientes al parámetro de Ångstrom (α).

m_r	Medias en la mañana				Medias en la tarde			
	beta(β)				beta (β)			
	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	0.144	0.130	0.139	—	0.185	0.235	0.200	0.090
2	0.143	0.130	0.135	0.135	0.223	0.213	0.260	0.133
3	0.142	0.173	—	—	0.189	0.217	—	—
4	0.138	0.148	—	—	0.215	0.140	—	—

Tab. 4.16: Tabla de comparación entre las medias en la mañana y en la tarde correspondientes al coeficiente de turbiedad de Ångstrom (β). El número sombreado con gris es la mediana del grupo que no tuvo una distribución normal.

4.17 muestra las medias de la visibilidad para cada m_r a lo largo de cuatro años. En esta tabla se muestra que los valores de la visibilidad en la mañana caen en el intervalo (11, 28] de la tabla 2.3, lo que corresponde a una atmósfera clara. En cambio, en la tarde hay seis valores que caen dentro del intervalo (5, 11], que corresponden a una atmósfera turbia. Observando con más detalle las tablas 4.16 y 4.17, que corresponden a los promedios calculados del coeficiente de turbiedad de Ångstrom (β) y de la visibilidad, se tiene que después del medio día hay un incremento, no muy significativo, en la cantidad de partículas con radios entre $0.1\mu m$ y $1\mu m$ en los años de 1999, 2000 y 2001. Lo anterior se refiere a que aún habiendo demostrado que no hay diferencia significativa, en las propiedades ópticas, entre las medias de la mañana y de la tarde (aplicando la prueba t de Student), existe un incremento en la cantidad de partículas de acuerdo con los intervalos establecidos en la tabla 2.1. Este incremento se refleja en la reducción de la visibilidad después del medio día.

	Medias en la mañana				Medias en la tarde			
	Visibilidad (Km)				Visibilidad (Km)			
m_r	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	13.4	15.5	13.7	—	13.1	7.4	10.3	19.1
2	13.9	13.9	14.7	13.7	9.0	9.2	7.2	12.9
3	13.7	12.6	—	—	10.2	8.5	—	—
4	14.1	14.5	—	—	7.1	12.2	—	—

Tab. 4.17: Tabla de comparación entre las medias en la mañana y en la tarde correspondientes a la visibilidad. La visibilidad presentada en esta tabla no es en dirección horizontal, sino en dirección del almucantar.

Aunque el incremento en β y el decremento en la visibilidad no sean muy significativos, existe una ligera diferencia en la cantidad de partículas aerosólicas entre la mañana y la tarde. En la mañana hay una menor cantidad de partículas que en la tarde. Esta diferencia no provoca un cambio significativo en las propiedades ópticas del aerosol estudiado.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron las propiedades ópticas del aerosol de la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México, entre el día 5 de marzo de 1999 a las 9:10:15 hrs y el día 7 de mayo de 2002 a las 8:21:39 hrs, a partir de un total de 237 datos recuperados por inversión de las radiancias del sol y del cielo. Estos datos son los índices de refracción y la distribución por tamaños del aerosol.

El albedo por esparcimiento simple, el factor de asimetría y el parámetro de Ångstrom (α) del aerosol estudiado, calculados en este trabajo, se compararon por medio de cocientes con los proporcionados por la base de datos pública de la red de fotómetros espectrales AERONET para mostrar que las propiedades ópticas (calculadas por dos modelos distintos) recién mencionadas no son significativamente diferentes. La diferencia entre los albedos y los factores de asimetría varía entre el 0% y el 1.1%, y la diferencia entre los parámetros de Ångstrom varía entre el 0% y el 8.9%.

Los mínimos locales observados en el albedo por esparcimiento simple, y que corresponden a máximos locales en la parte real del índice de refracción, están posiblemente asociados a la existencia de una humedad relativamente alta y a un crecimiento higroscópico en las partículas aerosólicas. En cambio, los máximos locales están asociados a altas concentraciones de partículas de carbón negro. Los máximos locales observados en el factor de asimetría, presentes en las mañanas entre las 7:00 hrs y las 10:00 hrs, están asociadas a los mínimos locales de la absorción de radiación que incide sobre las partículas aerosólicas. Sin embargo, los mínimos locales en el factor de asimetría localizados en

las tardes entre las 16:00 hrs y las 17:30 hrs, corresponden a máximos locales en la absorción de radiación.

Teniendo en cuenta la distribución volumétrica promedio de las partículas aerosólicas, correspondientes a los máximos y mínimos locales observados en el factor de asimetría, se obtuvo que cuando hay máximos en el factor de asimetría, la concentración volumétrica de partículas con radios entre $0.050 \mu\text{m}$ y $0.440 \mu\text{m}$ es la predominante. Sin embargo, cuando hay mínimos, la concentración de las partículas mencionadas líneas arriba, y la concentración de partículas con radios entre $0.576 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ no son significativamente diferentes.

En la comparación de las propiedades ópticas calculadas en este trabajo con las calculadas con un modelo para el aerosol, por Dubovik et al., (2002) se encontró que las partículas aerosólicas de la Ciudad de México y de las Maldivas esparcen menos radiación que el aerosol de Greenbelt, Maryland (E.U.A). En cambio, el esparcimiento de la radiación en Creteil, París es intermedio.

Las partículas ópticamente activas, quienes no tuvieron una contribución despreciable en el espesor óptico de esparcimiento y de extinción, tienen radios entre $0.065 \mu\text{m}$ y $0.6 \mu\text{m}$. Estas constituyen, aproximadamente el 5.4% del total de las partículas aerosólicas con radios entre $0.05 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$. Los máximos (picos) en las contribuciones de los espesores ópticos que corresponden a los radios de las partículas ópticamente activas, no se desplazan hacia partículas con radios menores o mayores entre el día 5 de marzo de 1999 a las 9:10:15 hrs y el día 7 de mayo de 2002 a las 8:21:39 hrs. Esto es debido a que los índices de refracción de las partículas aerosólicas no tienen grandes variaciones, de manera que puedan provocar el desplazamiento del máximo (pico) de las ecuaciones 2.46 y 2.51 porque los espesores ópticos de esparcimiento y de extinción dependen del índice de refracción, además de la longitud de onda (λ) y del radio (r) de las partículas.

La función fase calculada en este trabajo es muy similar¹ a la proporcionada por la red de fotómetros espectrales AERONET a una longitud de onda de $0.441 \mu m$. Sin embargo, a $0.673 \mu m$, $0.873 \mu m$ y $1.022 \mu m$, la función fase difiere un poco entre los ángulos de esparcimiento de 30° y 180° . Esto ocurre debido a que en el modelo AERONET se utilizan condiciones de frontera y algunos métodos de aproximación que no se tomaron en cuenta en el método de este trabajo de tesis.

Las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk aplicadas a los grupos formados por longitud de onda, por años, por masa óptica relativa y por antes y después del medio día (para el albedo por esparcimiento simple, el factor de asimetría, y para los coeficientes de turbiedad de Ångstrom y para la visibilidad) demostraron que la mayor parte de los grupos tienen datos que provienen de una distribución normal, lo que asegura que la media y desviación estándar correspondientes describen el comportamiento central de cada muestra de datos. En aquellos que resultaron ser no normales, se encontró que esta característica es debida a la escasez de datos.

Se determinó que pese a variaciones, no existe un cambio en el albedo por esparcimiento simple entre el 5 de marzo de 1999 y aproximadamente el 9 de abril de 2001. Después de esta fecha y hasta el 7 de mayo de 2002 puede observarse un ligero incremento general en las variaciones. Sin embargo, para el factor de asimetría y el parámetro de Ångstrom, durante los cuatro años no hay un incremento o decremento significativo.

Al realizarse comparaciones entre las medias de las poblaciones pertenecientes al albedo por esparcimiento simple, al factor de asimetría, a los coeficientes de turbiedad de Ångstrom y a la visibilidad, se encontró que hay diferencias en la cantidad de partículas aerosólicas entre la mañana y la tarde en los años 1999, 2000 y 2001. En las tardes hay más partículas con radios entre $0.1 \mu m$ y $1 \mu m$ que en las mañanas. Esto es debido a que las partículas que son emitidas a la atmósfera

¹ Ver comentario que se encuentra en el pie de página de la página 82.

por las mañanas colisionan entre ellas, incrementando de esta manera su tamaño, y por lo tanto disminuyendo la concentración de las partículas con radios menores a $0.1 \mu m$. Esto explica la reducción en la visibilidad por las tardes.

También en este trabajo, se determinó que la atmósfera de la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México es clara por la mañanas y turbia por las tardes, y que la radiación esparcida es predominantemente hacia delante con un lóbulo frontal estrecho entre los ángulos de esparcimiento de 0° y los 10° .

Para finalizar, es importante mencionar que se creó una base de datos con las propiedades ópticas calculadas en este trabajo de tesis, almacenada en un disco compacto (CD) anexo a este trabajo de tesis, para futuros estudios enfocados en la evolución, en el tiempo, de las propiedades ópticas del aerosol de la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México. En el mismo CD se encuentra el paquete de programas que se construyó y se utilizó en este trabajo de tesis, para una utilización posterior, como por ejemplo:

1. Calcular las propiedades ópticas del aerosol de otros lugares del mundo.
2. Complementar otro paquete de programas que pueda construirse en el futuro. Dicho paquete tendría que trabajar con los datos obtenidos en tiempo real por el fotómetro solar CIMEL, para depurarlos y calcular la distribución por tamaños y el índice de refracción del aerosol que se desea estudiar. La creación de este paquete de programas daría independencia al usuario, en la obtención y manejo de datos, y por lo tanto, ya no se dependería de cuando pueda el AERONET proporcionar una base de datos lo más actualizada posible.

APÉNDICE A

RESULTADOS

TABLA A.1 Propiedades ópticas del aerosol calculadas con los programas mencionados en la sección 2.5.

Fecha y Hora	λ (μm)	Re(m)	Im(m)	τ_{ext}	τ_{esp}	τ_{abs}	W_{aerosol}	g_{aerosol}	α	β	Vis(Km)
5/3/99_9:10:15	0.441	1.33	0.007	0.41	0.38	0.03	0.92	0.721			
	0.673	1.35	0.006	0.20	0.18	0.02	0.91	0.613			
	0.873	1.37	0.006	0.13	0.12	0.01	0.89	0.561			
	1.022	1.38	0.007	0.11	0.09	0.01	0.87	0.551	1.614	0.11	19.4
6/3/99_16:4:2	0.441	1.55	0.012	0.81	0.73	0.08	0.91	0.661			
	0.673	1.55	0.010	0.41	0.37	0.05	0.89	0.594			
	0.873	1.57	0.010	0.28	0.25	0.04	0.87	0.561			
	1.022	1.58	0.010	0.23	0.20	0.03	0.86	0.562	1.498	0.23	8.1
29/3/99_16:40:25	0.441	1.53	0.016	1.06	0.95	0.11	0.89	0.652			
	0.673	1.53	0.013	0.50	0.44	0.07	0.87	0.572			
	0.873	1.55	0.014	0.33	0.28	0.05	0.83	0.531			
	1.022	1.56	0.014	0.26	0.21	0.05	0.82	0.529	1.673	0.27	6.2
30/3/99_8:45:56	0.441	1.33	0.010	0.41	0.37	0.04	0.90	0.733			
	0.673	1.35	0.008	0.22	0.19	0.02	0.90	0.645			
	0.873	1.37	0.010	0.15	0.13	0.02	0.86	0.601			
	1.022	1.40	0.011	0.13	0.11	0.02	0.85	0.578	1.408	0.13	18.2
30/3/99_9:11:50	0.441	1.34	0.012	0.43	0.38	0.05	0.88	0.716			
	0.673	1.36	0.010	0.23	0.20	0.03	0.87	0.641			
	0.873	1.38	0.011	0.16	0.13	0.03	0.84	0.604			
	1.022	1.40	0.011	0.13	0.11	0.02	0.83	0.588	1.451	0.13	17.1
9/4/99_17:27:45	0.441	1.60	0.011	0.44	0.39	0.05	0.88	0.622			
	0.673	1.60	0.008	0.24	0.21	0.03	0.87	0.594			
	0.873	1.60	0.008	0.18	0.15	0.03	0.85	0.608			
	1.022	1.60	0.008	0.16	0.13	0.02	0.85	0.629	1.245	0.15	16.4
12/4/99_9:1:0	0.441	1.46	0.042	0.50	0.37	0.13	0.74	0.646			
	0.673	1.45	0.020	0.23	0.18	0.05	0.78	0.591			
	0.873	1.48	0.021	0.17	0.13	0.04	0.75	0.583			
	1.022	1.52	0.021	0.15	0.11	0.04	0.75	0.583	1.464	0.14	15.0
13/4/99_7:28:45	0.441	1.33	0.013	0.53	0.46	0.07	0.87	0.711			
	0.673	1.35	0.009	0.26	0.23	0.03	0.87	0.597			
	0.873	1.38	0.010	0.18	0.15	0.03	0.84	0.550			
	1.022	1.41	0.011	0.16	0.13	0.03	0.83	0.540	1.471	0.15	13.7
13/4/99_7:49:58	0.441	1.33	0.014	0.53	0.46	0.07	0.86	0.696			
	0.673	1.35	0.010	0.26	0.22	0.04	0.86	0.584			
	0.873	1.38	0.012	0.18	0.15	0.03	0.82	0.538			
	1.022	1.42	0.013	0.16	0.13	0.03	0.81	0.520	1.489	0.15	13.6
13/4/99_8:34:37	0.441	1.33	0.017	0.56	0.47	0.09	0.83	0.693			
	0.673	1.35	0.011	0.27	0.23	0.04	0.84	0.589			

	0.873	1.38	0.012	0.19	0.15	0.03	0.82	0.547			
	1.022	1.41	0.013	0.16	0.13	0.03	0.80	0.535	1.510	0.16	12.9
13/4/99_9:0:14	0.441	1.38	0.022	0.60	0.50	0.10	0.83	0.697			
	0.673	1.39	0.013	0.28	0.24	0.04	0.84	0.599			
	0.873	1.42	0.013	0.20	0.16	0.03	0.82	0.551			
	1.022	1.44	0.013	0.16	0.13	0.03	0.81	0.543	1.578	0.16	12.0
22/4/99_7:22:39	0.441	1.33	0.010	0.41	0.36	0.05	0.89	0.680			
	0.673	1.35	0.008	0.19	0.17	0.02	0.87	0.561			
	0.873	1.38	0.009	0.13	0.11	0.02	0.84	0.515			
	1.022	1.41	0.010	0.11	0.09	0.02	0.82	0.507	1.590	0.11	19.7
22/4/99_8:54:24	0.441	1.35	0.011	0.45	0.40	0.05	0.89	0.689			
	0.673	1.37	0.008	0.21	0.19	0.02	0.88	0.576			
	0.873	1.40	0.009	0.14	0.12	0.02	0.85	0.524			
	1.022	1.42	0.010	0.12	0.10	0.02	0.83	0.516	1.617	0.12	17.3
24/4/99_8:27:40	0.441	1.34	0.013	0.40	0.35	0.06	0.86	0.677			
	0.673	1.36	0.011	0.19	0.16	0.03	0.83	0.559			
	0.873	1.39	0.012	0.14	0.11	0.03	0.80	0.527			
	1.022	1.42	0.013	0.11	0.09	0.02	0.78	0.528	1.517	0.11	19.8
24/4/99_8:53:19	0.441	1.35	0.014	0.42	0.36	0.06	0.86	0.682			
	0.673	1.37	0.011	0.20	0.17	0.03	0.84	0.566			
	0.873	1.39	0.012	0.14	0.11	0.03	0.80	0.538			
	1.022	1.42	0.013	0.12	0.09	0.03	0.78	0.539	1.545	0.11	18.9
25/4/99_7:20:50	0.441	1.37	0.009	0.60	0.55	0.05	0.92	0.699			
	0.673	1.37	0.008	0.26	0.23	0.03	0.89	0.578			
	0.873	1.39	0.009	0.17	0.14	0.02	0.85	0.516			
	1.022	1.41	0.010	0.13	0.11	0.02	0.83	0.504	1.786	0.13	12.8
25/4/99_8:27:8	0.441	1.34	0.009	0.55	0.50	0.05	0.91	0.694			
	0.673	1.35	0.008	0.25	0.22	0.03	0.88	0.578			
	0.873	1.37	0.009	0.16	0.14	0.03	0.84	0.522			
	1.022	1.39	0.010	0.13	0.11	0.02	0.82	0.511	1.721	0.13	13.9
25/4/99_8:52:46	0.441	1.40	0.012	0.56	0.50	0.05	0.90	0.696			
	0.673	1.40	0.011	0.25	0.22	0.03	0.87	0.585			
	0.873	1.42	0.012	0.16	0.14	0.03	0.83	0.528			
	1.022	1.44	0.013	0.13	0.11	0.03	0.81	0.517	1.733	0.13	13.6
26/4/99_7:20:16	0.441	1.33	0.009	0.53	0.48	0.05	0.91	0.698			
	0.673	1.34	0.008	0.24	0.21	0.03	0.88	0.575			
	0.873	1.36	0.010	0.16	0.13	0.03	0.83	0.516			
	1.022	1.38	0.011	0.13	0.10	0.02	0.80	0.502	1.729	0.13	14.5
26/4/99_7:41:41	0.441	1.33	0.010	0.54	0.48	0.05	0.90	0.707			
	0.673	1.34	0.009	0.24	0.21	0.03	0.87	0.580			
	0.873	1.36	0.010	0.16	0.13	0.03	0.84	0.515			
	1.022	1.38	0.011	0.13	0.10	0.02	0.81	0.497	1.739	0.13	14.3
26/4/99_8:26:38	0.441	1.35	0.010	0.53	0.48	0.05	0.90	0.691			
	0.673	1.36	0.009	0.24	0.21	0.03	0.87	0.572			
	0.873	1.38	0.010	0.15	0.13	0.03	0.84	0.516			
	1.022	1.40	0.011	0.12	0.10	0.02	0.81	0.502	1.752	0.12	14.4
26/4/99_8:52:15	0.441	1.59	0.027	0.64	0.55	0.08	0.87	0.677			
	0.673	1.52	0.021	0.28	0.24	0.04	0.85	0.611			

	0.873	1.53	0.022	0.18	0.15	0.03	0.81	0.545			
	1.022	1.55	0.024	0.15	0.11	0.03	0.78	0.520	1.769	0.15	11.6
28/4/99_8:51:18	0.441	1.45	0.026	0.52	0.44	0.08	0.84	0.686			
	0.673	1.44	0.017	0.23	0.19	0.04	0.84	0.580			
	0.873	1.45	0.018	0.15	0.12	0.03	0.80	0.527			
	1.022	1.48	0.019	0.12	0.09	0.03	0.78	0.509	1.778	0.12	15.0
29/4/99_8:25:10	0.441	1.43	0.028	0.44	0.37	0.08	0.82	0.679			
	0.673	1.42	0.019	0.19	0.15	0.04	0.81	0.567			
	0.873	1.43	0.020	0.12	0.09	0.03	0.76	0.518			
	1.022	1.45	0.022	0.10	0.07	0.03	0.73	0.509	1.819	0.10	18.9
30/4/99_7:18:8	0.441	1.40	0.014	0.51	0.45	0.06	0.88	0.690			
	0.673	1.40	0.011	0.23	0.20	0.03	0.86	0.584			
	0.873	1.42	0.013	0.16	0.13	0.03	0.81	0.545			
	1.022	1.45	0.014	0.13	0.11	0.03	0.80	0.539	1.622	0.13	14.9
30/4/99_7:39:39	0.441	1.33	0.012	0.51	0.44	0.07	0.87	0.682			
	0.673	1.35	0.010	0.24	0.21	0.04	0.85	0.568			
	0.873	1.37	0.011	0.16	0.13	0.03	0.81	0.529			
	1.022	1.39	0.012	0.13	0.10	0.03	0.79	0.525	1.626	0.13	14.8
30/4/99_8:24:42	0.441	1.59	0.022	0.53	0.46	0.06	0.88	0.664			
	0.673	1.53	0.017	0.24	0.20	0.04	0.85	0.604			
	0.873	1.54	0.018	0.16	0.13	0.03	0.82	0.557			
	1.022	1.57	0.019	0.13	0.11	0.03	0.80	0.541	1.678	0.13	14.5
1/5/99_8:24:16	0.441	1.48	0.014	0.63	0.57	0.06	0.91	0.689			
	0.673	1.47	0.012	0.29	0.26	0.03	0.89	0.595			
	0.873	1.47	0.013	0.17	0.15	0.03	0.85	0.535			
	1.022	1.49	0.014	0.14	0.11	0.02	0.83	0.513	1.825	0.14	11.8
1/5/99_8:49:58	0.441	1.48	0.016	0.66	0.59	0.06	0.90	0.690			
	0.673	1.46	0.014	0.29	0.25	0.04	0.87	0.597			
	0.873	1.46	0.014	0.18	0.15	0.03	0.84	0.537			
	1.022	1.48	0.015	0.14	0.11	0.03	0.82	0.515	1.863	0.14	11.4
2/5/99_7:38:43	0.441	1.36	0.009	0.60	0.54	0.05	0.91	0.688			
	0.673	1.37	0.008	0.27	0.24	0.03	0.89	0.583			
	0.873	1.38	0.009	0.17	0.14	0.02	0.85	0.531			
	1.022	1.40	0.010	0.13	0.11	0.02	0.83	0.514	1.801	0.13	12.6
2/5/99_8:23:50	0.441	1.39	0.010	0.57	0.52	0.05	0.92	0.692			
	0.673	1.40	0.009	0.26	0.23	0.03	0.89	0.579			
	0.873	1.41	0.010	0.16	0.14	0.02	0.85	0.522			
	1.022	1.43	0.010	0.13	0.11	0.02	0.84	0.504	1.818	0.13	13.2
2/5/99_8:49:35	0.441	1.42	0.012	0.58	0.52	0.05	0.91	0.686			
	0.673	1.42	0.010	0.25	0.23	0.03	0.89	0.579			
	0.873	1.43	0.011	0.16	0.13	0.02	0.85	0.523			
	1.022	1.45	0.011	0.12	0.10	0.02	0.84	0.506	1.845	0.13	13.3
3/5/99_7:16:42	0.441	1.58	0.014	0.47	0.43	0.04	0.91	0.643			
	0.673	1.56	0.013	0.22	0.19	0.02	0.88	0.564			
	0.873	1.57	0.016	0.14	0.11	0.02	0.84	0.516			
	1.022	1.59	0.018	0.11	0.09	0.02	0.81	0.509	1.758	0.11	16.7
3/5/99_7:38:17	0.441	1.41	0.013	0.48	0.43	0.05	0.89	0.664			
	0.673	1.42	0.011	0.22	0.19	0.03	0.87	0.549			

	0.873	1.44	0.012	0.14	0.11	0.02	0.83	0.503			
	1.022	1.46	0.013	0.11	0.09	0.02	0.81	0.498	1.779	0.11	16.5
3/5/99_8:23:27	0.441	1.59	0.023	0.51	0.45	0.06	0.88	0.647			
	0.673	1.55	0.019	0.22	0.19	0.03	0.85	0.569			
	0.873	1.56	0.020	0.14	0.11	0.03	0.81	0.519			
	1.022	1.59	0.021	0.11	0.09	0.02	0.79	0.506	1.793	0.11	15.7
3/5/99_8:49:11	0.441	1.54	0.026	0.55	0.47	0.08	0.86	0.658			
	0.673	1.51	0.018	0.24	0.20	0.04	0.85	0.567			
	0.873	1.52	0.018	0.15	0.12	0.03	0.81	0.519			
	1.022	1.54	0.019	0.12	0.09	0.02	0.79	0.510	1.844	0.12	14.2
4/5/99_7:16:17	0.441	1.39	0.011	0.43	0.39	0.04	0.91	0.676			
	0.673	1.40	0.010	0.19	0.16	0.02	0.88	0.549			
	0.873	1.41	0.011	0.11	0.10	0.02	0.84	0.491			
	1.022	1.43	0.012	0.09	0.07	0.02	0.81	0.479	1.881	0.09	19.9
4/5/99_7:37:53	0.441	1.43	0.016	0.43	0.38	0.05	0.89	0.671			
	0.673	1.43	0.012	0.18	0.16	0.02	0.87	0.555			
	0.873	1.44	0.013	0.11	0.09	0.02	0.83	0.503			
	1.022	1.46	0.015	0.09	0.07	0.02	0.80	0.493	1.866	0.09	20.1
4/5/99_8:23:5	0.441	1.41	0.017	0.43	0.38	0.05	0.87	0.674			
	0.673	1.41	0.014	0.18	0.16	0.03	0.84	0.549			
	0.873	1.43	0.014	0.12	0.09	0.02	0.81	0.494			
	1.022	1.45	0.015	0.09	0.07	0.02	0.78	0.486	1.847	0.09	19.7
5/5/99_8:48:29	0.441	1.36	0.015	0.42	0.36	0.06	0.86	0.669			
	0.673	1.38	0.012	0.20	0.17	0.03	0.84	0.560			
	0.873	1.40	0.013	0.13	0.11	0.03	0.80	0.524			
	1.022	1.43	0.013	0.11	0.09	0.02	0.79	0.518	1.631	0.11	18.8
6/5/99_7:15:25	0.441	1.40	0.013	0.49	0.43	0.05	0.89	0.680			
	0.673	1.41	0.011	0.22	0.19	0.03	0.87	0.562			
	0.873	1.43	0.013	0.14	0.12	0.03	0.82	0.513			
	1.022	1.46	0.014	0.12	0.10	0.02	0.80	0.503	1.697	0.12	16.1
6/5/99_7:37:5	0.441	1.46	0.021	0.49	0.42	0.07	0.87	0.669			
	0.673	1.46	0.016	0.22	0.19	0.03	0.85	0.564			
	0.873	1.48	0.018	0.15	0.12	0.03	0.81	0.517			
	1.022	1.51	0.020	0.12	0.09	0.03	0.78	0.505	1.704	0.12	16.0
6/5/99_8:22:21	0.441	1.54	0.041	0.56	0.45	0.11	0.80	0.659			
	0.673	1.51	0.024	0.25	0.20	0.05	0.80	0.575			
	0.873	1.53	0.024	0.17	0.13	0.04	0.77	0.537			
	1.022	1.56	0.025	0.14	0.11	0.03	0.75	0.531	1.678	0.14	13.4
6/5/99_8:48:9	0.441	1.55	0.041	0.61	0.49	0.12	0.81	0.663			
	0.673	1.51	0.025	0.27	0.22	0.05	0.80	0.582			
	0.873	1.52	0.025	0.18	0.14	0.04	0.77	0.541			
	1.022	1.54	0.026	0.14	0.11	0.04	0.74	0.534	1.745	0.14	12.2
7/5/99_7:15:1	0.441	1.36	0.008	0.78	0.72	0.06	0.92	0.697			
	0.673	1.37	0.008	0.37	0.33	0.04	0.89	0.607			
	0.873	1.38	0.010	0.24	0.20	0.04	0.84	0.563			
	1.022	1.40	0.011	0.19	0.16	0.04	0.82	0.547	1.675	0.20	8.8
7/5/99_7:36:41	0.441	1.34	0.010	0.83	0.75	0.09	0.90	0.702			
	0.673	1.35	0.008	0.39	0.35	0.05	0.88	0.612			

	0.873	1.36	0.009	0.25	0.21	0.04	0.84	0.568			
	1.022	1.37	0.009	0.20	0.16	0.03	0.83	0.557	1.719	0.20	8.2
7/5/99_8:22:0	0.441	1.45	0.014	0.85	0.77	0.08	0.90	0.704			
	0.673	1.44	0.012	0.40	0.35	0.05	0.88	0.619			
	0.873	1.44	0.012	0.25	0.21	0.04	0.85	0.565			
	1.022	1.46	0.013	0.20	0.16	0.03	0.83	0.542	1.751	0.20	8.1
7/5/99_8:47:50	0.441	1.48	0.015	0.82	0.74	0.08	0.91	0.699			
	0.673	1.47	0.013	0.40	0.35	0.05	0.88	0.617			
	0.873	1.47	0.013	0.24	0.21	0.03	0.86	0.558			
	1.022	1.49	0.014	0.19	0.16	0.03	0.84	0.531	1.743	0.20	8.3
8/5/99_7:14:38	0.441	1.39	0.009	0.75	0.69	0.05	0.93	0.707			
	0.673	1.40	0.009	0.34	0.31	0.03	0.90	0.592			
	0.873	1.41	0.010	0.21	0.18	0.03	0.87	0.520			
	1.022	1.42	0.011	0.16	0.13	0.03	0.84	0.493	1.864	0.16	9.5
8/5/99_7:36:19	0.441	1.38	0.011	0.78	0.71	0.07	0.91	0.710			
	0.673	1.39	0.010	0.36	0.32	0.04	0.89	0.594			
	0.873	1.39	0.011	0.21	0.18	0.03	0.85	0.523			
	1.022	1.41	0.012	0.16	0.13	0.03	0.82	0.492	1.878	0.17	9.2
8/5/99_8:21:41	0.441	1.40	0.013	0.80	0.73	0.07	0.91	0.706			
	0.673	1.40	0.012	0.36	0.31	0.04	0.88	0.596			
	0.873	1.41	0.013	0.22	0.18	0.04	0.84	0.522			
	1.022	1.42	0.014	0.17	0.13	0.03	0.81	0.493	1.884	0.17	8.9
8/5/99_8:47:32	0.441	1.41	0.013	0.78	0.71	0.07	0.91	0.706			
	0.673	1.41	0.012	0.35	0.31	0.04	0.88	0.598			
	0.873	1.42	0.013	0.21	0.18	0.03	0.84	0.525			
	1.022	1.43	0.014	0.16	0.13	0.03	0.81	0.496	1.872	0.17	9.2
9/5/99_7:35:57	0.441	1.45	0.010	1.07	1.00	0.07	0.94	0.718			
	0.673	1.44	0.010	0.51	0.46	0.04	0.92	0.633			
	0.873	1.44	0.012	0.30	0.26	0.04	0.88	0.559			
	1.022	1.45	0.013	0.23	0.19	0.03	0.85	0.517	1.851	0.24	6.2
9/5/99_8:21:22	0.441	1.39	0.010	1.04	0.96	0.08	0.93	0.724			
	0.673	1.40	0.009	0.49	0.45	0.05	0.91	0.620			
	0.873	1.40	0.010	0.29	0.25	0.04	0.87	0.545			
	1.022	1.42	0.011	0.22	0.19	0.03	0.85	0.505	1.840	0.23	6.5
9/5/99_8:47:14	0.441	1.41	0.011	0.96	0.88	0.07	0.92	0.715			
	0.673	1.41	0.010	0.44	0.40	0.04	0.90	0.615			
	0.873	1.42	0.011	0.27	0.23	0.04	0.87	0.540			
	1.022	1.43	0.012	0.20	0.17	0.03	0.84	0.505	1.856	0.21	7.1
10/5/99_7:13:53	0.441	1.36	0.008	0.69	0.64	0.05	0.93	0.720			
	0.673	1.37	0.008	0.32	0.29	0.03	0.90	0.606			
	0.873	1.37	0.009	0.19	0.16	0.03	0.87	0.538			
	1.022	1.39	0.009	0.15	0.12	0.02	0.85	0.508	1.863	0.15	10.6
10/5/99_7:35:38	0.441	1.38	0.012	0.68	0.61	0.06	0.91	0.714			
	0.673	1.39	0.010	0.31	0.28	0.03	0.89	0.601			
	0.873	1.40	0.012	0.19	0.16	0.03	0.84	0.529			
	1.022	1.41	0.013	0.15	0.12	0.03	0.81	0.500	1.828	0.15	10.7
10/5/99_8:21:5	0.441	1.59	0.019	0.73	0.66	0.07	0.91	0.684			
	0.673	1.51	0.016	0.33	0.29	0.04	0.89	0.630			

	0.873	1.51	0.016	0.20	0.17	0.03	0.86	0.557			
	1.022	1.52	0.018	0.15	0.13	0.03	0.83	0.518	1.865	0.16	9.9
10/5/99_8:46:59	0.441	1.48	0.019	0.79	0.70	0.08	0.90	0.712			
	0.673	1.45	0.017	0.36	0.31	0.05	0.87	0.629			
	0.873	1.45	0.018	0.22	0.18	0.04	0.83	0.557			
	1.022	1.47	0.019	0.17	0.14	0.03	0.81	0.517	1.833	0.17	9.0
12/5/99_7:13:14	0.441	1.33	0.013	0.65	0.57	0.07	0.88	0.727			
	0.673	1.34	0.010	0.30	0.26	0.04	0.87	0.605			
	0.873	1.35	0.011	0.18	0.15	0.03	0.83	0.531			
	1.022	1.36	0.012	0.14	0.11	0.03	0.80	0.505	1.827	0.14	11.3
13/5/99_8:46:20	0.441	1.37	0.021	0.43	0.36	0.07	0.84	0.707			
	0.673	1.38	0.016	0.21	0.17	0.04	0.82	0.600			
	0.873	1.39	0.016	0.13	0.10	0.03	0.79	0.546			
	1.022	1.41	0.017	0.11	0.08	0.03	0.76	0.529	1.695	0.11	18.3
16/5/99_8:45:45	0.441	1.43	0.014	0.63	0.57	0.06	0.91	0.726			
	0.673	1.42	0.013	0.31	0.27	0.04	0.88	0.648			
	0.873	1.43	0.014	0.20	0.17	0.03	0.85	0.588			
	1.022	1.44	0.014	0.16	0.13	0.03	0.83	0.560	1.674	0.16	11.1
17/5/99_8:45:37	0.441	1.59	0.014	0.77	0.71	0.06	0.92	0.691			
	0.673	1.49	0.011	0.40	0.37	0.03	0.92	0.669			
	0.873	1.49	0.011	0.26	0.23	0.02	0.91	0.613			
	1.022	1.50	0.011	0.20	0.18	0.02	0.90	0.573	1.619	0.21	8.6
20/5/99_8:45:16	0.441	1.42	0.042	0.44	0.33	0.11	0.74	0.667			
	0.673	1.40	0.023	0.19	0.14	0.05	0.76	0.579			
	0.873	1.42	0.023	0.13	0.09	0.03	0.73	0.551			
	1.022	1.45	0.026	0.11	0.08	0.03	0.69	0.546	1.697	0.10	18.9
21/5/99_8:19:3	0.441	1.34	0.024	0.43	0.34	0.09	0.80	0.687			
	0.673	1.35	0.014	0.19	0.16	0.04	0.81	0.563			
	0.873	1.37	0.015	0.13	0.10	0.03	0.77	0.519			
	1.022	1.40	0.017	0.11	0.08	0.03	0.74	0.509	1.684	0.10	19.1
22/5/99_7:32:55	0.441	1.41	0.014	0.47	0.42	0.05	0.89	0.705			
	0.673	1.41	0.011	0.23	0.20	0.03	0.87	0.618			
	0.873	1.43	0.012	0.16	0.13	0.03	0.83	0.576			
	1.022	1.46	0.013	0.13	0.11	0.02	0.82	0.561	1.546	0.13	15.9
22/5/99_8:18:57	0.441	1.58	0.028	0.51	0.44	0.07	0.86	0.690			
	0.673	1.50	0.022	0.24	0.20	0.04	0.84	0.641			
	0.873	1.51	0.024	0.16	0.13	0.03	0.80	0.587			
	1.022	1.53	0.025	0.13	0.10	0.03	0.78	0.562	1.609	0.13	14.7
22/5/99_8:45:6	0.441	1.42	0.022	0.55	0.47	0.08	0.86	0.716			
	0.673	1.41	0.017	0.26	0.22	0.04	0.84	0.627			
	0.873	1.42	0.018	0.17	0.13	0.03	0.80	0.569			
	1.022	1.44	0.019	0.13	0.10	0.03	0.78	0.542	1.701	0.14	13.5
26/5/99_7:10:21	0.441	1.45	0.017	0.48	0.43	0.06	0.88	0.696			
	0.673	1.42	0.017	0.23	0.19	0.04	0.84	0.643			
	0.873	1.42	0.020	0.15	0.12	0.03	0.78	0.606			
	1.022	1.43	0.022	0.12	0.09	0.03	0.75	0.590	1.654	0.12	15.8
30/5/99_7:10:4	0.441	1.39	0.015	0.43	0.38	0.05	0.89	0.718			
	0.673	1.38	0.012	0.19	0.17	0.02	0.87	0.619			

	0.873	1.39	0.013	0.12	0.10	0.02	0.83	0.554			
	1.022	1.41	0.015	0.10	0.08	0.02	0.80	0.525	1.797	0.10	19.5
30/5/99_7:32:17	0.441	1.38	0.016	0.43	0.38	0.05	0.88	0.717			
	0.673	1.38	0.012	0.20	0.17	0.03	0.87	0.613			
	0.873	1.39	0.014	0.13	0.10	0.02	0.82	0.549			
	1.022	1.41	0.015	0.10	0.08	0.02	0.80	0.522	1.765	0.10	18.9
31/5/99_16:28:28	0.441	1.33	0.012	0.41	0.34	0.06	0.85	0.643			
	0.673	1.37	0.011	0.21	0.18	0.04	0.82	0.536			
	0.873	1.42	0.012	0.16	0.13	0.03	0.80	0.520			
	1.022	1.48	0.012	0.14	0.11	0.03	0.80	0.517	1.278	0.14	18.2
5/6/99_7:10:2	0.441	1.33	0.008	0.91	0.84	0.07	0.92	0.739			
	0.673	1.33	0.008	0.44	0.39	0.04	0.90	0.666			
	0.873	1.34	0.010	0.29	0.24	0.04	0.86	0.617			
	1.022	1.35	0.011	0.22	0.19	0.04	0.83	0.590	1.671	0.23	7.3
10/6/99_7:34:7	0.441	1.34	0.013	0.49	0.45	0.05	0.90	0.780			
	0.673	1.34	0.012	0.26	0.23	0.03	0.89	0.710			
	0.873	1.34	0.015	0.17	0.14	0.03	0.85	0.654			
	1.022	1.35	0.017	0.13	0.11	0.02	0.81	0.615	1.596	0.14	14.6
28/10/99_16:38:25	0.441	1.40	0.010	0.76	0.68	0.08	0.90	0.652			
	0.673	1.43	0.009	0.40	0.35	0.05	0.89	0.604			
	0.873	1.45	0.010	0.26	0.22	0.04	0.85	0.574			
	1.022	1.46	0.010	0.20	0.17	0.03	0.84	0.559	1.583	0.21	8.7
3/11/99_14:23:21	0.441	1.41	0.018	0.82	0.71	0.12	0.86	0.670			
	0.673	1.40	0.017	0.38	0.31	0.07	0.82	0.612			
	0.873	1.40	0.015	0.23	0.18	0.05	0.79	0.574			
	1.022	1.39	0.013	0.16	0.13	0.04	0.79	0.562	1.906	0.17	8.5
3/11/99_15:23:21	0.441	1.33	0.010	0.55	0.49	0.06	0.89	0.675			
	0.673	1.34	0.009	0.25	0.22	0.04	0.86	0.590			
	0.873	1.35	0.009	0.16	0.13	0.03	0.83	0.558			
	1.022	1.35	0.008	0.12	0.10	0.02	0.83	0.556	1.825	0.12	13.9
3/11/99_15:43:51	0.441	1.38	0.010	0.50	0.45	0.05	0.90	0.660			
	0.673	1.39	0.008	0.23	0.21	0.03	0.88	0.600			
	0.873	1.39	0.008	0.14	0.12	0.02	0.86	0.572			
	1.022	1.40	0.007	0.11	0.10	0.02	0.86	0.562	1.807	0.11	15.4
3/11/99_16:34:9	0.441	1.33	0.010	0.52	0.46	0.06	0.89	0.669			
	0.673	1.35	0.008	0.24	0.21	0.03	0.87	0.568			
	0.873	1.37	0.008	0.15	0.13	0.02	0.85	0.529			
	1.022	1.39	0.008	0.12	0.10	0.02	0.84	0.519	1.723	0.12	14.8
4/11/99_16:32:20	0.441	1.59	0.021	0.74	0.66	0.08	0.89	0.634			
	0.673	1.55	0.016	0.33	0.29	0.04	0.87	0.571			
	0.873	1.55	0.016	0.21	0.18	0.03	0.84	0.534			
	1.022	1.55	0.015	0.16	0.13	0.03	0.83	0.530	1.850	0.16	9.7
4/11/99_16:55:23	0.441	1.58	0.016	0.78	0.70	0.08	0.90	0.605			
	0.673	1.55	0.015	0.35	0.31	0.05	0.87	0.565			
	0.873	1.54	0.016	0.22	0.18	0.04	0.83	0.545			
	1.022	1.54	0.015	0.17	0.14	0.03	0.82	0.543	1.841	0.17	9.1
5/11/99_14:22:14	0.441	1.53	0.013	0.66	0.60	0.05	0.92	0.675			
	0.673	1.48	0.010	0.33	0.30	0.03	0.92	0.642			

	0.873	1.47	0.008	0.20	0.19	0.02	0.92	0.606			
	1.022	1.47	0.007	0.15	0.14	0.01	0.92	0.585	1.732	0.16	10.6
10/11/99_9:7:43	0.441	1.33	0.009	0.92	0.85	0.07	0.92	0.741			
	0.673	1.35	0.008	0.48	0.44	0.04	0.91	0.653			
	0.873	1.36	0.008	0.31	0.28	0.03	0.90	0.600			
	1.022	1.37	0.009	0.24	0.21	0.03	0.87	0.575	1.615	0.25	6.9
10/11/99_9:22:31	0.441	1.34	0.011	0.86	0.78	0.08	0.91	0.738			
	0.673	1.35	0.009	0.44	0.40	0.04	0.90	0.660			
	0.873	1.36	0.010	0.29	0.25	0.04	0.87	0.613			
	1.022	1.37	0.011	0.22	0.19	0.03	0.85	0.589	1.607	0.23	7.5
14/11/99_10:23:6	0.441	1.59	0.014	0.56	0.52	0.04	0.93	0.674			
	0.673	1.49	0.012	0.23	0.21	0.02	0.91	0.620			
	0.873	1.48	0.011	0.13	0.11	0.01	0.89	0.536			
	1.022	1.48	0.011	0.09	0.08	0.01	0.88	0.490	2.197	0.09	14.8
16/11/99_9:23:25	0.441	1.59	0.005	0.45	0.44	0.01	0.97	0.663			
	0.673	1.50	0.004	0.20	0.19	0.01	0.96	0.628			
	0.873	1.50	0.004	0.12	0.11	0.01	0.96	0.566			
	1.022	1.51	0.004	0.09	0.08	0.00	0.95	0.530	1.943	0.09	18.6
18/11/99_7:58:15	0.441	1.33	0.013	0.42	0.36	0.05	0.88	0.712			
	0.673	1.34	0.009	0.19	0.17	0.02	0.88	0.602			
	0.873	1.36	0.010	0.12	0.11	0.02	0.84	0.542			
	1.022	1.37	0.011	0.10	0.08	0.02	0.82	0.524	1.739	0.10	19.8
18/11/99_9:15:30	0.441	1.60	0.022	0.43	0.39	0.05	0.89	0.672			
	0.673	1.51	0.017	0.20	0.17	0.03	0.87	0.628			
	0.873	1.49	0.016	0.12	0.10	0.02	0.84	0.577			
	1.022	1.50	0.016	0.09	0.08	0.02	0.83	0.554	1.862	0.09	19.1
19/11/99_16:24:46	0.441	1.34	0.010	0.54	0.47	0.07	0.88	0.644			
	0.673	1.36	0.008	0.25	0.22	0.04	0.86	0.559			
	0.873	1.38	0.008	0.17	0.14	0.03	0.84	0.541			
	1.022	1.40	0.008	0.14	0.11	0.02	0.83	0.545	1.649	0.14	13.8
21/11/99_14:24:34	0.441	1.56	0.009	0.56	0.53	0.04	0.93	0.605			
	0.673	1.54	0.007	0.23	0.21	0.02	0.92	0.537			
	0.873	1.54	0.006	0.14	0.12	0.01	0.91	0.504			
	1.022	1.55	0.005	0.10	0.09	0.01	0.91	0.502	2.035	0.10	14.4
21/11/99_15:24:31	0.441	1.46	0.012	0.63	0.57	0.06	0.91	0.633			
	0.673	1.46	0.009	0.26	0.23	0.03	0.89	0.525			
	0.873	1.47	0.008	0.16	0.14	0.02	0.88	0.490			
	1.022	1.48	0.007	0.12	0.10	0.01	0.88	0.494	2.008	0.12	12.4
21/11/99_15:34:59	0.441	1.59	0.015	0.64	0.58	0.06	0.91	0.616			
	0.673	1.56	0.012	0.26	0.24	0.03	0.89	0.535			
	0.873	1.56	0.011	0.16	0.14	0.02	0.87	0.502			
	1.022	1.56	0.010	0.12	0.10	0.02	0.86	0.510	1.996	0.12	12.2
24/11/99_15:25:18	0.441	1.48	0.014	1.15	1.05	0.10	0.91	0.705			
	0.673	1.46	0.016	0.62	0.55	0.07	0.88	0.661			
	0.873	1.44	0.018	0.37	0.31	0.06	0.84	0.617			
	1.022	1.43	0.018	0.27	0.22	0.05	0.82	0.590	1.712	0.29	5.4
24/11/99_15:35:40	0.441	1.48	0.014	1.12	1.02	0.10	0.91	0.705			
	0.673	1.46	0.016	0.60	0.53	0.07	0.88	0.658			

	0.873	1.45	0.018	0.37	0.31	0.06	0.84	0.612			
	1.022	1.44	0.018	0.27	0.22	0.05	0.82	0.585	1.685	0.29	5.6
24/11/99_16:23:18	0.441	1.50	0.013	1.11	1.01	0.09	0.92	0.690			
	0.673	1.46	0.013	0.57	0.51	0.06	0.90	0.660			
	0.873	1.45	0.016	0.36	0.31	0.05	0.85	0.621			
	1.022	1.44	0.016	0.26	0.22	0.04	0.83	0.597	1.697	0.28	5.7
25/11/99_10:25:38	0.441	1.39	0.010	0.91	0.84	0.07	0.93	0.736			
	0.673	1.38	0.008	0.43	0.40	0.04	0.92	0.660			
	0.873	1.38	0.008	0.26	0.23	0.03	0.90	0.601			
	1.022	1.38	0.008	0.19	0.17	0.02	0.88	0.571	1.847	0.20	7.4
26/11/99_8:4:10	0.441	1.35	0.008	0.93	0.87	0.06	0.93	0.742			
	0.673	1.36	0.007	0.47	0.43	0.03	0.93	0.665			
	0.873	1.36	0.008	0.28	0.25	0.03	0.90	0.608			
	1.022	1.37	0.009	0.21	0.19	0.03	0.87	0.571	1.756	0.22	7.1
26/11/99_9:23:23	0.441	1.40	0.010	0.86	0.80	0.06	0.93	0.739			
	0.673	1.39	0.008	0.41	0.38	0.03	0.92	0.661			
	0.873	1.39	0.007	0.24	0.22	0.02	0.92	0.595			
	1.022	1.39	0.007	0.18	0.16	0.02	0.90	0.558	1.880	0.19	8.0
26/11/99_9:31:15	0.441	1.42	0.010	0.85	0.80	0.06	0.93	0.733			
	0.673	1.40	0.007	0.40	0.37	0.03	0.94	0.661			
	0.873	1.40	0.007	0.24	0.22	0.02	0.92	0.596			
	1.022	1.41	0.006	0.18	0.17	0.01	0.92	0.558	1.859	0.19	8.1
26/11/99_10:25:56	0.441	1.56	0.008	0.80	0.76	0.04	0.95	0.694			
	0.673	1.47	0.007	0.37	0.35	0.02	0.95	0.663			
	0.873	1.46	0.006	0.22	0.20	0.01	0.94	0.598			
	1.022	1.46	0.006	0.16	0.15	0.01	0.93	0.551	1.936	0.17	8.8
27/11/99_15:36:41	0.441	1.58	0.019	0.41	0.37	0.04	0.89	0.646			
	0.673	1.56	0.016	0.19	0.17	0.03	0.87	0.573			
	0.873	1.56	0.015	0.12	0.10	0.02	0.84	0.531			
	1.022	1.58	0.014	0.09	0.08	0.02	0.83	0.519	1.775	0.10	20.0
2/12/99_14:27:58	0.441	1.38	0.016	0.94	0.81	0.13	0.86	0.659			
	0.673	1.39	0.012	0.42	0.36	0.06	0.85	0.567			
	0.873	1.39	0.011	0.25	0.20	0.04	0.82	0.528			
	1.022	1.39	0.010	0.18	0.14	0.03	0.81	0.519	1.978	0.19	7.4
2/12/99_16:22:18	0.441	1.58	0.020	0.74	0.66	0.08	0.89	0.638			
	0.673	1.54	0.015	0.32	0.28	0.04	0.88	0.569			
	0.873	1.55	0.015	0.20	0.17	0.03	0.85	0.527			
	1.022	1.56	0.015	0.16	0.13	0.03	0.83	0.520	1.837	0.16	9.9
7/12/99_15:29:58	0.441	1.56	0.019	0.98	0.88	0.11	0.89	0.640			
	0.673	1.52	0.015	0.43	0.37	0.05	0.87	0.574			
	0.873	1.52	0.015	0.26	0.22	0.04	0.84	0.535			
	1.022	1.51	0.014	0.19	0.16	0.03	0.83	0.532	1.934	0.20	7.1
8/12/99_15:30:24	0.441	1.60	0.025	0.57	0.50	0.07	0.87	0.627			
	0.673	1.55	0.020	0.24	0.20	0.04	0.84	0.553			
	0.873	1.54	0.018	0.14	0.11	0.03	0.81	0.515			
	1.022	1.55	0.017	0.11	0.09	0.02	0.80	0.512	1.996	0.11	14.0
17/12/99_15:34:26	0.441	1.54	0.020	1.37	1.23	0.14	0.90	0.675			
	0.673	1.49	0.016	0.61	0.54	0.07	0.89	0.609			

	0.873	1.49	0.016	0.36	0.31	0.05	0.86	0.545			
	1.022	1.48	0.015	0.25	0.21	0.04	0.84	0.514	1.991	0.27	4.9
17/12/99_16:24:40	0.441	1.55	0.021	1.25	1.12	0.13	0.89	0.664			
	0.673	1.51	0.014	0.55	0.50	0.06	0.90	0.591			
	0.873	1.51	0.013	0.32	0.28	0.04	0.88	0.528			
	1.022	1.51	0.013	0.23	0.20	0.03	0.86	0.499	1.996	0.25	5.4
17/12/99_16:49:56	0.441	1.56	0.020	1.33	1.19	0.14	0.89	0.629			
	0.673	1.53	0.016	0.59	0.52	0.07	0.88	0.563			
	0.873	1.53	0.017	0.35	0.29	0.05	0.84	0.518			
	1.022	1.53	0.017	0.25	0.21	0.05	0.82	0.499	1.977	0.26	5.1
22/12/99_10:36:53	0.441	1.44	0.042	0.44	0.31	0.13	0.71	0.588			
	0.673	1.43	0.023	0.17	0.13	0.05	0.73	0.528			
	0.873	1.43	0.019	0.11	0.08	0.03	0.72	0.526			
	1.022	1.46	0.017	0.09	0.06	0.02	0.73	0.529	1.961	0.08	20.3
26/12/99_15:38:47	0.441	1.42	0.001	0.57	0.57	0.01	0.99	0.742			
	0.673	1.39	0.001	0.37	0.37	0.00	0.99	0.744			
	0.873	1.39	0.001	0.26	0.26	0.00	0.99	0.711			
	1.022	1.39	0.001	0.20	0.20	0.00	0.99	0.685	1.251	0.21	10.7
26/12/99_16:28:43	0.441	1.47	0.010	0.67	0.62	0.05	0.93	0.727			
	0.673	1.40	0.009	0.43	0.40	0.03	0.93	0.748			
	0.873	1.39	0.010	0.29	0.26	0.02	0.92	0.716			
	1.022	1.39	0.009	0.22	0.20	0.02	0.92	0.687	1.308	0.24	9.1
27/12/99_9:39:15	0.441	1.39	0.005	0.48	0.46	0.02	0.96	0.756			
	0.673	1.38	0.004	0.30	0.29	0.01	0.97	0.732			
	0.873	1.38	0.004	0.20	0.20	0.01	0.96	0.699			
	1.022	1.39	0.004	0.16	0.16	0.01	0.96	0.673	1.290	0.17	13.6
29/12/99_16:30:31	0.441	1.59	0.039	0.67	0.55	0.13	0.81	0.605			
	0.673	1.57	0.022	0.27	0.23	0.05	0.82	0.510			
	0.873	1.58	0.020	0.17	0.13	0.04	0.79	0.489			
	1.022	1.60	0.019	0.13	0.11	0.03	0.78	0.500	1.930	0.13	11.5
2/1/0_15:42:36	0.441	1.33	0.011	0.44	0.38	0.06	0.87	0.631			
	0.673	1.35	0.009	0.20	0.17	0.03	0.84	0.521			
	0.873	1.37	0.009	0.13	0.11	0.02	0.82	0.506			
	1.022	1.39	0.008	0.10	0.09	0.02	0.82	0.518	1.734	0.10	18.4
5/1/0_8:51:44	0.441	1.33	0.014	0.43	0.37	0.06	0.86	0.700			
	0.673	1.35	0.010	0.21	0.18	0.03	0.86	0.602			
	0.873	1.37	0.011	0.14	0.12	0.02	0.83	0.564			
	1.022	1.40	0.012	0.12	0.10	0.02	0.81	0.550	1.517	0.12	18.0
5/1/0_14:44:0	0.441	1.58	0.024	0.52	0.45	0.07	0.87	0.636			
	0.673	1.54	0.016	0.23	0.20	0.03	0.87	0.576			
	0.873	1.53	0.013	0.14	0.12	0.02	0.85	0.543			
	1.022	1.55	0.012	0.11	0.09	0.02	0.85	0.531	1.868	0.11	15.1
5/1/0_16:35:55	0.441	1.59	0.018	0.74	0.66	0.08	0.89	0.631			
	0.673	1.55	0.015	0.34	0.29	0.05	0.86	0.578			
	0.873	1.55	0.016	0.22	0.18	0.04	0.83	0.551			
	1.022	1.57	0.015	0.17	0.14	0.03	0.82	0.544	1.743	0.18	9.5
6/1/0_15:44:21	0.441	1.59	0.028	0.84	0.72	0.12	0.86	0.660			
	0.673	1.52	0.022	0.37	0.31	0.06	0.83	0.604			

	0.873	1.51	0.021	0.23	0.18	0.05	0.79	0.560			
	1.022	1.51	0.019	0.18	0.14	0.04	0.78	0.552	1.863	0.18	8.4
6/1/0_16:36:37	0.441	1.59	0.021	0.70	0.61	0.09	0.87	0.606			
	0.673	1.55	0.019	0.32	0.26	0.05	0.83	0.565			
	0.873	1.55	0.019	0.20	0.16	0.04	0.79	0.551			
	1.022	1.55	0.018	0.16	0.13	0.04	0.78	0.559	1.764	0.16	10.2
6/1/0_17:1:38	0.441	1.57	0.015	0.68	0.61	0.07	0.90	0.612			
	0.673	1.55	0.015	0.31	0.26	0.04	0.86	0.555			
	0.873	1.56	0.017	0.20	0.16	0.04	0.81	0.534			
	1.022	1.57	0.017	0.16	0.13	0.03	0.79	0.539	1.740	0.16	10.6
7/1/0_15:44:48	0.441	1.58	0.020	0.56	0.50	0.06	0.88	0.636			
	0.673	1.54	0.015	0.25	0.21	0.03	0.86	0.571			
	0.873	1.54	0.014	0.16	0.13	0.02	0.84	0.540			
	1.022	1.54	0.013	0.12	0.10	0.02	0.83	0.546	1.832	0.12	13.7
7/1/0_16:37:23	0.441	1.60	0.016	0.57	0.51	0.06	0.90	0.612			
	0.673	1.59	0.012	0.25	0.22	0.03	0.88	0.535			
	0.873	1.60	0.012	0.16	0.14	0.02	0.86	0.504			
	1.022	1.60	0.011	0.12	0.10	0.02	0.85	0.514	1.838	0.12	13.4
8/1/0_14:45:15	0.441	1.59	0.020	0.71	0.63	0.08	0.88	0.642			
	0.673	1.55	0.014	0.32	0.28	0.04	0.87	0.581			
	0.873	1.55	0.013	0.20	0.17	0.03	0.84	0.547			
	1.022	1.55	0.012	0.16	0.13	0.03	0.83	0.548	1.805	0.16	10.1
8/1/0_15:45:13	0.441	1.37	0.011	0.84	0.75	0.09	0.89	0.655			
	0.673	1.38	0.009	0.37	0.32	0.05	0.86	0.546			
	0.873	1.40	0.009	0.24	0.20	0.04	0.84	0.515			
	1.022	1.41	0.008	0.19	0.16	0.03	0.84	0.524	1.796	0.19	8.3
9/1/0_14:45:40	0.441	1.50	0.011	0.89	0.82	0.07	0.92	0.681			
	0.673	1.49	0.010	0.42	0.38	0.04	0.90	0.599			
	0.873	1.49	0.009	0.26	0.23	0.03	0.88	0.548			
	1.022	1.49	0.009	0.20	0.17	0.03	0.87	0.537	1.817	0.20	7.7
9/1/0_15:45:38	0.441	1.41	0.008	0.90	0.83	0.07	0.92	0.681			
	0.673	1.43	0.006	0.43	0.39	0.04	0.92	0.574			
	0.873	1.44	0.006	0.27	0.24	0.03	0.90	0.531			
	1.022	1.45	0.006	0.21	0.19	0.02	0.89	0.531	1.749	0.21	7.5
10/1/0_14:46:4	0.441	1.49	0.015	0.97	0.88	0.09	0.91	0.690			
	0.673	1.47	0.013	0.46	0.41	0.05	0.88	0.620			
	0.873	1.46	0.013	0.27	0.23	0.04	0.85	0.568			
	1.022	1.46	0.012	0.20	0.17	0.03	0.84	0.547	1.864	0.21	6.9
10/1/0_15:46:2	0.441	1.47	0.013	1.03	0.94	0.09	0.91	0.689			
	0.673	1.47	0.010	0.50	0.45	0.05	0.91	0.607			
	0.873	1.48	0.009	0.31	0.27	0.03	0.89	0.549			
	1.022	1.48	0.008	0.23	0.20	0.03	0.89	0.528	1.800	0.24	6.4
10/1/0_16:39:40	0.441	1.38	0.010	1.18	1.08	0.10	0.92	0.714			
	0.673	1.40	0.008	0.58	0.53	0.05	0.91	0.608			
	0.873	1.41	0.008	0.35	0.32	0.04	0.89	0.544			
	1.022	1.42	0.008	0.27	0.24	0.03	0.88	0.519	1.769	0.28	5.5
18/1/0_9:54:15	0.441	1.43	0.020	0.41	0.36	0.05	0.88	0.720			
	0.673	1.40	0.011	0.18	0.16	0.02	0.89	0.641			

	0.873	1.41	0.010	0.12	0.10	0.01	0.88	0.583			
	1.022	1.41	0.010	0.09	0.07	0.01	0.86	0.560	1.861	0.09	20.4
18/1/0_15:49:3	0.441	1.59	0.018	0.51	0.46	0.05	0.90	0.624			
	0.673	1.56	0.012	0.22	0.20	0.02	0.89	0.552			
	0.873	1.56	0.011	0.14	0.12	0.02	0.87	0.522			
	1.022	1.57	0.010	0.11	0.09	0.01	0.87	0.524	1.858	0.11	15.6
18/1/0_15:59:29	0.441	1.49	0.019	0.51	0.44	0.07	0.87	0.625			
	0.673	1.48	0.011	0.22	0.19	0.03	0.87	0.553			
	0.873	1.49	0.010	0.14	0.12	0.02	0.85	0.536			
	1.022	1.51	0.009	0.11	0.10	0.02	0.86	0.538	1.815	0.11	15.7
21/1/0_14:50:2	0.441	1.37	0.013	0.58	0.49	0.08	0.85	0.600			
	0.673	1.39	0.010	0.26	0.21	0.04	0.83	0.515			
	0.873	1.40	0.009	0.16	0.13	0.03	0.81	0.519			
	1.022	1.42	0.008	0.13	0.11	0.02	0.82	0.536	1.789	0.13	13.2
21/1/0_15:49:58	0.441	1.58	0.019	0.63	0.55	0.08	0.88	0.613			
	0.673	1.57	0.015	0.28	0.24	0.04	0.84	0.539			
	0.873	1.59	0.014	0.19	0.16	0.03	0.82	0.528			
	1.022	1.60	0.013	0.16	0.13	0.03	0.82	0.547	1.681	0.15	11.6
21/1/0_16:0:25	0.441	1.59	0.020	0.63	0.55	0.08	0.88	0.609			
	0.673	1.59	0.015	0.29	0.25	0.04	0.85	0.529			
	0.873	1.60	0.015	0.19	0.16	0.03	0.82	0.520			
	1.022	1.60	0.014	0.15	0.13	0.03	0.82	0.545	1.707	0.15	11.5
22/1/0_14:50:20	0.441	1.57	0.016	0.71	0.64	0.07	0.90	0.638			
	0.673	1.55	0.011	0.32	0.28	0.04	0.88	0.569			
	0.873	1.56	0.009	0.21	0.18	0.03	0.87	0.535			
	1.022	1.56	0.008	0.16	0.14	0.02	0.87	0.541	1.776	0.16	10.1
22/1/0_15:50:15	0.441	1.49	0.016	0.59	0.52	0.07	0.87	0.638			
	0.673	1.48	0.012	0.27	0.23	0.04	0.85	0.570			
	0.873	1.49	0.011	0.18	0.15	0.03	0.83	0.557			
	1.022	1.51	0.010	0.15	0.12	0.02	0.84	0.565	1.675	0.15	12.6
22/1/0_16:0:44	0.441	1.52	0.016	0.56	0.49	0.07	0.88	0.633			
	0.673	1.51	0.012	0.26	0.22	0.04	0.86	0.569			
	0.873	1.52	0.011	0.17	0.14	0.03	0.84	0.562			
	1.022	1.54	0.010	0.14	0.12	0.02	0.84	0.570	1.634	0.14	13.3
23/1/0_17:14:27	0.441	1.60	0.023	0.57	0.50	0.08	0.87	0.581			
	0.673	1.58	0.014	0.23	0.20	0.03	0.86	0.507			
	0.873	1.59	0.014	0.15	0.12	0.03	0.83	0.502			
	1.022	1.59	0.013	0.12	0.10	0.02	0.82	0.527	1.905	0.12	13.9
24/1/0_15:50:50	0.441	1.59	0.012	0.51	0.47	0.04	0.92	0.627			
	0.673	1.56	0.009	0.22	0.20	0.02	0.90	0.553			
	0.873	1.56	0.008	0.14	0.12	0.02	0.89	0.525			
	1.022	1.57	0.007	0.11	0.10	0.01	0.89	0.533	1.855	0.11	15.6
24/1/0_16:1:18	0.441	1.59	0.014	0.53	0.48	0.05	0.91	0.625			
	0.673	1.56	0.010	0.23	0.21	0.02	0.90	0.552			
	0.873	1.56	0.009	0.14	0.13	0.02	0.88	0.525			
	1.022	1.57	0.008	0.11	0.10	0.01	0.89	0.529	1.865	0.11	15.0
24/1/0_16:51:13	0.441	1.59	0.020	0.74	0.65	0.09	0.88	0.604			
	0.673	1.55	0.015	0.31	0.26	0.05	0.85	0.544			

	0.873	1.55	0.015	0.19	0.16	0.04	0.82	0.531			
	1.022	1.56	0.014	0.15	0.13	0.03	0.81	0.542	1.874	0.15	10.1
27/1/0_8:25:17	0.441	1.38	0.011	0.40	0.36	0.04	0.90	0.703			
	0.673	1.40	0.010	0.20	0.18	0.02	0.88	0.603			
	0.873	1.41	0.012	0.13	0.11	0.02	0.83	0.558			
	1.022	1.43	0.013	0.11	0.09	0.02	0.81	0.544	1.598	0.11	19.5
27/1/0_8:49:9	0.441	1.35	0.011	0.41	0.36	0.04	0.89	0.708			
	0.673	1.36	0.009	0.19	0.17	0.02	0.87	0.609			
	0.873	1.37	0.010	0.13	0.11	0.02	0.84	0.568			
	1.022	1.39	0.011	0.10	0.09	0.02	0.82	0.556	1.633	0.10	19.9
27/1/0_9:42:9	0.441	1.49	0.016	0.41	0.36	0.04	0.89	0.693			
	0.673	1.47	0.010	0.19	0.17	0.02	0.89	0.611			
	0.873	1.47	0.009	0.12	0.11	0.01	0.88	0.566			
	1.022	1.48	0.009	0.10	0.08	0.01	0.87	0.556	1.746	0.10	20.3
28/1/0_8:24:57	0.441	1.59	0.027	0.41	0.35	0.06	0.85	0.654			
	0.673	1.54	0.022	0.20	0.16	0.04	0.82	0.604			
	0.873	1.54	0.025	0.14	0.11	0.03	0.77	0.579			
	1.022	1.57	0.027	0.12	0.09	0.03	0.75	0.571	1.537	0.11	19.1
28/1/0_14:51:46	0.441	1.53	0.019	1.17	1.04	0.14	0.88	0.670			
	0.673	1.51	0.016	0.57	0.49	0.08	0.86	0.605			
	0.873	1.50	0.015	0.35	0.29	0.06	0.83	0.565			
	1.022	1.50	0.013	0.27	0.22	0.05	0.83	0.557	1.771	0.28	5.5
28/1/0_16:54:28	0.441	1.48	0.014	1.49	1.34	0.15	0.90	0.644			
	0.673	1.50	0.014	0.74	0.64	0.10	0.86	0.561			
	0.873	1.50	0.016	0.46	0.38	0.08	0.82	0.535			
	1.022	1.50	0.016	0.36	0.29	0.07	0.80	0.539	1.704	0.37	4.2
29/1/0_9:40:56	0.441	1.59	0.016	0.55	0.50	0.05	0.91	0.670			
	0.673	1.53	0.013	0.26	0.23	0.03	0.89	0.616			
	0.873	1.53	0.012	0.16	0.14	0.02	0.87	0.562			
	1.022	1.54	0.012	0.13	0.11	0.02	0.85	0.544	1.749	0.13	13.7
29/1/0_9:51:58	0.441	1.59	0.016	0.55	0.50	0.05	0.91	0.671			
	0.673	1.53	0.012	0.26	0.23	0.03	0.90	0.614			
	0.873	1.53	0.012	0.16	0.14	0.02	0.87	0.558			
	1.022	1.55	0.012	0.13	0.11	0.02	0.86	0.534	1.751	0.13	13.7
30/1/0_9:40:20	0.441	1.40	0.005	0.50	0.48	0.02	0.96	0.733			
	0.673	1.40	0.005	0.24	0.23	0.01	0.94	0.643			
	0.873	1.40	0.004	0.14	0.13	0.01	0.94	0.578			
	1.022	1.41	0.004	0.11	0.10	0.01	0.93	0.549	1.818	0.11	15.3
30/1/0_9:52:10	0.441	1.57	0.007	0.49	0.47	0.02	0.95	0.692			
	0.673	1.50	0.006	0.23	0.22	0.01	0.95	0.646			
	0.873	1.49	0.006	0.14	0.13	0.01	0.93	0.584			
	1.022	1.50	0.006	0.11	0.10	0.01	0.93	0.544	1.828	0.11	15.9
4/2/0_8:22:11	0.441	1.33	0.009	0.48	0.44	0.04	0.91	0.751			
	0.673	1.34	0.007	0.27	0.24	0.02	0.91	0.689			
	0.873	1.36	0.007	0.19	0.17	0.02	0.90	0.651			
	1.022	1.37	0.008	0.15	0.13	0.02	0.88	0.636	1.388	0.15	14.4
4/2/0_8:45:30	0.441	1.33	0.012	0.52	0.46	0.06	0.89	0.749			
	0.673	1.34	0.009	0.28	0.25	0.03	0.90	0.680			

	0.873	1.36	0.009	0.19	0.17	0.02	0.89	0.637			
	1.022	1.37	0.010	0.15	0.13	0.02	0.87	0.619	1.437	0.16	13.5
4/2/0_10:52:57	0.441	1.56	0.020	0.84	0.75	0.09	0.89	0.695			
	0.673	1.45	0.014	0.42	0.37	0.04	0.89	0.686			
	0.873	1.43	0.013	0.26	0.23	0.03	0.88	0.646			
	1.022	1.43	0.012	0.20	0.17	0.03	0.87	0.618	1.727	0.21	8.0
4/2/0_14:52:56	0.441	1.54	0.014	1.16	1.05	0.10	0.91	0.677			
	0.673	1.48	0.011	0.57	0.52	0.06	0.90	0.650			
	0.873	1.47	0.010	0.36	0.32	0.04	0.89	0.613			
	1.022	1.47	0.009	0.28	0.25	0.03	0.88	0.594	1.704	0.29	5.5
4/2/0_16:8:43	0.441	1.50	0.014	1.43	1.29	0.14	0.90	0.686			
	0.673	1.48	0.011	0.72	0.65	0.07	0.90	0.631			
	0.873	1.48	0.011	0.47	0.41	0.06	0.88	0.594			
	1.022	1.48	0.010	0.36	0.32	0.05	0.87	0.582	1.633	0.38	4.3
5/2/0_15:53:1	0.441	1.46	0.009	1.14	1.07	0.08	0.93	0.699			
	0.673	1.46	0.008	0.60	0.56	0.05	0.92	0.638			
	0.873	1.46	0.008	0.39	0.35	0.04	0.91	0.599			
	1.022	1.45	0.008	0.29	0.26	0.03	0.89	0.587	1.640	0.30	5.4
5/2/0_16:9:42	0.441	1.46	0.009	1.18	1.10	0.08	0.93	0.696			
	0.673	1.46	0.008	0.61	0.57	0.05	0.92	0.634			
	0.873	1.47	0.008	0.40	0.36	0.04	0.91	0.589			
	1.022	1.47	0.007	0.30	0.27	0.03	0.91	0.571	1.631	0.31	5.3
9/2/0_16:13:30	0.441	1.59	0.033	0.64	0.53	0.11	0.83	0.633			
	0.673	1.50	0.027	0.28	0.23	0.06	0.80	0.614			
	0.873	1.48	0.023	0.17	0.13	0.04	0.77	0.592			
	1.022	1.48	0.020	0.13	0.10	0.03	0.77	0.583	1.879	0.14	11.7
11/2/0_15:53:27	0.441	1.56	0.022	0.58	0.50	0.08	0.86	0.620			
	0.673	1.55	0.018	0.26	0.22	0.04	0.83	0.542			
	0.873	1.56	0.016	0.17	0.14	0.03	0.81	0.528			
	1.022	1.57	0.014	0.14	0.11	0.03	0.81	0.542	1.744	0.14	12.9
12/2/0_15:53:27	0.441	1.45	0.016	0.96	0.84	0.12	0.87	0.643			
	0.673	1.46	0.012	0.45	0.38	0.06	0.86	0.554			
	0.873	1.48	0.011	0.30	0.25	0.05	0.84	0.535			
	1.022	1.49	0.010	0.24	0.20	0.04	0.84	0.548	1.682	0.24	7.0
12/2/0_17:6:3	0.441	1.33	0.009	0.97	0.86	0.11	0.89	0.647			
	0.673	1.36	0.008	0.47	0.40	0.06	0.86	0.526			
	0.873	1.39	0.009	0.32	0.26	0.06	0.83	0.502			
	1.022	1.42	0.009	0.26	0.22	0.05	0.82	0.510	1.564	0.26	6.7
13/2/0_16:17:1	0.441	1.35	0.011	0.67	0.58	0.09	0.86	0.639			
	0.673	1.37	0.010	0.33	0.27	0.06	0.83	0.568			
	0.873	1.39	0.009	0.22	0.18	0.04	0.82	0.560			
	1.022	1.41	0.008	0.18	0.15	0.03	0.83	0.569	1.576	0.18	10.3
17/2/0_9:53:23	0.441	1.42	0.016	0.41	0.35	0.06	0.85	0.637			
	0.673	1.43	0.008	0.19	0.17	0.02	0.87	0.579			
	0.873	1.45	0.007	0.13	0.11	0.02	0.87	0.562			
	1.022	1.47	0.007	0.11	0.09	0.01	0.87	0.566	1.607	0.11	19.8
18/2/0_9:53:16	0.441	1.59	0.032	0.67	0.57	0.11	0.84	0.671			
	0.673	1.53	0.018	0.31	0.27	0.05	0.85	0.611			

	0.873	1.53	0.016	0.20	0.17	0.03	0.83	0.566			
	1.022	1.54	0.015	0.16	0.13	0.03	0.83	0.554	1.711	0.16	10.6
19/3/0_16:11:38	0.441	1.59	0.015	0.72	0.64	0.08	0.89	0.633			
	0.673	1.56	0.011	0.34	0.30	0.04	0.87	0.587			
	0.873	1.57	0.010	0.24	0.20	0.03	0.86	0.576			
	1.022	1.58	0.009	0.20	0.17	0.03	0.86	0.584	1.559	0.19	9.6
31/3/0_7:38:27	0.441	1.35	0.014	0.52	0.45	0.07	0.87	0.693			
	0.673	1.37	0.011	0.25	0.21	0.03	0.86	0.570			
	0.873	1.39	0.013	0.16	0.13	0.03	0.82	0.523			
	1.022	1.41	0.014	0.13	0.10	0.03	0.79	0.516	1.640	0.13	14.4
31/3/0_8:44:26	0.441	1.53	0.024	0.53	0.46	0.07	0.86	0.673			
	0.673	1.50	0.016	0.24	0.20	0.04	0.85	0.587			
	0.873	1.51	0.014	0.15	0.13	0.03	0.84	0.542			
	1.022	1.53	0.014	0.12	0.10	0.02	0.82	0.535	1.751	0.12	14.6
6/4/0_8:39:29	0.441	1.33	0.015	0.44	0.37	0.07	0.84	0.691			
	0.673	1.36	0.009	0.22	0.19	0.03	0.87	0.594			
	0.873	1.38	0.009	0.15	0.13	0.02	0.85	0.566			
	1.022	1.41	0.009	0.13	0.11	0.02	0.84	0.558	1.483	0.13	17.2
7/4/0_16:17:35	0.441	1.33	0.007	0.60	0.54	0.06	0.90	0.683			
	0.673	1.35	0.006	0.32	0.28	0.04	0.88	0.610			
	0.873	1.37	0.006	0.24	0.21	0.03	0.87	0.613			
	1.022	1.38	0.007	0.21	0.18	0.03	0.86	0.638	1.294	0.20	11.1
7/4/0_16:43:11	0.441	1.55	0.012	1.39	1.27	0.11	0.92	0.616			
	0.673	1.55	0.010	0.62	0.56	0.06	0.90	0.537			
	0.873	1.57	0.010	0.39	0.35	0.05	0.88	0.506			
	1.022	1.58	0.010	0.31	0.26	0.04	0.87	0.510	1.807	0.31	4.7
14/4/0_8:59:7	0.441	1.53	0.016	0.61	0.55	0.06	0.90	0.666			
	0.673	1.53	0.013	0.30	0.27	0.03	0.89	0.587			
	0.873	1.55	0.014	0.19	0.17	0.03	0.87	0.534			
	1.022	1.56	0.014	0.14	0.12	0.02	0.85	0.511	1.704	0.15	11.7
16/4/0_7:26:11	0.441	1.33	0.010	0.36	0.31	0.04	0.88	0.711			
	0.673	1.35	0.008	0.18	0.16	0.02	0.87	0.612			
	0.873	1.37	0.010	0.13	0.11	0.02	0.83	0.580			
	1.022	1.40	0.011	0.11	0.09	0.02	0.81	0.573	1.417	0.11	22.6
22/4/0_7:43:41	0.441	1.34	0.012	0.22	0.18	0.03	0.84	0.739			
	0.673	1.36	0.010	0.13	0.11	0.02	0.84	0.680			
	0.873	1.38	0.011	0.11	0.09	0.02	0.83	0.680			
	1.022	1.40	0.011	0.10	0.08	0.02	0.83	0.689	0.914	0.10	40.6
22/4/0_8:28:31	0.441	1.60	0.011	0.45	0.41	0.04	0.92	0.648			
	0.673	1.60	0.008	0.23	0.21	0.02	0.92	0.582			
	0.873	1.60	0.008	0.15	0.14	0.02	0.90	0.546			
	1.022	1.60	0.008	0.13	0.11	0.01	0.89	0.549	1.534	0.13	16.5
23/4/0_7:21:44	0.441	1.46	0.042	0.74	0.58	0.16	0.78	0.675			
	0.673	1.45	0.020	0.32	0.26	0.06	0.82	0.564			
	0.873	1.48	0.021	0.21	0.16	0.05	0.78	0.509			
	1.022	1.52	0.021	0.17	0.13	0.04	0.77	0.490	1.754	0.17	9.8
23/4/0_7:43:8	0.441	1.33	0.013	0.37	0.31	0.05	0.86	0.708			
	0.673	1.35	0.009	0.19	0.16	0.03	0.86	0.615			

	0.873	1.38	0.010	0.14	0.11	0.02	0.83	0.582			
	1.022	1.41	0.011	0.12	0.10	0.02	0.82	0.576	1.369	0.12	21.5
24/4/0_8:27:26	0.441	1.33	0.014	0.35	0.30	0.06	0.84	0.694			
	0.673	1.35	0.010	0.18	0.15	0.03	0.84	0.602			
	0.873	1.38	0.012	0.14	0.11	0.03	0.80	0.583			
	1.022	1.42	0.013	0.12	0.10	0.03	0.79	0.579	1.297	0.12	22.4
25/4/0_7:20:35	0.441	1.33	0.017	0.43	0.35	0.08	0.82	0.759			
	0.673	1.35	0.011	0.25	0.21	0.04	0.83	0.685			
	0.873	1.38	0.012	0.20	0.16	0.04	0.82	0.650			
	1.022	1.41	0.013	0.18	0.15	0.03	0.81	0.641	1.049	0.18	15.8
25/4/0_7:41:59	0.441	1.38	0.022	0.50	0.41	0.09	0.81	0.728			
	0.673	1.39	0.013	0.27	0.22	0.05	0.83	0.645			
	0.873	1.42	0.013	0.21	0.17	0.04	0.82	0.616			
	1.022	1.44	0.013	0.18	0.15	0.03	0.82	0.623	1.213	0.18	13.7
25/4/0_8:26:54	0.441	1.33	0.010	0.56	0.50	0.06	0.88	0.723			
	0.673	1.35	0.008	0.30	0.26	0.04	0.88	0.631			
	0.873	1.38	0.009	0.22	0.19	0.03	0.85	0.593			
	1.022	1.41	0.010	0.19	0.16	0.03	0.84	0.584	1.303	0.19	12.1
26/4/0_7:20:3	0.441	1.35	0.011	0.64	0.57	0.07	0.90	0.727			
	0.673	1.37	0.008	0.32	0.28	0.03	0.89	0.614			
	0.873	1.40	0.009	0.22	0.19	0.03	0.87	0.550			
	1.022	1.42	0.010	0.18	0.15	0.03	0.85	0.534	1.517	0.18	10.8
26/4/0_7:41:27	0.441	1.34	0.013	0.46	0.40	0.06	0.87	0.737			
	0.673	1.36	0.011	0.25	0.21	0.04	0.85	0.643			
	0.873	1.39	0.012	0.18	0.15	0.03	0.83	0.597			
	1.022	1.42	0.013	0.16	0.13	0.03	0.82	0.585	1.282	0.16	15.6
26/4/0_8:26:23	0.441	1.35	0.014	0.43	0.37	0.06	0.86	0.754			
	0.673	1.37	0.011	0.25	0.21	0.04	0.86	0.678			
	0.873	1.39	0.012	0.18	0.15	0.03	0.83	0.640			
	1.022	1.42	0.013	0.16	0.13	0.03	0.82	0.622	1.187	0.16	16.3
28/4/0_7:40:23	0.441	1.37	0.009	0.89	0.83	0.06	0.93	0.755			
	0.673	1.37	0.008	0.47	0.43	0.04	0.92	0.686			
	0.873	1.39	0.009	0.32	0.29	0.03	0.90	0.628			
	1.022	1.41	0.010	0.26	0.23	0.03	0.88	0.595	1.483	0.26	7.1
29/4/0_8:24:57	0.441	1.34	0.009	0.57	0.52	0.05	0.92	0.761			
	0.673	1.35	0.008	0.30	0.28	0.03	0.91	0.685			
	0.873	1.37	0.009	0.21	0.19	0.02	0.88	0.633			
	1.022	1.39	0.010	0.17	0.15	0.02	0.87	0.605	1.415	0.18	12.0
29/4/0_16:47:38	0.441	1.40	0.012	0.40	0.36	0.04	0.89	0.709			
	0.673	1.40	0.011	0.20	0.17	0.03	0.86	0.628			
	0.873	1.42	0.012	0.14	0.12	0.02	0.83	0.592			
	1.022	1.44	0.013	0.12	0.10	0.02	0.82	0.588	1.451	0.12	19.5
30/4/0_8:24:30	0.441	1.33	0.009	0.55	0.50	0.06	0.90	0.677			
	0.673	1.34	0.008	0.24	0.21	0.03	0.87	0.574			
	0.873	1.36	0.010	0.16	0.13	0.03	0.82	0.512			
	1.022	1.38	0.011	0.13	0.10	0.03	0.79	0.489	1.773	0.13	13.9
1/5/0_7:38:56	0.441	1.33	0.010	0.73	0.66	0.07	0.90	0.709			
	0.673	1.34	0.009	0.33	0.29	0.04	0.87	0.594			

	0.873	1.36	0.010	0.22	0.18	0.04	0.84	0.530			
	1.022	1.38	0.011	0.17	0.14	0.03	0.81	0.507	1.730	0.17	9.7
1/5/0_8:24:3	0.441	1.35	0.010	0.51	0.46	0.05	0.91	0.728			
	0.673	1.36	0.009	0.25	0.22	0.03	0.88	0.625			
	0.873	1.38	0.010	0.16	0.14	0.02	0.85	0.563			
	1.022	1.40	0.011	0.13	0.11	0.02	0.83	0.542	1.606	0.13	14.6
4/7/0_8:23:55	0.441	1.59	0.027	0.89	0.78	0.12	0.87	0.650			
	0.673	1.52	0.021	0.39	0.33	0.06	0.85	0.587			
	0.873	1.53	0.022	0.25	0.20	0.04	0.82	0.539			
	1.022	1.55	0.024	0.20	0.16	0.04	0.80	0.520	1.817	0.20	7.9
5/7/0_8:24:9	0.441	1.45	0.026	0.77	0.66	0.11	0.86	0.715			
	0.673	1.44	0.017	0.37	0.32	0.05	0.87	0.626			
	0.873	1.45	0.018	0.24	0.20	0.04	0.84	0.561			
	1.022	1.48	0.019	0.19	0.16	0.03	0.82	0.525	1.675	0.19	8.8
9/12/0_14:31:19	0.441	1.43	0.028	0.78	0.64	0.13	0.83	0.702			
	0.673	1.42	0.019	0.35	0.29	0.07	0.81	0.603			
	0.873	1.43	0.020	0.23	0.17	0.05	0.77	0.545			
	1.022	1.45	0.022	0.19	0.14	0.05	0.73	0.528	1.726	0.18	9.1
19/12/0_13:36:1	0.441	1.40	0.014	0.32	0.29	0.04	0.89	0.718			
	0.673	1.40	0.011	0.15	0.13	0.02	0.87	0.621			
	0.873	1.42	0.013	0.10	0.09	0.02	0.83	0.565			
	1.022	1.45	0.014	0.09	0.07	0.02	0.81	0.542	1.580	0.09	27.7
22/12/0_11:37:30	0.441	1.33	0.012	0.22	0.19	0.04	0.84	0.710			
	0.673	1.35	0.010	0.12	0.10	0.02	0.81	0.625			
	0.873	1.37	0.011	0.09	0.07	0.02	0.79	0.622			
	1.022	1.39	0.012	0.08	0.06	0.02	0.77	0.641	1.198	0.08	42.7
12/1/1_10:46:55	0.441	1.59	0.022	0.89	0.80	0.09	0.90	0.661			
	0.673	1.53	0.017	0.40	0.36	0.04	0.89	0.596			
	0.873	1.54	0.018	0.24	0.21	0.03	0.86	0.527			
	1.022	1.57	0.019	0.18	0.16	0.03	0.85	0.483	1.879	0.19	7.9
25/1/1_10:51:50	0.441	1.48	0.014	1.38	1.24	0.14	0.90	0.654			
	0.673	1.47	0.012	0.73	0.65	0.08	0.89	0.616			
	0.873	1.47	0.013	0.50	0.43	0.06	0.87	0.611			
	1.022	1.49	0.014	0.42	0.36	0.06	0.86	0.604	1.447	0.42	4.3
7/2/1_9:53:25	0.441	1.48	0.016	0.90	0.82	0.09	0.90	0.650			
	0.673	1.46	0.014	0.38	0.33	0.05	0.88	0.559			
	0.873	1.46	0.014	0.21	0.18	0.03	0.84	0.504			
	1.022	1.48	0.015	0.16	0.13	0.03	0.82	0.475	2.057	0.17	8.1
18/2/1_9:53:3	0.441	1.36	0.009	0.62	0.56	0.05	0.92	0.722			
	0.673	1.37	0.008	0.38	0.35	0.03	0.92	0.698			
	0.873	1.38	0.009	0.27	0.25	0.03	0.91	0.686			
	1.022	1.40	0.010	0.23	0.21	0.02	0.90	0.672	1.174	0.24	10.0
25/3/1_8:50:13	0.441	1.39	0.010	0.33	0.30	0.03	0.90	0.733			
	0.673	1.40	0.009	0.18	0.16	0.02	0.87	0.651			
	0.873	1.41	0.010	0.13	0.11	0.02	0.85	0.616			
	1.022	1.43	0.010	0.11	0.09	0.02	0.84	0.610	1.369	0.11	24.1
25/3/1_9:16:17	0.441	1.42	0.012	0.76	0.69	0.07	0.91	0.676			
	0.673	1.42	0.010	0.33	0.29	0.04	0.88	0.565			

	0.873	1.43	0.011	0.20	0.17	0.03	0.84	0.514			
	1.022	1.45	0.011	0.16	0.13	0.03	0.83	0.498	1.891	0.16	9.5
26/3/1_8:49:16	0.441	1.58	0.014	1.30	1.21	0.09	0.93	0.647			
	0.673	1.56	0.013	0.61	0.56	0.05	0.92	0.574			
	0.873	1.57	0.016	0.37	0.32	0.04	0.88	0.513			
	1.022	1.59	0.018	0.28	0.23	0.04	0.85	0.477	1.848	0.29	5.0
26/3/1_9:15:20	0.441	1.41	0.013	0.78	0.71	0.07	0.91	0.705			
	0.673	1.42	0.011	0.37	0.33	0.04	0.89	0.604			
	0.873	1.44	0.012	0.23	0.20	0.03	0.86	0.537			
	1.022	1.46	0.013	0.18	0.15	0.03	0.84	0.502	1.745	0.19	8.8
31/3/1_16:14:55	0.441	1.59	0.023	1.46	1.28	0.18	0.88	0.589			
	0.673	1.55	0.019	0.55	0.46	0.09	0.83	0.498			
	0.873	1.56	0.020	0.34	0.26	0.07	0.78	0.475			
	1.022	1.59	0.021	0.27	0.20	0.06	0.76	0.479	2.043	0.26	4.9
9/4/1_16:18:9	0.441	1.54	0.026	0.45	0.38	0.08	0.83	0.628			
	0.673	1.51	0.018	0.21	0.17	0.04	0.80	0.575			
	0.873	1.52	0.018	0.15	0.11	0.03	0.78	0.582			
	1.022	1.54	0.019	0.13	0.10	0.03	0.76	0.598	1.530	0.12	17.3
11/4/1_8:35:44	0.441	1.39	0.011	0.54	0.48	0.05	0.90	0.656			
	0.673	1.40	0.010	0.24	0.21	0.03	0.87	0.535			
	0.873	1.41	0.011	0.15	0.12	0.03	0.83	0.503			
	1.022	1.43	0.012	0.12	0.10	0.02	0.80	0.507	1.807	0.12	14.5
11/4/1_9:1:20	0.441	1.43	0.016	0.66	0.58	0.08	0.88	0.647			
	0.673	1.43	0.012	0.28	0.24	0.04	0.86	0.527			
	0.873	1.44	0.013	0.17	0.14	0.03	0.81	0.492			
	1.022	1.46	0.015	0.14	0.11	0.03	0.77	0.494	1.897	0.14	11.6
12/4/1_8:35:0	0.441	1.41	0.017	0.25	0.21	0.04	0.84	0.710			
	0.673	1.41	0.014	0.14	0.11	0.03	0.82	0.649			
	0.873	1.43	0.014	0.11	0.09	0.02	0.81	0.644			
	1.022	1.45	0.015	0.10	0.08	0.02	0.81	0.655	1.120	0.10	34.5
12/4/1_9:0:34	0.441	1.36	0.015	0.52	0.44	0.07	0.86	0.674			
	0.673	1.38	0.012	0.25	0.21	0.04	0.84	0.561			
	0.873	1.40	0.013	0.17	0.13	0.03	0.80	0.530			
	1.022	1.43	0.013	0.14	0.11	0.03	0.79	0.527	1.592	0.14	14.4
12/4/1_16:17:49	0.441	1.40	0.013	1.27	1.12	0.15	0.88	0.638			
	0.673	1.41	0.011	0.55	0.47	0.08	0.86	0.529			
	0.873	1.43	0.013	0.36	0.29	0.07	0.80	0.501			
	1.022	1.46	0.014	0.30	0.23	0.06	0.78	0.500	1.750	0.29	5.3
12/4/1_16:43:23	0.441	1.46	0.021	1.59	1.37	0.22	0.86	0.635			
	0.673	1.46	0.016	0.66	0.55	0.11	0.83	0.519			
	0.873	1.48	0.018	0.42	0.33	0.09	0.78	0.477			
	1.022	1.51	0.020	0.34	0.25	0.09	0.74	0.472	1.867	0.33	4.2
14/4/1_8:33:31	0.441	1.54	0.041	1.19	0.97	0.22	0.81	0.682			
	0.673	1.51	0.024	0.60	0.51	0.09	0.85	0.616			
	0.873	1.53	0.024	0.40	0.34	0.07	0.83	0.566			
	1.022	1.56	0.025	0.32	0.27	0.06	0.82	0.535	1.556	0.33	5.3
19/4/1_8:30:12	0.441	1.55	0.041	1.08	0.88	0.20	0.81	0.679			
	0.673	1.51	0.025	0.56	0.47	0.09	0.85	0.626			

	0.873	1.52	0.025	0.37	0.30	0.06	0.82	0.581			
	1.022	1.54	0.026	0.29	0.23	0.06	0.81	0.553	1.567	0.30	5.8
20/4/1_8:29:36	0.441	1.36	0.008	0.46	0.43	0.04	0.92	0.717			
	0.673	1.37	0.008	0.23	0.20	0.02	0.90	0.627			
	0.873	1.38	0.010	0.15	0.13	0.02	0.86	0.579			
	1.022	1.40	0.011	0.12	0.10	0.02	0.84	0.558	1.621	0.12	16.4
20/4/1_8:55:11	0.441	1.34	0.010	0.54	0.48	0.05	0.91	0.721			
	0.673	1.35	0.008	0.26	0.23	0.03	0.90	0.629			
	0.873	1.36	0.009	0.17	0.14	0.02	0.86	0.581			
	1.022	1.37	0.009	0.13	0.11	0.02	0.85	0.562	1.696	0.13	13.8
21/4/1_8:28:58	0.441	1.45	0.014	0.68	0.62	0.06	0.91	0.686			
	0.673	1.44	0.012	0.30	0.27	0.03	0.89	0.591			
	0.873	1.44	0.012	0.18	0.15	0.03	0.86	0.533			
	1.022	1.46	0.013	0.14	0.12	0.02	0.83	0.507	1.908	0.14	10.8
21/4/1_8:54:33	0.441	1.48	0.015	0.86	0.79	0.08	0.91	0.680			
	0.673	1.47	0.013	0.39	0.35	0.04	0.89	0.590			
	0.873	1.47	0.013	0.23	0.20	0.03	0.86	0.531			
	1.022	1.49	0.014	0.18	0.15	0.03	0.84	0.498	1.903	0.18	8.1
22/4/1_8:53:56	0.441	1.39	0.009	0.60	0.55	0.04	0.93	0.729			
	0.673	1.40	0.009	0.30	0.27	0.03	0.90	0.643			
	0.873	1.41	0.010	0.19	0.16	0.02	0.87	0.585			
	1.022	1.42	0.011	0.14	0.12	0.02	0.84	0.553	1.693	0.15	11.9
23/4/1_8:27:47	0.441	1.38	0.011	0.54	0.49	0.05	0.91	0.701			
	0.673	1.39	0.010	0.24	0.22	0.03	0.89	0.585			
	0.873	1.39	0.011	0.14	0.12	0.02	0.85	0.518			
	1.022	1.41	0.012	0.11	0.09	0.02	0.82	0.489	1.898	0.11	14.5
23/4/1_8:53:26	0.441	1.40	0.013	0.59	0.53	0.06	0.91	0.699			
	0.673	1.40	0.012	0.26	0.23	0.03	0.88	0.588			
	0.873	1.41	0.013	0.16	0.13	0.03	0.84	0.519			
	1.022	1.42	0.014	0.12	0.10	0.02	0.81	0.491	1.907	0.12	13.0
1/5/1_8:49:34	0.441	1.41	0.013	0.66	0.60	0.05	0.92	0.758			
	0.673	1.41	0.012	0.35	0.32	0.03	0.91	0.683			
	0.873	1.42	0.013	0.22	0.20	0.03	0.89	0.613			
	1.022	1.43	0.014	0.17	0.15	0.02	0.86	0.566	1.617	0.18	10.2
4/5/1_8:22:38	0.441	1.45	0.010	0.58	0.55	0.04	0.94	0.729			
	0.673	1.44	0.010	0.28	0.26	0.02	0.92	0.644			
	0.873	1.44	0.012	0.17	0.15	0.02	0.88	0.569			
	1.022	1.45	0.013	0.13	0.11	0.02	0.86	0.526	1.808	0.13	12.5
21/5/1_8:18:37	0.441	1.39	0.010	0.65	0.60	0.05	0.93	0.717			
	0.673	1.40	0.009	0.30	0.27	0.03	0.91	0.606			
	0.873	1.40	0.010	0.18	0.15	0.02	0.87	0.533			
	1.022	1.42	0.011	0.14	0.12	0.02	0.85	0.496	1.872	0.14	11.3
21/5/1_8:44:47	0.441	1.41	0.011	0.69	0.64	0.05	0.92	0.713			
	0.673	1.41	0.010	0.32	0.29	0.03	0.91	0.609			
	0.873	1.42	0.011	0.19	0.17	0.02	0.87	0.534			
	1.022	1.43	0.012	0.14	0.12	0.02	0.85	0.496	1.893	0.15	10.5
17/8/1_8:57:57	0.441	1.36	0.008	0.51	0.47	0.04	0.93	0.744			
	0.673	1.37	0.008	0.30	0.27	0.02	0.92	0.705			

	0.873	1.37	0.009	0.19	0.17	0.02	0.90	0.673			
	1.022	1.39	0.009	0.16	0.14	0.02	0.89	0.644	1.392	0.16	13.3
14/1/2_15:58:57	0.441	1.38	0.012	0.25	0.22	0.03	0.87	0.687			
	0.673	1.39	0.010	0.12	0.10	0.02	0.84	0.586			
	0.873	1.40	0.012	0.08	0.06	0.02	0.78	0.571			
	1.022	1.41	0.013	0.07	0.05	0.02	0.75	0.591	1.567	0.07	39.4
15/1/2_15:48:0	0.441	1.59	0.019	1.12	1.02	0.10	0.91	0.663			
	0.673	1.51	0.016	0.46	0.41	0.05	0.89	0.601			
	0.873	1.51	0.016	0.27	0.23	0.04	0.86	0.523			
	1.022	1.52	0.018	0.20	0.16	0.03	0.82	0.478	2.076	0.20	6.3
17/1/2_15:48:45	0.441	1.48	0.019	0.52	0.46	0.06	0.88	0.662			
	0.673	1.45	0.017	0.21	0.17	0.03	0.83	0.551			
	0.873	1.45	0.018	0.12	0.09	0.03	0.77	0.498			
	1.022	1.47	0.019	0.10	0.07	0.02	0.74	0.487	2.019	0.10	16.3
23/1/2_14:50:31	0.441	1.33	0.013	0.52	0.45	0.06	0.87	0.757			
	0.673	1.34	0.010	0.26	0.23	0.04	0.86	0.667			
	0.873	1.35	0.011	0.18	0.15	0.03	0.82	0.616			
	1.022	1.36	0.012	0.14	0.11	0.03	0.80	0.598	1.538	0.15	13.9
23/1/2_16:1:55	0.441	1.37	0.021	0.36	0.30	0.06	0.83	0.732			
	0.673	1.38	0.016	0.18	0.14	0.04	0.80	0.626			
	0.873	1.39	0.016	0.12	0.09	0.03	0.76	0.575			
	1.022	1.41	0.017	0.10	0.07	0.03	0.73	0.565	1.551	0.10	22.5
24/1/2_9:43:34	0.441	1.43	0.014	0.74	0.67	0.07	0.90	0.694			
	0.673	1.42	0.013	0.32	0.28	0.04	0.87	0.590			
	0.873	1.43	0.014	0.20	0.16	0.03	0.83	0.523			
	1.022	1.44	0.014	0.15	0.12	0.03	0.81	0.498	1.919	0.15	9.9
24/1/2_9:51:8	0.441	1.59	0.014	1.13	1.05	0.08	0.93	0.647			
	0.673	1.49	0.011	0.41	0.37	0.04	0.91	0.582			
	0.873	1.49	0.011	0.23	0.21	0.03	0.88	0.512			
	1.022	1.50	0.011	0.17	0.15	0.02	0.86	0.478	2.263	0.17	6.7
24/1/2_15:50:46	0.441	1.42	0.042	1.03	0.80	0.22	0.78	0.758			
	0.673	1.40	0.023	0.51	0.41	0.10	0.81	0.675			
	0.873	1.42	0.023	0.35	0.27	0.08	0.78	0.608			
	1.022	1.45	0.026	0.29	0.22	0.07	0.75	0.564	1.526	0.29	6.2
4/2/2_16:8:45	0.441	1.34	0.024	0.50	0.40	0.10	0.80	0.746			
	0.673	1.35	0.014	0.25	0.20	0.05	0.82	0.647			
	0.873	1.37	0.015	0.17	0.14	0.04	0.78	0.593			
	1.022	1.40	0.017	0.15	0.11	0.04	0.75	0.570	1.456	0.15	14.5
17/2/2_15:53:15	0.441	1.41	0.014	0.40	0.35	0.05	0.88	0.692			
	0.673	1.41	0.011	0.18	0.15	0.03	0.86	0.582			
	0.873	1.43	0.012	0.12	0.09	0.02	0.82	0.531			
	1.022	1.46	0.013	0.10	0.08	0.02	0.79	0.518	1.702	0.10	21.4
7/5/2_8:21:39	0.441	1.58	0.028	1.44	1.25	0.19	0.87	0.652			
	0.673	1.50	0.022	0.60	0.51	0.09	0.85	0.592			
	0.873	1.51	0.024	0.38	0.31	0.07	0.81	0.539			
	1.022	1.53	0.025	0.30	0.23	0.06	0.79	0.513	1.896	0.30	4.7

APÉNDICE B

PRUEBA DE NORMALIDAD

Tabla B.1.1. Resultados de la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* para el *albedo por esparcimiento simple*. También se muestra los valores de la media, la desviación estándar y en su caso la mediana.

Nota: La parte sombreada de gris indica el año en el que la muestra no proviene de una distribución normal.

		w (0.441 μm)			$m_r = 1.7$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	22	0.84394	0.00197	No	0.866	0.051	0.875
2000	3	1.00000	0.99989	Si	0.850	0.010	0.850
2001	12	0.93033	0.35993	Si	0.931	0.038	0.935
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		w (0.673 μm)			$m_r = 1.7$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	22	0.93745	0.17372	Si	0.853	0.038	0.860
2000	3	0.75000	-3.27E-9	No	0.857	0.012	0.850
2001	12	0.93069	0.36344	Si	0.913	0.048	0.910
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		w (0.873 μm)			$m_r = 1.7$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	22	0.97379	0.78244	Si	0.820	0.041	0.825
2000	3	0.92308	0.46326	Si	0.847	0.021	0.840
2001	12	0.94247	0.49354	Si	0.893	0.059	0.880
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		w (1.022 μm)			$m_r = 1.7$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	22	0.95716	0.43015	Si	0.800	0.044	0.810
2000	3	0.75000	-3.27E-9	No	0.843	0.023	0.830
2001	12	0.96107	0.74361	Si	0.884	0.066	0.880
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		w (0.441 μm)			$m_r = 2$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	23	0.92003	0.06578	Si	0.887	0.042	0.900
2000	14	0.95698	0.63578	Si	0.896	0.039	0.900
2001	11	0.92563	0.35147	Si	0.922	0.018	0.930
2002	2	-----	-----	-----	0.965	0.007	0.965
		w (0.673 μm)			$m_r = 2$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	23	0.96868	0.65193	Si	0.871	0.041	0.880
2000	14	0.92470	0.25054	Si	0.894	0.032	0.890
2001	11	0.91214	0.24674	Si	0.895	0.022	0.890
2002	2	-----	-----	-----	0.965	0.007	0.965

		w (0.873 μm)			m _r = 4		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	15	0.91905	0.1859	Si	0.837	0.023	0.840
2000	8	0.92119	0.44455	Si	0.846	0.039	0.860
2001	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----

		w (1.022 μm)			m _r = 4		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	15	0.89485	0.08021	Si	0.813	0.024	0.810
2000	8	0.91079	0.36438	Si	0.828	0.042	0.845
2001	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla B.1.2. Resultados de la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* para el *albedo por esparcimiento simple*. También se muestra los valores de la media, la desviación estándar y en su caso la mediana.

Nota: La parte sombreada de gris indica el año en el que la muestra no proviene de una distribución normal.

		w (0.441 μm)			m _r = 1.7		
Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	2	-----	-----	-----	0.880	0.042	0.880
2000	2	-----	-----	-----	0.875	0.021	0.875
2001	3	0.92308	0.46326	Si	0.893	0.021	0.900
2002	1	-----	-----	-----	0.990	-----	-----

		w (0.673 μm)			m _r = 1.7		
Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	-	-----	-----	-----	0.855	0.050	0.855
2000	2	-----	-----	-----	0.855	0.021	0.855
2001	3	0.96429	0.63689	Si	0.863	0.031	0.870
2002	1	-----	-----	-----	0.980	-----	-----

		w (0.873 μm)			m _r = 1.7		
Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	-	-----	-----	-----	0.835	0.050	0.835
2000	2	-----	-----	-----	0.835	0.035	0.835
2001	3	0.75000	0.00000	No	0.847	0.023	0.860
2002	1	-----	-----	-----	0.980	-----	-----

		w (1.022 μm)			m _r = 1.7		
Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	-	-----	-----	-----	0.830	0.042	0.830
2000	2	-----	-----	-----	0.835	0.035	0.835
2001	3	0.75000	0.00000	No	0.850	0.017	0.860
2002	1	-----	-----	-----	0.890	-----	-----

		w (0.441 μm)			m _r = 2		
Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	3	1.00000	0.99989	Si	0.900	0.010	0.900
2000	11	0.98355	0.97880	Si	0.892	0.035	0.900
2001	1	-----	-----	-----	0.920	-----	-----
2002	3	0.92308	0.46326	Si	0.967	0.021	0.960

		g (0.441 μm)			$m_r = 4$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	15	0.96748	0.78189	Si	0.6987	0.0237	0.6980
2000	8	0.94050	0.61978	Si	0.6990	0.0294	0.6920
2001	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		g (0.673 μm)			$m_r = 4$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	15	0.94677	0.45853	Si	0.5939	0.0321	0.5920
2000	8	0.85960	0.12148	Si	0.6085	0.0373	0.6035
2001	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		g (0.873 μm)			$m_r = 4$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	15	0.87998	0.04773	Si	0.5394	0.0350	0.5310
2000	8	0.85006	0.09761	Si	0.5635	0.0400	0.5565
2001	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		g (1.022 μm)			$m_r = 4$		
Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	15	0.85818	0.02245	Si	0.5227	0.0329	0.5080
2000	8	0.80491	0.03361	Si	0.5511	0.0381	0.5420
2001	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla B.2.2. Resultados de la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* para el *factor de asimetría*. También se muestra los valores de la media, la desviación estándar y en su caso la mediana.

Nota: La parte sombreada de gris indica el año en el que la muestra no proviene de una distribución normal.

		g (0.441 μm)			$m_r = 1.7$		
Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	-	-----	-----	-----	0.6520	0.0127	0.6520
2000	2	-----	-----	-----	0.6315	0.0021	0.6315
2001	3	0.75000	0.00000	No	0.6313	0.0196	0.6200
2002	1	-----	-----	-----	0.6740	-----	-----
		g (0.673 μm)			$m_r = 1.7$		
Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	-	-----	-----	-----	0.5650	0.0410	0.5650
2000	2	-----	-----	-----	0.5635	0.0332	0.5635
2001	3	0.98973	0.80608	Si	0.5420	0.0171	0.5440
2002	1	-----	-----	-----	0.5740	-----	-----
		g (0.873 μm)			$m_r = 1.7$		
Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
1999	-	-----	-----	-----	0.5405	0.0290	0.5405
2000	2	-----	-----	-----	0.5445	0.0446	0.5445
2001	3	0.92635	0.47512	Si	0.5260	0.0223	0.5190
2002	1	-----	-----	-----	0.5250	-----	-----

		alfa			m _r = 4			
	Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
	1999	2	-----	-----	-----	1.9090	0.0962	1.9090
	2000	2	-----	-----	-----	1.8225	0.1167	1.8225
	2001	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla B.4.1. Resultados de la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* para el *coeficiente de turbiedad de Ångstrom* (β). También se muestra los valores de la media, la desviación estándar y en su caso la mediana.

Nota: La parte sombreada de gris indica el año en el que la muestra no proviene de una distribución normal.

		beta			m _r = 1.7			
	Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
	1999	22	0.90907	0.04296	Si	0.144	0.032	0.140
	2000	3	0.89286	0.36311	Si	0.130	0.026	0.120
	2001	12	0.89925	0.14826	Si	0.139	0.036	0.130
	2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		beta			m _r = 2			
	Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
	1999	23	0.90895	0.03734	Si	0.143	0.043	0.130
	2000	14	0.80265	0.00483	No	0.146	0.042	0.130
	2001	11	0.93358	0.42848	Si	0.135	0.028	0.130
	2002	2	-----	-----	-----	0.135	0.035	0.135
		beta			m _r = 3			
	Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
	1999	14	0.89445	0.09338	Si	0.142	0.040	0.130
	2000	9	0.91395	0.3391	Si	0.173	0.064	0.160
	2001	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		beta			m _r = 4			
	Mañana	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
	1999	15	0.89054	0.06899	Si	0.138	0.037	0.130
	2000	8	0.86017	0.12308	Si	0.148	0.040	0.135
	2001	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	2002	-	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla B.4.2. Resultados de la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* para el *coeficiente de turbiedad de Ångstrom* (β). También se muestra los valores de la media, la desviación estándar y en su caso la mediana.

		beta			m _r = 1.7			
	Tarde	N	W	P	Normal	Media	Desviación Estándar	Mediana
	1999	2	-----	-----	-----	0.185	0.064	0.185
	2000	2	-----	-----	-----	0.235	0.064	0.235
	2001	3	0.98256	0.74703	Si	0.200	0.066	0.210
	2002	1	-----	-----	-----	0.090	0.000	0.090

APÉNDICE C

COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS POR AÑOS

Tabla C.1.1. Resultados de la comparación entre medias por años para el *albedo por esparcimiento simple*.

Nota: La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

m _r = 1.7 Mañana								
1999-2000	w (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P		t	P		t	P	
0.54023	0.59423	No	3.6044	0.0032	Si	-----	----	-----
1999-2000	w (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P		t	P		t	P	
0.15387	0.87905	No	-1.93072	0.07562	No	-----	----	-----
1999-2000	w (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P		t	P		t	P	
-1.08617	0.28866	No	1.29154	0.21901	No	-----	----	-----
1999-2000	w (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P		t	P		t	P	
-1.65089	0.11235	No	1.03292	0.32047	No	-----	----	-----

Tabla C.1.2. Resultados de la comparación entre medias por años para el *albedo por esparcimiento simple*.

m _r = 1.7 Tarde								
1999-2000	w (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P		t	P		t	P	
0.14907	0.89517	No	0.95864	0.40846	No	-4.02158	0.05663	No
1999-2000	w (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P		t	P		t	P	
0	1	No	0.3285	0.76413	No	-3.30719	0.08054	No
1999-2000	w (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P		t	P		t	P	
0	1	No	-0.37328	0.73376	No	5	0.03775	No
1999-2000	w (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P		t	P		t	P	
-0.12804	0.54508	No	0.66169	0.27773	No	-6.5	0.98857	No

Tabla C.1.3. Resultados de la comparación entre medias por años para el *albedo por esparcimiento simple*.

Nota: La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

			$m_r = 2$ Mañana					
1999-2000	w (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.009	t	P	0.025	t	P	0.043
-0.64953	0.52023	No	2.00651	0.0567	No	-3.18881	0.00862	No
1999-2000	w (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.023	t	P	0.001	t	P	0.070
-1.79007	0.0821	No	0.10308	0.91879	No	-4.27663	0.00131	Si
1999-2000	w (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.040	t	P	0.011	t	P	0.085
-2.70002	0.01061	No	-0.81158	0.42535	No	-4.13924	0.00165	Si
1999-2000	w (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.049	t	P	0.037	t	P	0.089
-3.09296	0.99806	No	-2.18804	0.98196	No	4.35687	5.71E-4	Si

Tabla C.1.4. Resultados de la comparación entre medias por años para el *albedo por esparcimiento simple*.

			$m_r = 2$ Tarde					
1999-2000	w (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.008	t	P	0.028	t	P	0.047
0.38516	0.70686	No	0.76123	0.46409	No	-1.94145	0.19171	No
1999-2000	w (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.002	t	P	0.025	t	P	0.057
0.07834	0.93885	No	0.53601	0.60367	No	-2.35748	0.14246	No
1999-2000	w (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.013	t	P	0.044	t	P	0.040
-0.42554	0.67797	No	0.81849	0.43215	No	-0.96077	0.43805	No
1999-2000	w (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.021	t	P	0.045	t	P	0.030
-0.71725	0.75653	No	0.89446	0.19605	No	-0.56695	0.68605	No

Tabla B.1.5. Resultados de la comparación entre medias por años para el *albedo por esparcimiento simple*.

Nota: La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

			$m_r = 3$ Mañana					
1999-2000	w (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.005	t	P		t	P	
0.51386	0.61271	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	w (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.015	t	P		t	P	
-1.85462	0.07775	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	w (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.030	t	P		t	P	
-3.54216	0.00193	Si	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	w (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.036	t	P		t	P	
-4.17247	0.99978	No	-----	----	-----	-----	----	-----

Tabla C.1.6. Resultados de la comparación entre medias por años para el *albedo por esparcimiento simple*.

			m _r = 3 Tarde					
1999-2000	w (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.007	t	P	-----	t	P	-----
-0.44855	0.66114	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	w (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.014	t	P	-----	t	P	-----
0.94966	0.35961	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	w (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.018	t	P	-----	t	P	-----
1.01201	0.33	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	w (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.018	t	P	-----	t	P	-----
0.97055	0.17474	No	-----	---	-----	-----	---	-----

Tabla B.1.7. Resultados de la comparación entre medias por años para el *albedo por esparcimiento simple*.

			m _r = 4 Mañana					
1999-2000	w (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.012	t	P	-----	t	P	-----
-1.33595	0.19586	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	w (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.002	t	P	-----	t	P	-----
0.19496	0.84729	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	w (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.010	t	P	-----	t	P	-----
-0.74518	0.46442	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	w (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.015	t	P	-----	t	P	-----
-1.09671	0.85741	No	-----	---	-----	-----	---	-----

Tabla C.1.8. Resultados de la comparación entre medias por años para el *albedo por esparcimiento simple*.

			m _r = 4 Tarde					
1999-2000	w (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.010	t	P	-----	t	P	-----
0.63246	0.59175	Si	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	w (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.015	t	P	-----	t	P	-----
3	0.09547	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	w (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.015	t	P	-----	t	P	-----
1.34164	0.31175	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	w (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.015	t	P	-----	t	P	-----
1	0.21132	No	-----	---	-----	-----	---	-----

Tabla C.2.1 Resultados de la comparación entre medias por años para el *factor de asimetría*.

m _r = 1.7 Mañana								
1999-2000	g (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0233	t	P	0.0473	t	P	
1.72900	0.09721	No	2.80958	0.01476	No	-----	----	-----
1999-2000	g (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0003	t	P	0.0237	t	P	
-0.01583	0.98750	No	0.80302	0.43640	No	-----	----	-----
1999-2000	g (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0147	t	P	0.0129	t	P	
0.93443	0.35979	No	0.42549	0.67744	No	-----	----	-----
1999-2000	g (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0243	t	P	0.0054	t	P	
-1.60746	0.12160	No	0.18695	0.85458	No	-----	----	-----

Tabla C.2.2 Resultados de la comparación entre medias por años para el *factor de asimetría*.

m _r = 1.7 Tarde								
1999-2000	g (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0205	t	P	0.0002	t	P	0.0427
2.24679	0.15369	No	-0.01136	0.99165	No	-1.88235	0.20050	No
1999-2000	g (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0015	t	P	0.0215	t	P	0.0320
0.04019	0.48580	No	-0.99275	0.80299	No	-1.62177	0.87684	No
1999-2000	g (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0040	t	P	0.0185	t	P	0.0010
0.10643	0.92495	No	0.64274	0.56614	No	-0.03877	0.97260	No
1999-2000	g (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0145	t	P	0.0163	t	P	0.0193
-0.38667	0.73627	No	0.59766	0.59217	No	-0.87798	0.42953	No

Tabla C.2.3 Resultados de la comparación entre medias por años para el *factor de asimetría*.

m _r = 2 Mañana								
1999-2000	g (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0012	t	P	0.0100	t	P	0.0168
0.12274	0.90301	No	0.79540	0.43452	No	-0.70721	0.49415	No
1999-2000	g (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0052	t	P	0.0051	t	P	0.0057
-0.39543	0.69493	No	0.39127	0.69920	No	-0.22589	0.82543	No
1999-2000	g (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0106	t	P	-0.0010	t	P	0.0063
-0.78531	0.43755	No	-0.07554	0.94043	No	-0.24776	0.80888	No
1999-2000	g (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0133	t	P	0.0117	t	P	0.0087
-1.06578	0.29382	No	-0.84402	0.40492	No	0.34398	0.73734	No

Tabla C.2.4 Resultados de la comparación entre medias por años para el *factor de asimetría*.

			$m_r = 2$ Tarde					
1999-2000	g (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0202	t	P	0.0089	t	P	0.0203
1.04284	0.31758	No	0.28393	0.78225	No	-1.32234	0.31702	No
1999-2000	g (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0277	t	P	0.0363	t	P	0.0467
1.18233	0.12999	No	-1.02793	0.83590	No	-1.26152	0.83284	No
1999-2000	g (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0216	t	P	0.0397	t	P	0.0213
1.03810	0.31969	No	-1.30064	0.22256	No	-0.62915	0.59353	No
1999-2000	g (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0121	t	P	0.0303	t	P	0.0310
-0.68058	0.50906	No	1.09407	0.29958	No	1.16559	0.26472	No

Tabla C.2.5 Resultados de la comparación entre medias por años para el *factor de asimetría*.

			$m_r = 3$ Mañana					
1999-2000	g (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0038	t	P		t	P	
0.30687	0.76196	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	g (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0146	t	P		t	P	
-0.87177	0.39319	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	g (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0226	t	P		t	P	
-1.36300	0.18732	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	g (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0274	t	P		t	P	
-1.83587	0.08058	No	-----	----	-----	-----	----	-----

Tabla C.2.6 Resultados de la comparación entre medias por años para el *factor de asimetría*.

			$m_r = 3$ Tarde					
1999-2000	g (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0161	t	P		t	P	
0.80152	0.43724	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	g (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0407	t	P		t	P	
1.38457	0.09474	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	g (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0394	t	P		t	P	
1.36709	0.19477	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	g (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0310	t	P		t	P	
1.16559	0.26472	No	-----	----	-----	-----	----	-----

Tabla C.2.7 Resultados de la comparación entre medias por años para el *factor de asimetría*.

			m _r = 4 Mañana					
1999-2000	g (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	-0.0003	t	P	-----	t	P	-----
-0.02367	0.98134	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	g (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0146	t	P	-----	t	P	-----
-0.98541	0.33564	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	g (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0241	t	P	-----	t	P	-----
-1.49929	0.14868	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	g (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0284	t	P	-----	t	P	-----
-1.86817	0.07576	No	-----	---	-----	-----	---	-----

Tabla C.2.8 Resultados de la comparación entre medias por años para el *factor de asimetría*.

			m _r = 4 Tarde					
1999-2000	g (0.441um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0205	t	P	-----	t	P	-----
1.04580	0.40542	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	g (0.673um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0330	t	P	-----	t	P	-----
1.37381	0.15161	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	g (0.873um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0135	t	P	-----	t	P	-----
0.64487	0.58511	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	g (1.022um)	Diferencia	2000-2001		Diferencia	2001-2002		Diferencia
t	P	0.0120	t	P	-----	t	P	-----
-0.52623	0.65126	No	-----	---	-----	-----	---	-----

Tabla C.3.1. Resultados de la comparación entre medias por años para el *parámetro de Angstrom (α)*.

Nota: La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

			Mañana					
1999-2000	m _r = 1.7	Diferencia	2000-2001	m _r = 1.7	Diferencia	2001-2002	m _r = 1.7	Diferencia
t	P	0.0190	t	P	0.0127	t	P	-----
0.25306	0.80247	No	0.07382	0.94228	No	-----	---	-----
1999-2000	m _r = 2	Diferencia	2000-2001	m _r = 2	Diferencia	2001-2002	m _r = 2	Diferencia
t	P	0.0563	t	P	0.0425	t	P	0.0413
1.09035	0.28301	No	0.71429	0.48223	No	-0.35019	0.73281	No
1999-2000	m _r = 3	Diferencia	2000-2001	m _r = 3	Diferencia	2001-2002	m _r = 3	Diferencia
t	P	0.1418	t	P	-----	t	P	-----
2.85157	0.00956	No	-----	---	-----	-----	---	-----
1999-2000	m _r = 4	Diferencia	2000-2001	m _r = 4	Diferencia	2001-2002	m _r = 4	Diferencia
t	P	0.1637	t	P	-----	t	P	-----
3.51991	0.00203	Si	-----	---	-----	-----	---	-----

Tabla C.3.2. Resultados de la comparación entre medias por años para el *parámetro de Angstrom (α)*.

Tarde								
1999-2000	$m_r = 1.7$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 1.7$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 1.7$	Diferencia
t	P	0.2910	t	P	0.0930	t	P	0.3750
-1.7876	0.21575	No	-0.74195	0.51193	No	-2.75646	0.11027	No
1999-2000	$m_r = 2$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 2$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 2$	Diferencia
t	P	0.0041	t	P	0.2206	t	P	0.5303
0.06814	0.9468	No	-2.17832	0.0544	No	-3.38364	0.07735	No
1999-2000	$m_r = 3$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 3$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 3$	Diferencia
t	P	0.0619	t	P		t	P	
-0.55424	0.58883	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	$m_r = 4$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 4$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 4$	Diferencia
t	P	0.0865	t	P		t	P	
0.80907	0.50342	No	-----	----	-----	-----	----	-----

Tabla C.4.1. Resultados de la comparación entre medias por años para el *coeficiente de turbiedad de Angstrom (β)*.

Mañana								
1999-2000	$m_r = 1.7$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 1.7$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 1.7$	Diferencia
t	P	0.014	t	P	0.009	t	P	
0.72508	0.47572	No	0.41406	0.68558	No	-----	----	-----
1999-2000	$m_r = 2$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 2$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 2$	Diferencia
t	P	0.003	t	P	0.012	t	P	0.000
-0.23499	0.81559	No	-0.80603	0.42848	No	-0.02031	0.98416	No
1999-2000	$m_r = 3$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 3$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 3$	Diferencia
t	P	0.031	t	P		t	P	
-1.44723	0.1626	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	$m_r = 4$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 4$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 4$	Diferencia
t	P	0.010	t	P		t	P	
-0.56855	0.57569	No	-----	----	-----	-----	----	-----

Tabla C.4.2. Resultados de la comparación entre medias por años para el *coeficiente de turbiedad de Angstrom (β)*.

Tarde								
1999-2000	$m_r = 1.7$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 1.7$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 1.7$	Diferencia
t	P	0.050	t	P	0.035	t	P	0.110
-0.78567	0.51436	No	-0.59044	0.59642	No	1.45274	0.28345	No
1999-2000	$m_r = 2$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 2$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 2$	Diferencia
t	P	0.011	t	P	0.047	t	P	0.127
0.18029	0.85993	No	0.5111	0.62037	No	2.32122	0.14601	No
1999-2000	$m_r = 3$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 3$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 3$	Diferencia
t	P	0.028	t	P		t	P	
-0.7401	0.4724	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	$m_r = 4$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 4$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 4$	Diferencia
t	P	0.075	t	P		t	P	
1.52302	0.2672	No	-----	----	-----	-----	----	-----

Tabla C.5.1. Resultados de la comparación entre medias por años para la *visibilidad*.

Mañana								
1999-2000	$m_r = 1.7$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 1.7$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 1.7$	Diferencia
t	P	2.08	t	P	1.80	t	P	
-0.89053	0.3824	No	-0.84668	0.41249	No	-----	----	-----
1999-2000	$m_r = 2$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 2$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 2$	Diferencia
t	P	0.04	t	P	0.77	t	P	0.92
0.02742	0.97828	No	0.48602	0.63155	No	0.30177	0.76846	No
1999-2000	$m_r = 3$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 3$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 3$	Diferencia
t	P	1.04	t	P		t	P	
0.55488	0.58484	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	$m_r = 4$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 4$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 4$	Diferencia
t	P	0.40	t	P		t	P	
-0.23122	0.81938	No	-----	----	-----	-----	----	-----

Tabla C.5.2. Resultados de la comparación entre medias por años para la *visibilidad*.

Tarde								
1999-2000	$m_r = 1.7$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 1.7$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 1.7$	Diferencia
t	P	5.70	t	P	2.82	t	P	8.83
1.03851	0.40811	No	0.69652	0.53622	No	-1.53572	0.26439	No
1999-2000	$m_r = 2$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 2$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 2$	Diferencia
t	P	0.20	t	P	2.00	t	P	5.67
-0.07537	0.94116	No	-0.51655	0.6167	No	-0.62801	0.59415	No
1999-2000	$m_r = 3$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 3$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 3$	Diferencia
t	P	1.67	t	P		t	P	
0.92409	0.37228	No	-----	----	-----	-----	----	-----
1999-2000	$m_r = 4$	Diferencia	2000-2001	$m_r = 4$	Diferencia	2001-2002	$m_r = 4$	Diferencia
t	P	5.15	t	P		t	P	
-1.98629	0.18538	No	-----	----	-----	-----	----	-----

APÉNDICE D

COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS ANTES Y DESPUÉS DEL MEDIO DÍA

Tabla D.1. Resultados de la comparación entre medias antes y después del medio día para el albedo por esparcimiento simple y el factor de asimetría. **Nota:** La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

Mañana Vs Tarde; $m_r = 1.7$

1999	t	P	Diferencia	Diferentes	2000	t	P	Diferencia	Diferentes
w(0.441um)	-0.36176	0.72098	0.014	No	w(0.441um)	-1.86052	0.15975	0.025	No
w(0.673um)	-0.06325	0.95014	0.002	No	w(0.673um)	0.11812	0.91343	0.002	No
w(0.873um)	-0.48059	0.63555	0.015	No	w(0.873um)	0.48114	0.66333	0.012	No
w(1.022um)	-0.91892	0.36810	0.030	No	w(1.022um)	0.32850	0.76413	0.008	No
g(0.441um)	2.51127	0.01987	0.0386	No	g(0.441um)	1.67420	0.19269	0.0358	No
g(0.673um)	1.64747	0.11367	0.0357	No	g(0.673um)	1.66211	0.19508	0.0375	No
g(0.873um)	0.45721	0.65200	0.0091	No	g(0.873um)	0.84290	0.46118	0.0198	No
g(1.022um)	-0.40895	0.68653	0.0078	No	g(1.022um)	0.08554	0.93722	0.0020	No

2001	t	P	Diferencia	Diferentes	2001	t	P	Diferencia	Diferentes
w(0.441um)	1.63772	0.12545	0.038	No	w(0.441um)	-----	-----	-----	-----
w(0.673um)	1.65034	0.12281	0.049	No	w(0.673um)	-----	-----	-----	-----
w(0.873um)	1.28827	0.22011	0.046	No	w(0.873um)	-----	-----	-----	-----
w(1.022um)	0.86845	0.40090	0.034	No	w(1.022um)	-----	-----	-----	-----
g(0.441um)	5.21025	0.00017	0.0833	Si	g(0.441um)	-----	-----	-----	-----
g(0.673um)	2.81238	0.01468	0.0827	No	g(0.673um)	-----	-----	-----	-----
g(0.873um)	1.65991	0.12085	0.0513	No	g(0.873um)	-----	-----	-----	-----
g(1.022um)	0.80867	0.43326	0.0238	No	g(1.022um)	-----	-----	-----	-----

Tabla D.2. Resultados de la comparación entre medias antes y después del medio día para el albedo por esparcimiento simple y el factor de asimetría. **Nota:** La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

Mañana Vs Tarde; $m_r = 2$

1999	t	P	Diferencia	Diferentes	2000	t	P	Diferencia	Diferentes
w(0.441um)	-0.50412	0.61877	0.013	No	w(0.441um)	0.30733	0.76136	0.005	No
w(0.673um)	-0.22270	0.82565	0.005	No	w(0.673um)	1.27400	0.21539	0.020	No
w(0.873um)	-0.10207	0.91955	0.003	No	w(0.873um)	1.39861	0.17527	0.024	No
w(1.022um)	-0.44576	0.65977	0.014	No	w(1.022um)	0.83016	0.41499	0.014	No
g(0.441um)	1.39356	0.17622	0.0240	No	g(0.441um)	3.52793	0.00180	0.0431	Si
g(0.673um)	-0.19230	0.84913	0.0050	No	g(0.673um)	2.13514	0.04363	0.0279	No
g(0.873um)	-0.75265	0.45898	0.0202	No	g(0.873um)	0.96887	0.34269	0.0120	No
g(1.022um)	-1.08866	0.28712	0.0263	No	g(1.022um)	-0.07178	0.94340	-0.0008	No

2001	t	P	Diferencia	Diferentes	2002	t	P	Diferencia	Diferentes
w(0.441um)	0.09492	0.92626	0.002	No	w(0.441um)	-0.10445	0.92341	0.002	No
w(0.673um)	-0.19715	0.84766	0.005	No	w(0.673um)	0.52223	0.63762	0.008	No
w(0.873um)	-1.02844	0.32798	0.030	No	w(0.873um)	0.55287	0.61888	0.015	No
w(1.022um)	-1.51006	0.16196	0.044	No	w(1.022um)	0.43656	0.69194	0.015	No
g(0.441um)	1.30570	0.22089	0.0442	No	g(0.441um)	3.92393	0.02945	0.0407	No
g(0.673um)	1.94497	0.08042	0.0693	No	g(0.673um)	1.09949	0.35188	0.0283	No
g(0.873um)	1.46104	0.17470	0.0507	No	g(0.873um)	1.32547	0.27691	0.0357	No
g(1.022um)	0.80874	0.43748	0.0278	No	g(1.022um)	1.24598	0.15060	0.0362	No

Tabla D.3. Resultados de la comparación entre medias antes y después del medio día para el albedo por esparcimiento simple y el factor de asimetría. **Nota:** La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

Mañana Vs Tarde; $m_r = 3$

1999	t	P	Diferencia	Diferentes	2000	t	P	Diferencia	Diferentes
w(0.441um)	0.67267	0.50886	0.008	No	w(0.441um)	0.61915	0.54576	0.006	No
w(0.673um)	-0.21375	0.83290	0.002	No	w(0.673um)	2.47796	0.02657	0.027	No
w(0.873um)	-1.42677	0.16907	0.017	No	w(0.873um)	2.34600	0.03422	0.031	No
w(1.022um)	-2.40426	0.02601	0.029	No	w(1.022um)	1.77236	0.09809	0.025	No
g(0.441um)	3.32210	0.00340	0.0486	No	g(0.441um)	3.69079	0.00242	0.0610	Si
g(0.673um)	-0.11734	0.90776	0.0028	No	g(0.673um)	3.16048	0.00695	0.0524	Si
g(0.873um)	-1.18009	0.25181	0.0281	No	g(0.873um)	2.11242	0.05310	0.0339	No
g(1.022um)	-1.89071	0.96338	0.0408	No	g(1.022um)	1.16830	0.13110	0.0176	No

2001	t	P	Diferencia	Diferentes	2001	t	P	Diferencia	Diferentes
w(0.441um)	-----	-----	-----	-----	w(0.441um)	-----	-----	-----	-----
w(0.673um)	-----	-----	-----	-----	w(0.673um)	-----	-----	-----	-----
w(0.873um)	-----	-----	-----	-----	w(0.873um)	-----	-----	-----	-----
w(1.022um)	-----	-----	-----	-----	w(1.022um)	-----	-----	-----	-----
g(0.441um)	-----	-----	-----	-----	g(0.441um)	-----	-----	-----	-----
g(0.673um)	-----	-----	-----	-----	g(0.673um)	-----	-----	-----	-----
g(0.873um)	-----	-----	-----	-----	g(0.873um)	-----	-----	-----	-----
g(1.022um)	-----	-----	-----	-----	g(1.022um)	-----	-----	-----	-----

Tabla D.4. Resultados de la comparación entre medias antes y después del medio día para el albedo por esparcimiento simple y el factor de asimetría. **Nota:** La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

Mañana Vs Tarde; $m_r = 4$

1999	t	P	Diferencia	Diferentes	2000	t	P	Diferencia	Diferentes
w(0.441um)	0.47745	0.63993	0.007	No	w(0.441um)	0.29609	0.77470	0.005	No
w(0.673um)	0.24747	0.80790	0.003	No	w(0.673um)	0.82322	0.43423	0.016	No
w(0.873um)	0.09979	0.92183	0.002	No	w(0.873um)	0.89595	0.39644	0.026	No
w(1.022um)	-0.42467	0.67710	0.007	No	w(1.022um)	0.71714	0.49369	0.023	No
g(0.441um)	4.65434	0.00031	0.0817	Si	g(0.441um)	4.54417	0.00189	0.1025	No
g(0.673um)	1.27991	0.22002	0.0299	No	g(0.673um)	2.65554	0.02901	0.0775	No
g(0.873um)	0.30758	0.76263	0.0079	No	g(0.873um)	1.50341	0.17114	0.0455	No
g(1.022um)	0.07026	0.47246	0.0017	No	g(1.022um)	0.64091	0.26975	0.0181	No

2001	t	P	Diferencia	Diferentes	2001	t	P	Diferencia	Diferentes
w(0.441um)	-----	-----	-----	-----	w(0.441um)	-----	-----	-----	-----
w(0.673um)	-----	-----	-----	-----	w(0.673um)	-----	-----	-----	-----
w(0.873um)	-----	-----	-----	-----	w(0.873um)	-----	-----	-----	-----
w(1.022um)	-----	-----	-----	-----	w(1.022um)	-----	-----	-----	-----
g(0.441um)	-----	-----	-----	-----	g(0.441um)	-----	-----	-----	-----
g(0.673um)	-----	-----	-----	-----	g(0.673um)	-----	-----	-----	-----
g(0.873um)	-----	-----	-----	-----	g(0.873um)	-----	-----	-----	-----
g(1.022um)	-----	-----	-----	-----	g(1.022um)	-----	-----	-----	-----

Tabla D.5. Resultados de la comparación entre medias antes y después del medio día para los coeficientes de turbiedad de Ångstrom. **Nota:** La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

Mañana Vs Tarde

alfa

Mañana Vs Tarde

beta

alfa	t	P	Diferencia	Diferentes	beta	t	P	Diferencia	Diferentes
1999					1999				
$m_r = 1.7$	3.40257	0.00256	0.3190	Si	$m_r = 1.7$	-1.62437	0.11854	0.041	No
$m_r = 2$	-0.24965	0.80498	0.0237	No	$m_r = 2$	-2.61696	0.01511	0.080	No
$m_r = 3$	0.45361	0.65500	0.0386	No	$m_r = 3$	-2.23888	0.03669	0.047	No
$m_r = 4$	-2.12544	0.05057	0.1833	No	$m_r = 4$	-2.59590	0.02026	0.077	No
2000					2000				
$m_r = 1.7$	0.08619	0.93675	0.0090	No	$m_r = 1.7$	-2.69862	0.07387	0.105	No
$m_r = 2$	-1.54613	0.13572	0.0759	No	$m_r = 2$	-2.48141	0.02083	0.066	No
$m_r = 3$	-3.16350	0.00690	0.1650	No	$m_r = 3$	-1.14470	0.86424	0.044	No
$m_r = 4$	-3.71922	0.00588	0.2605	No	$m_r = 4$	0.24343	0.40690	0.008	No
2001					2001				
$m_r = 1.7$	0.66203	0.51952	0.1147	No	$m_r = 1.7$	-2.26573	0.97940	0.061	No
$m_r = 2$	1.12225	0.28798	0.1872	No	$m_r = 2$	-4.22748	0.99912	0.125	No
$m_r = 3$	-----	-----	-----	-----	$m_r = 3$	-----	-----	-----	-----
$m_r = 4$	-----	-----	-----	-----	$m_r = 4$	-----	-----	-----	-----
2002					2002				
$m_r = 1.7$	-----	-----	-----	-----	$m_r = 1.7$	-----	-----	-----	-----
$m_r = 2$	-2.82868	0.06626	0.3018	No	$m_r = 2$	0.04182	0.48463	0.002	No
$m_r = 3$	-----	-----	-----	-----	$m_r = 3$	-----	-----	-----	-----
$m_r = 4$	-----	-----	-----	-----	$m_r = 4$	-----	-----	-----	-----

Tabla D.6. Resultados de la comparación entre medias antes y después del medio día para la visibilidad.

Nota: La parte sombreada de gris indica donde hay diferencia.

Mañana Vs Tarde		Visibilidad		
Visibilidad	t	P	Diferencia	Diferentes
1999				
$m_r = 1.7$	0.07972	0.93718	0.23	No
$m_r = 2$	1.79556	0.08517	4.94	No
$m_r = 3$	2.02704	0.05620	3.50	No
$m_r = 4$	2.34524	0.03318	6.97	No
2000				
$m_r = 1.7$	2.10949	0.12543	8.02	No
$m_r = 2$	3.04402	0.00576	4.70	No
$m_r = 3$	1.89814	0.07849	4.13	No
$m_r = 4$	0.75886	0.46970	2.23	No
2001				
$m_r = 1.7$	1.56164	0.14238	3.40	No
$m_r = 2$	1.80106	0.10188	7.47	No
$m_r = 3$	-----	-----	-----	-----
$m_r = 4$	-----	-----	-----	-----
2002				
$m_r = 1.7$	-----	-----	-----	-----
$m_r = 2$	0.14248	0.89573	0.88	No
$m_r = 3$	-----	-----	-----	-----
$m_r = 4$	-----	-----	-----	-----

7. BIBLIOGRAFÍA

- Ackerman, Thomas P. 1988. Aerosols and Climate: Aerosols in Climate Modeling. Edited by Peter V. Hobbs and M. Patrick McCormick. A. Deepak Publishing, USA. Págs. 335-348.
- Asakuma, Koji., Mitsuo Minomura, Shingo Otsutsumi, Hiroaki Kuze, and Nobuo Takeuchi. 2002. Estimation of aerosol optical thickness over land in Chiba area from AVHRR data. *Adv. Space Res.* 29, 1747-1752.
- Bates, T.S., B.J. Huebert, J.L. Gras, F.B., Griffiths & P.A. Durkee. 1998. International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Project's First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1): Overview. *J. Geophys. Res.* 103, 16,297-16,318.
- Baumgardner, D., G.B. Raga, G. Kok, J. Ogren, I. Rosas, A. Báez & T. Novakov. 2000. On the evolution of aerosol properties at a mountain site above Mexico City. *J. Geophys. Res.*, 105, D17;22,243-22,253.
- Briegleb, B. P. 1992. Longwave Band Model for Thermal Radiation in Climate Studies. *J. Geophys. Res.* 97, 11,475-11,485.
- Campanelli, M., Wolfgang Junkermann, Olivieri Bruno and Glauco Tonna. 2001. Physical features of the atmospheric aerosol determined with an aureolemeter and a FSSP probe in the Mediterranean Lampedusa Island, *Atmospheric Environment.*, 35, 3607-3618.
- Castro, T., S. Madronich, S. Rivale, A. Muhlia, & B. Mar. 2001. The influence of aerosols on photochemical smog in México City. *Atmospheric Environment.* 35, 1765-1772.
- Charlson, R. J., S.E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J.A. Coakley Jr., J.E. Hansen, and D. J. Hofmann. 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosol. *Science.* 255, 423-430
- Dammen, K.W., R. Hollmann & R. Stuhlmann 2002. Study of aerosol impact on the earth radiation budget with satellite data. *Adv. Space Res.* 29, 1753-1757.
- Deirmendjian, D. *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions.* American Elsevier Publishing Company, INC. New York, 1969.
- Díaz Martínez, Antonia María Teresa. 1999. Tesis de Maestría: variaciones temporales de la distribución de tamaños de partículas del aerosol atmosférico y los efectos en sus características ópticas. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Física de la Atmósfera.

- Dubovik, Oleg & Michael D. King. 2000. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105, 20,673-20,696.
- Dubovik, Oleg., Brent Holben, Thomas F. Eck, Alexander Smirnov, Yoram J. Kaufman , Michael D. King, Didier Tanré & Ilya Slutsker. 2002. Variability of Absorption and Optical. Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations. *Journal of the Atmospheric Sciences.* 59, 590-608.
- Edgerton SA, Bian X. Doran JC, Fast JD, Hubbe JM, Malone EL, Shaw WJ, Whiteman CD, Zhong S, Arriaga JL, Ortiz E, Ruiz M, Sosa G, Vega E, Limón T, Guzman F, Archuleta J, Bossert JE, Elliot SM, Lee JT, McNair LA, Chow JC, Watson JG, Coulter RL, Doskey PV, Gaffney JS, Marley NA, Neff W, Petty R. 1999. Particulate air pollution in Mexico City: A collaborative research project. *J Air Waste Manage Assoc.* 49, 1221-1229.
- Hansen, J., M. Sato, and R. Ruedy. 1997. Radiative forcing and climate response. *J. Geophys. Res.* , 102, 6831-6864.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis, and V. Oinas. 2000. Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 97, 9875-9880.
- Heintzenberg, J., R. J. Charlson, A.D. Clarke, C. Lioussé, V. Ramaswamy, K. P. Shine, M. Wendish, and G. Helas. 1997. Measurements and modeling of aerosol single scattering albedo: Progress, problems and prospects. *Beitr. Phys. Atmos.*, , 249-263
- Hess, M., P.Koepke, & I. Schult. 1998. Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society.* Vol. 79, No. 5, May 1998.
- Hinds, William C. 1999. *Aerosol technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles.* Wiley-Interscience, N.Y. 2° ed.
- Holben, B. N., and Coauthors, 1998: AERONET-A Federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, 66, 1-16.
- Houghton, J. T., L. G. Miera Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell. 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change.* Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 552pp.
- IMADA. 1997. *Investigación Sobre Materia Particulada y Deterioro Atmosférico: Informe Final.* Proyecto DOB-7238. Instituto Mexicano del Petróleo.
- IPCC. 1994. *Radiative Forcing of Climate.* Cambridge University Press.
- Kaufman, Y.J., D. Tanré, H.R. Gordon, T. Nakajima, J. Lenoble, R. Frouin, H. Grassl, B.M. Herman, M.D. King, & P.M. Teillet. 1997. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect, *J. Geophys. Res.*, 102, 16815-16830.

- Kaufman, Y.J, and Coauthors. 1998. Smoke, clouds, and radiation-Brazil (SCAR-B) experiment. *J. Geophys. Res.* 103, 31,783-31,808.
- Kerker, Milton. *The Scattering of Light*. Academic Press. New York. 1969.
- Kimball H., 1931. Solar radiation as a meteorological factor. *Monthly Weather Review*, v. 59, p. 472-479
- King., Y. J Hauffman, D. Tanre & T. Nakajima. 1999. Remote sensing of troposphere aerosols from space: Past, present and future. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 80, 2229-2259.
- Kikas, Ülle., Aivo Reinart, Mai Vaht, Uno Veismann. 2001. A case study of the impact of boundary layer aerosol size distribution on the surface UV irradiance. *Atmospheric Environment*. 35, 5041-5051.
- Kyle, Thomas G. 1991. *Atmospheric Transmission, Emission and Scattering*. Pergamon Press. New York.
- Lata, K. Madhavi., K.V.S. Badarinath, T.V. Rao Ramakrishna, R. Ramakrishna Reddy, Y. Nazeer Ahammed, K. Rama Gopal & P. Abdul Azeem. 2003. Studies on aerosol optical properties over urban and semi-urban environments of Hyderabad and Anantapur.. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 78, 257-268.
- Leyva, A. 2003. Notas sobre el aerosol. Estas notas están en proceso de publicación.
- Liou, K.N. 1980. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press: International Geophysics 1^o.ed. Series. Vol. 84. N.Y.
- Liou, K.N. 2002. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press: International Geophysics 2^o.ed. Series. Vol. 84. N.Y.
- McClatchey, R. A. & Selbe, J.E. Atmospheric transmittance from 0.25 to 38.5 m: computer code LOWTRAN-2.1927. Air Force Cambridge Research laboratories. Environ. Res. Paper 427. AFCRL-720745
- Muhlia, A. 2004. Comunicación personal.
- Nakajima, T., Tanaka, M., and Yamauchi, T. (1983). Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data. *Appl. Opt* 22:2951-2959.
- Novakov, T., M. O. Andreae, R. Gabriel, T. W. Kirchstetter, O. L. Mayol-Bracero, and V. Ramanathan. 2000. Origin of carbonaceous aerosols over the tropical Indian Ocean: Biomass burning or fossil fuels? *Geophys. Res. Lett.* 4061-4064.

- Pender, J.E., and Coauthors. 1994. Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 75, 375-400.
- PROAIRE. 1996. Programa para mejorar la Calidad del Aire en el Valle de la Ciudad de México. Departamento del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, y Secretaría de Salud, México. 213pp.
- Raga, G.B. and A.C. Raga. 2000. On the formation of an elevated ozone peak in Mexico City. *Atmospheric Environment*. 34, 4097-4102.
- Raga, G.B., D. Baumgardner & G Kok. 1998. On the microphysical and chemical properties of aerosols in Mexico City. *J. Aerosol Sci.* 29, S589-S590.
- Raga, G.B., T. Castro, D. Baumgardner. 2001a. The impact of megacity pollution on local climate and implications for the regional environment: Mexico City. *Atmospheric Environment*. 35, 1805-1811.
- Raga, G. B., D. Baumgardner, T Castro, A Martínez-Arroyo, and R Navarro-González. 2001b. México City air quality: a qualitative review of gas and aerosol measurements (1960-2000). *Atmospheric Environment*. 35, 4041-4058.
- Russell, P. B., P.V. Hobbs, & L. L. Stowe. 1999. Aerosol properties and Radiative effects in the U.S. East Coast haze plume: An overview of the Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational Experiment (TARFOX). *J. Geophys. Res.* 104, 2213-2222.
- Raes, F., T. Bates, F. McGovern, & M. Van Liedekerke. 2000. The 2nd Aerosol Characterization Experiment (ACE-2): General Overview and main results. *Tellus*, 52B, 111-125.
- Ramanathan, and Coauthors. 2001. The Indian Ocean Experiment: An integrated assessment of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *J. Geophys. Res.* 106, 28,371-28,398
- Remer, L. A. and Y. J. Kaufman. 1998. Dynamic aerosol model: Urban/industrial aerosol. *J. Geophys. Res.* 13 859 - 13 871.
- Shettle, E.P. and R. W. Fenn. 1979. Models of aerosols of lower troposphere and the effect of humidity variations on their optical properties. AFCRL Tech. Rep. 79 0214. Air Force Cambridge Research Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA. 100 pp.
- Smirnov, Alexander., Brent N. Holben., Yoram J. Kaufman., Oleg Dubovik., Thomas E. Eck., Ilya Slutsker., Christophe Pietras and Rangasayi N. Halthore. 2002. Optical Properties of Atmospheric Aerosol in Maritime Environments. 59, 501-523.
- Tanré, D., L. R. Remer, Y. J. Kaufman, S. Mattoo, P. V. Hobbs, J. M. Livingston, P. B. Russell, and A. Smirnov. 1999. Retrieval of aerosol optical thickness and size distribution over ocean from the MODIS airborne simulator during TARFOX. *J. Geophys. Res.* 2261 - 2278.

-
- Tegen, I., and A. A. Lacis. 1996. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol. *J. Geophys. Res.* , 19, 237-19,244.
- Tegen, I., A. A. Lacis and I. Fung. 1996. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils. *Nature*, , 419-422.
- Toon, O. B., J. B Pollack, T. P. Ackerman, R. P. Turco, C. P. McKay & M.S. Liu. 1982. Evolution of an Impact Generated Dust Cloud and Its Effects on the Atmosphere. Geological Society of America Special Paper 190, Geological Implications of Large Asteroids and Comets on the Earth. 187-201.
- Torres, O., P.K. Bhartia, J.R. Herman, A. Sinyuk, Paul Ginoux, and Brent Holben. 2002. A Long-Term Record of Aerosol Optical Depth from TOMS Observations and Comparison to AERONET Measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 59, 398-413.
- Turco, R. P., O. B. Toon, T. P. Ackerman, J. B. Pollack and C. Sagan. 1983. Nuclear Winter: Global Consequences of Multiple Nuclear Explosions. *Science*. 222, 1283-1292.
- Twomey, S. 1977. *Atmospheric Aerosol: Developments in Atmospheric Science 7*. Elsevier. Amsterdam.
- Twomey, S.A., M. Piepgrass, and T.L. Wolfe. 1984. An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo. *Tellus*. 36, 256-366.
- Van de Hulst, H.C. *Light Scattering by Small Particles*. Dover Publications, Inc. New York, 1981.
- Vasilyev, O.B., A. Leyva Contreras., A. Muhlia Velázquez, R. Peralta y Fabi. 1995. Spectral optical properties of the polluted atmosphere of México City (spring-summer 1992). *J. Geophys. Res.* 100 (D12), 26027-26044.



CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES

ÓPTICAS DEL AEROSOL EN LA ZONA

SUROESTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE

LA CIUDAD DE MÉXICO



INTRODUCCIÓN

DIRECTA

Cambios en el clima de la Tierra.

INDIRECTA

Cambios en la microfísica de nubes, en el albedo de las partículas por esparcimiento simple de la radiación, y en la precipitación (Kaufman et al., 1997).



INTRODUCCIÓN

Los estudios de las propiedades ópticas de las partículas que forman el aerosol, se realizan utilizando:

- Satélites meteorológicos, como por ejemplo el Nimbus-7 y el Earth Probe.
- Fotómetros espectrales, conectados a la red AERONET (Aerosol Robotic Network).

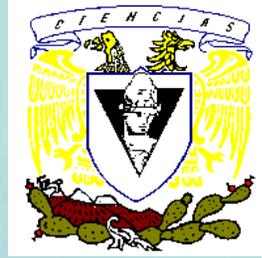
En la zona Suroeste de la Ciudad de México se encuentra en funcionamiento el fotómetro CIMEL, que desde marzo de 1999 ha estado conectado a la red AERONET.



INTRODUCCIÓN

El aerosol afecta el balance de radiación del sistema suelo-agua-atmósfera:

1. Al esparcir y absorber la radiación solar incidente.
2. Al esparcir y absorber la radiación solar reflejada desde la superficie de la Tierra.
3. Al influenciar la formación y el tiempo de vida de las nubes mediante la concentración y coagulación de gotas de agua, y en el caso de las nubes más frías (a temperaturas cercanas a los 0°C) al influenciar la formación de cristales.
4. Al esparcir y absorber la radiación infrarroja emitida en una atmósfera libre de nubes.
5. Al influenciar las nubes como en 3., y por lo tanto influenciar la radiación infrarroja emitida.



OBJETIVOS

- Se pretende contribuir al conocimiento de las propiedades ópticas del aerosol.
- Mostrar que las propiedades ópticas que pueden calcularse con el modelo creado en este trabajo no difieren significativamente de las propiedades ópticas proporcionadas en la base de datos AERONET.
- Determinar si existe o no un incremento en las propiedades ópticas mencionadas líneas arriba.
- Encontrar si hay o no diferencias entre las propiedades ópticas de las partículas aerosólicas entre la mañana y la tarde en cada uno de los cuatro años ya mencionados.
- Crear una base de datos en un CD.
- Guardar el paquete de programas construido en un CD.



geofísica



AEROSOL

DEFINICIÓN

El aerosol es un coloide formado por partículas (sólidas, líquidas o mixtas) que se encuentran en suspensión en el aire.

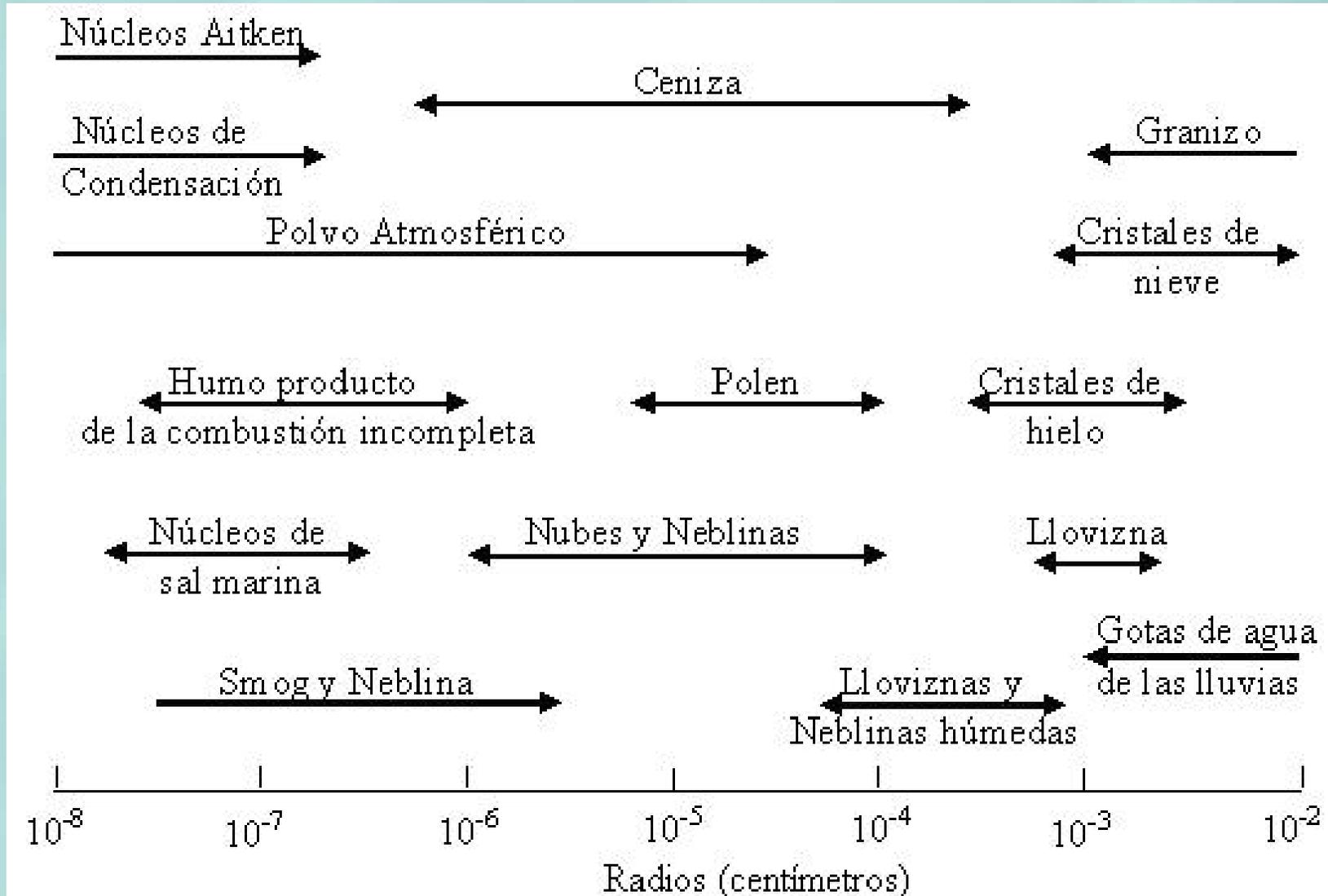
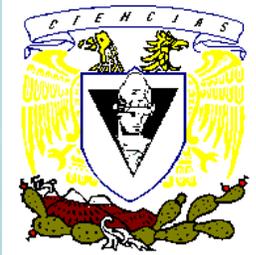
Las partículas forman la fase dispersa, mientras que el aire forma la fase continua.

- **Fase sólida: Humos, polvos.**
- **Fase líquida: Nieblas, vapores, nubes, neblinas.**



AEROSOL

DEFINICIÓN

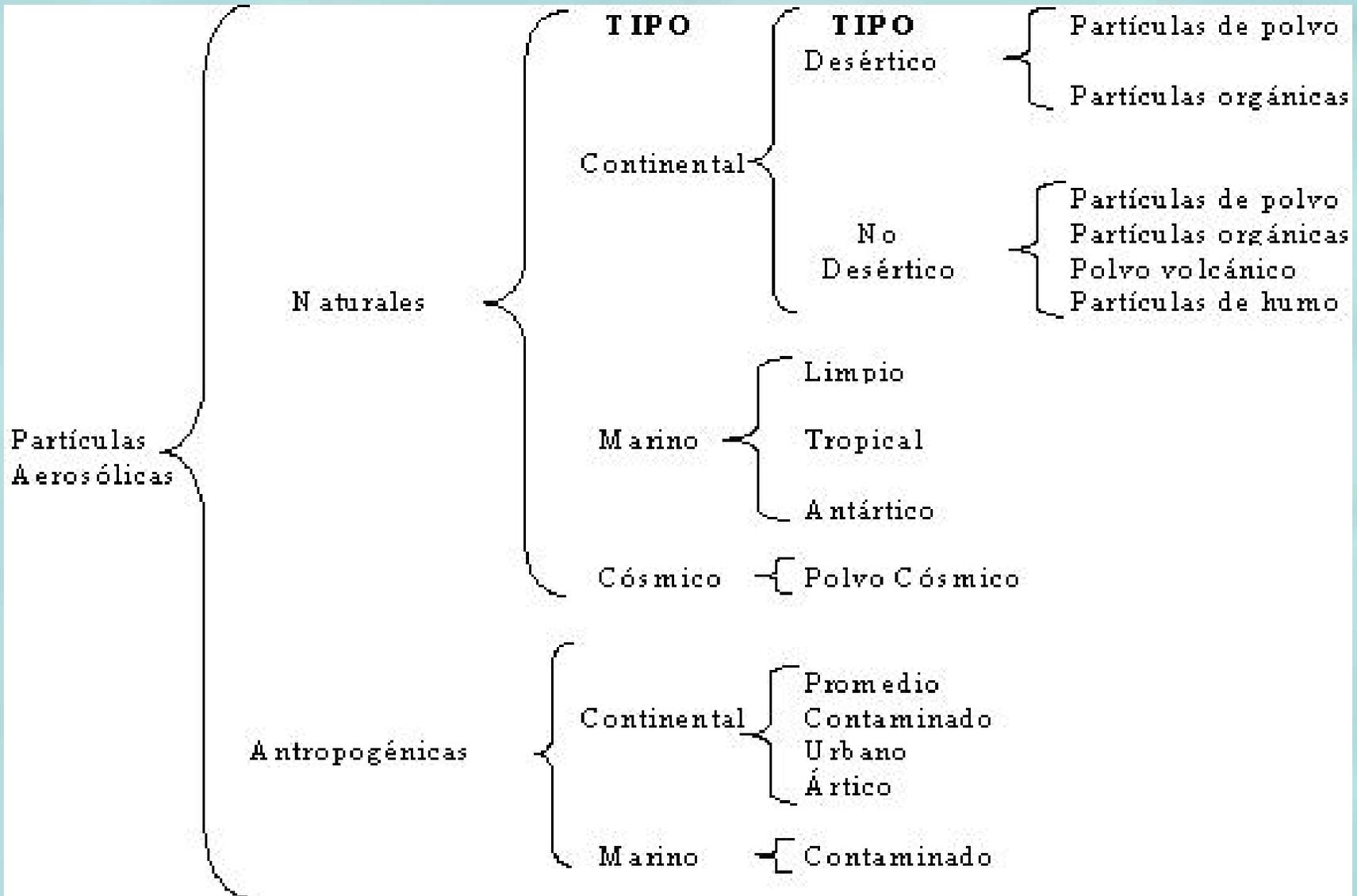




AEROSOL



CARACTERÍSTICAS



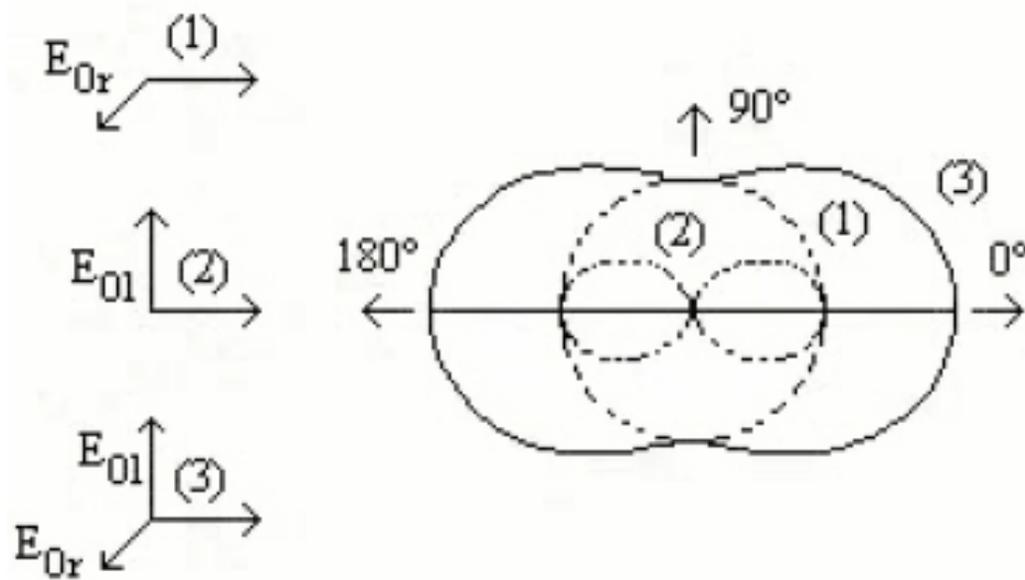


Fig. 2.4: Diagrama polar de la intensidad esparcida; (1) luz incidente polarizada con el vector eléctrico perpendicular al plano de esparcimiento, (2) luz incidente polarizada con el vector eléctrico sobre el plano de esparcimiento, y (3) luz incidente despolarizada. Tomada de Liou, K. N. 1980.



AEROSOL



FUENTES DE LAS PARTÍCULAS AEROSÓLICAS

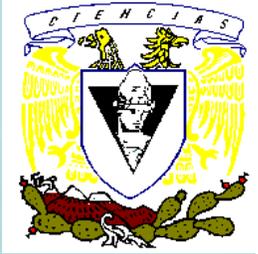
- **Las olas.** La composición del aerosol es casi completamente salino.
- **La vegetación.** Produce el 25% de las partículas troposféricas.
- **Fábricas, industrias y medios de transporte.**
- **Incendios forestales y volcanes.**

EN EL VALLE DE MÉXICO

- **Fuentes móviles.** 82% a autos particulares y 18% vehículos oficiales, transporte urbano y de carga.
- **Fuentes fijas.** Mayormente, establecimientos industriales en el Norte y Noroeste del Valle de México.
- **Fuentes naturales.** Tolvaneras.



AEROSOL



IMPORTANCIA

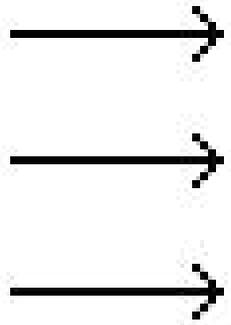
Hasta la década pasada cuando algunos científicos decidieron incorporar las propiedades ópticas de las partículas que forman el aerosol (Pender et al., 1994) y su interacción directa con la radiación térmica y solar (Twomey, 1984; Charlson et al., 1992; IPCC, 1994), en la creación de modelos climáticos para poder entender entre otros fenómenos, el efecto invernadero sobre los climas pasados y sobre el futuro cambio climático (Hansen, 2000). En consecuencia, las últimas versiones de los modelos climáticos, como las del National Center for Atmospheric Research (NCAR), incorporan los efectos del calentamiento por radiación del metano, óxidos de nitrógeno y CFC's (Briegleb, 1992).



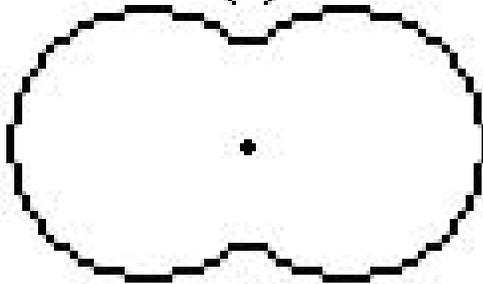
CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS



Luz incidente



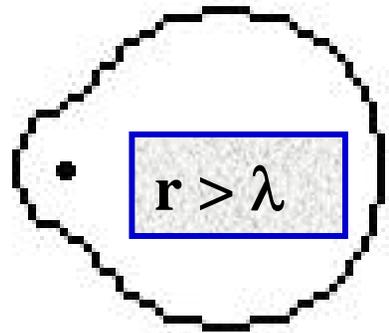
$$r \ll \lambda$$



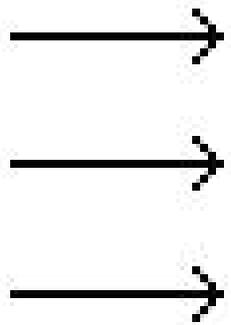
Esparcimiento de Rayleigh

(b)

$$r > \lambda$$

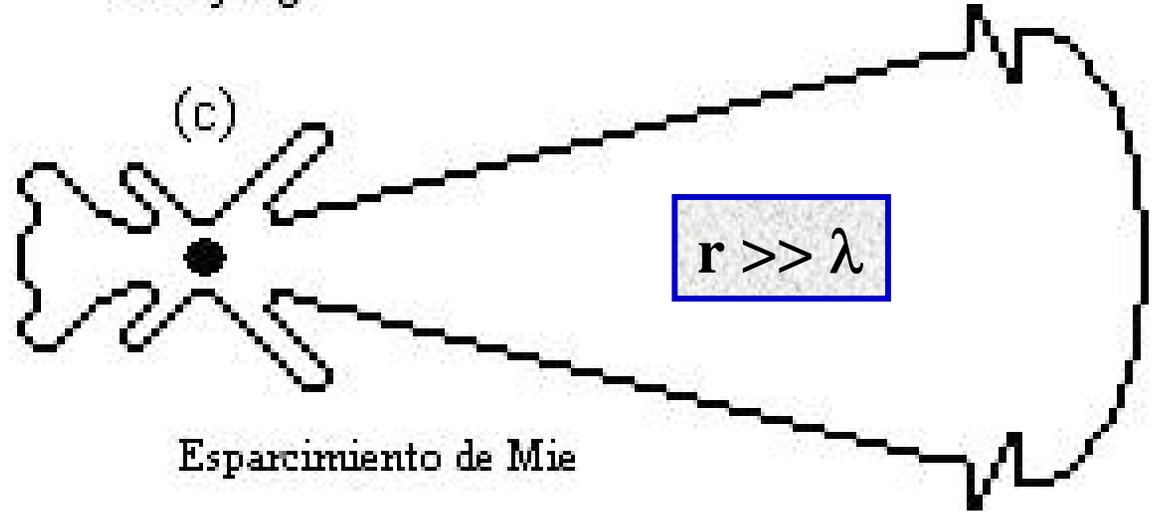


Esparcimiento de Mie



(c)

$$r \gg \lambda$$



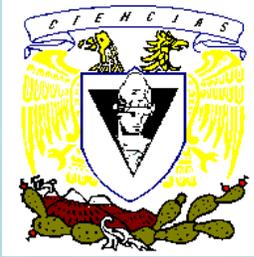
Esparcimiento de Mie



AEROSOL

TEORÍA DE ESPARCIMIENTO DE RAYLEIGH

Rayleigh, en su teoría de esparcimiento, considera un rayo de luz linealmente polarizado que incide sobre una partícula esférica, dieléctrica, homogénea e isotrópica, que tiene un radio mucho menor a la longitud de onda (λ) de la radiación incidente ($r \ll \lambda$).



AEROSOL

TEORÍA DE G. MIE

G. Mie, en su teoría de esparcimiento, considera un rayo de luz linealmente polarizado que ilumina a una partícula esférica, dieléctrica, homogénea e isotrópica, que tiene un radio mayor a la longitud de onda (λ) de la radiación incidente ($r > \lambda$).



AEROSOL

PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN SISTEMA DE PARTÍCULAS

$$\omega = \frac{\sigma_{esp}}{\sigma_{ext}} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{esp}(\lambda, m, r) f(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{ext}(\lambda, m, r) f(r) dr}$$

$$f(r) = \frac{dN_c}{d \log_{10} r} = \frac{3 \ln 10}{4\pi r^3} \frac{dV_c}{d \ln r}$$



AEROSOL

PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN SISTEMA DE PARTÍCULAS

Factor de Asimetría

$$g_{aerosol} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{esp}(\lambda, m, r) g(\lambda, m, r) f(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{esp}(\lambda, m, r) f(r) dr}$$



AEROSOL

PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN SISTEMA DE PARTÍCULAS

$$\tau_t(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}$$

Fórmula de turbiedad de Ångstrom

Donde β es el “Coeficiente de turbiedad de Ångstrom” y α el exponente de la longitud de onda λ .

$$\beta = (0.55)^\alpha \left(\frac{3.912}{Vis} - 0.01162 \right) [0.02472(Vis - 5) + 1.132]$$

Ecuación de McClatchey & Selby

Donde la Visibilidad está dada en kilómetros.



AEROSOL

PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN SISTEMA DE PARTÍCULAS

Masa óptica relativa

$$m_r = \frac{\int_0^{\infty} \rho ds}{\int_0^{\infty} \rho dz} \quad \text{Definición}$$

$$m_r = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}} \quad \text{Ecuación de Kasten}$$



METODOLOGÍA

INSTRUMENTACIÓN





METODOLOGÍA

INSTRUMENTACIÓN

El programa “*demonstrat*” prueba automáticamente la calidad de los datos en el almucantar, mediante la evaluación de la simetría de las radiancias del disco solar.

- **Aquellas parejas de radiancias que excedan el 10% del valor de la asimetría angular definida como $[(i-d)/(i+d)](5)$, donde i es el lado izquierdo y d es el lado derecho, serán eliminadas del proceso de inversión.**
- **Si la desviación estándar de la diferencia entre las parejas del disco solar, se divide por el valor promedio de las parejas angulares y se excede del 10%, o bien, si no hay un número suficiente de datos con simetría, los datos no son invertidos.**



METODOLOGÍA

SITIO DE MUESTREO

Las mediciones realizadas por el fotómetro solar CIMEL fueron llevadas a cabo en la zona Suroeste del Área Metropolitana de la Ciudad de México, ZMCM (Cd. Universitaria: 19°:20' N; 99°:11' W; 2268 msnm) cuyas características, producto de los altos niveles de contaminación por gases y específicamente por partículas, lo hacen de gran interés en cuanto que su estudio podría ayudar a un mejor conocimiento del comportamiento del balance de la energía de radiación en la atmósfera de esta zona.



METODOLOGÍA

BASE DE DATOS

- La base de datos de la red AERONET es pública y está disponible en la página web: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- Se utilizó la correspondiente a la Ciudad de México.

Almucantar Retrievals

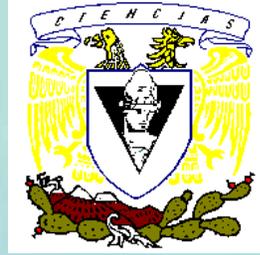
Total Only	Total/Fine/Coarse Modes
9. <input checked="" type="checkbox"/> Size Distribution	12. <input type="checkbox"/> Volume
10. <input checked="" type="checkbox"/> Refractive Index	13. <input type="checkbox"/> AOT Absorption
11. <input type="checkbox"/> AOT Coincident	14. <input type="checkbox"/> AOT Extinction
	15. <input checked="" type="checkbox"/> SSA
	16. <input checked="" type="checkbox"/> Asymmetry Factor
	17. <input checked="" type="checkbox"/> Phase Functions
<input type="checkbox"/> Select All Retrievals	18. <input type="checkbox"/> Combined Retrievals (9-16)

ALMUCANTAR RETRIEVAL MODELS				
Models	SPHERICAL	SPHEROID	COMBINED SPHERICAL AND SPHEROID	
Levels	<input type="radio"/> 1.5	<input type="radio"/> 1.5	<input type="radio"/> 2.0	
	<input checked="" type="radio"/> 2.0 (Spherical Particles)	<input type="radio"/> 2.0		
	<input type="radio"/> 2.0 (Non-spherical Particles)			
Data Mode	<input checked="" type="radio"/> Recommended Default Parameters		<input type="radio"/> User-defined Options	
User-defined Almucantar Retrieval Options				
Angles (No.)	Solar Zenith Angle Range		Spherical Sky Error Limit (%)	Spheroid Sky Error Limit (%)
Min	Min	Max	Max	Max
<input type="text" value="21"/>	<input type="text" value="25"/>	<input type="text" value="77"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="10"/>
Angstrom Parameter Limit (670-440)	Solar Zenith Angle (Fine Mode Filter)	AOT at 440nm (Fine Mode Filter)		
Max	Min	Min		
<input type="text" value="0.6"/>	<input type="text" value="45"/>	<input type="text" value="0.4"/>		

Data Format

All Points
 Daily Averages
 Monthly Averages

[Download](#)



METODOLOGÍA

REDUCCIÓN DE DATOS

- **Por comparación entre las fechas de los registros correspondientes a la distribución por tamaños de las partículas y del índice de refracción, se eligieron los días con datos que coincidieron.**
- **Entre el 5 de marzo de 1999 y el 7 de mayo de 2002, sólo coincidieron 237 fechas y horas.**



METODOLOGÍA

CÁLCULO DE PARÁMETROS ÓPTICOS

UTILIZACIÓN DE UN PAQUETE DE PROGRAMAS

- **Programas para calcular el**
 - 1. Factor de eficiencia de esparcimiento, extinción, absorción.**
 - 2. Factor de asimetría**

de las partículas individuales con radios que cubren un rango de 0.005 μm a 10.0 μm .

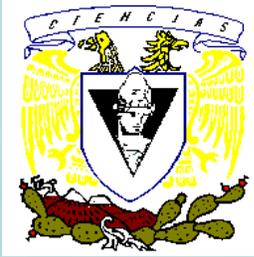


METODOLOGÍA

CÁLCULO DE PARÁMETROS ÓPTICOS

UTILIZACIÓN DE UN PAQUETE DE PROGRAMAS

- **Programas para calcular el**
 - 1. Espesor óptico de extinción, esparcimiento y absorción del aerosol.**
 - 2. Albedo por esparcimiento simple.**
 - 3. Factor de asimetría del aerosol.**
 - 4. Los coeficientes de turbiedad de Ångstrom.**
 - 5. Visibilidad (Km).**
 - 6. Función fase.**

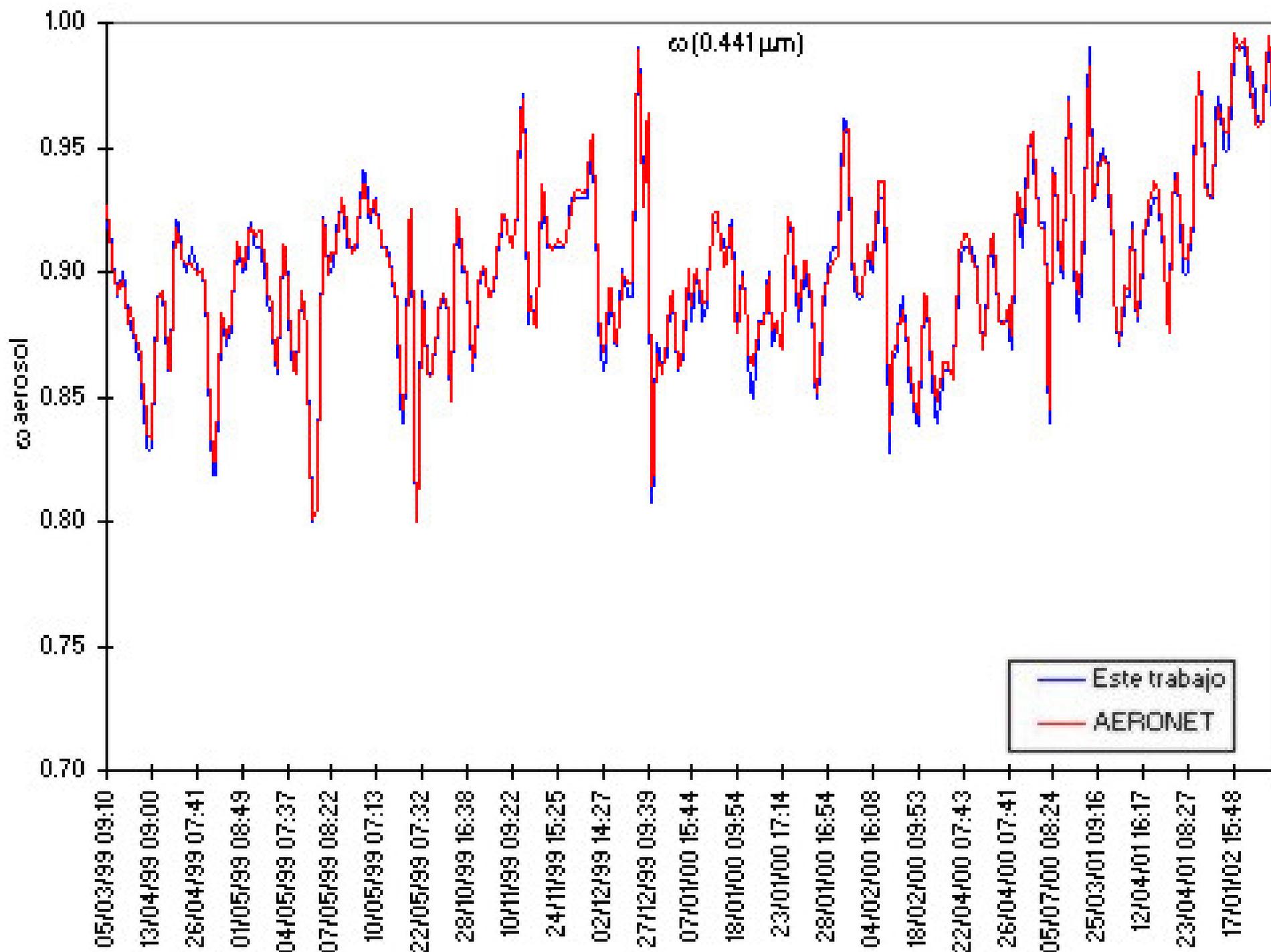


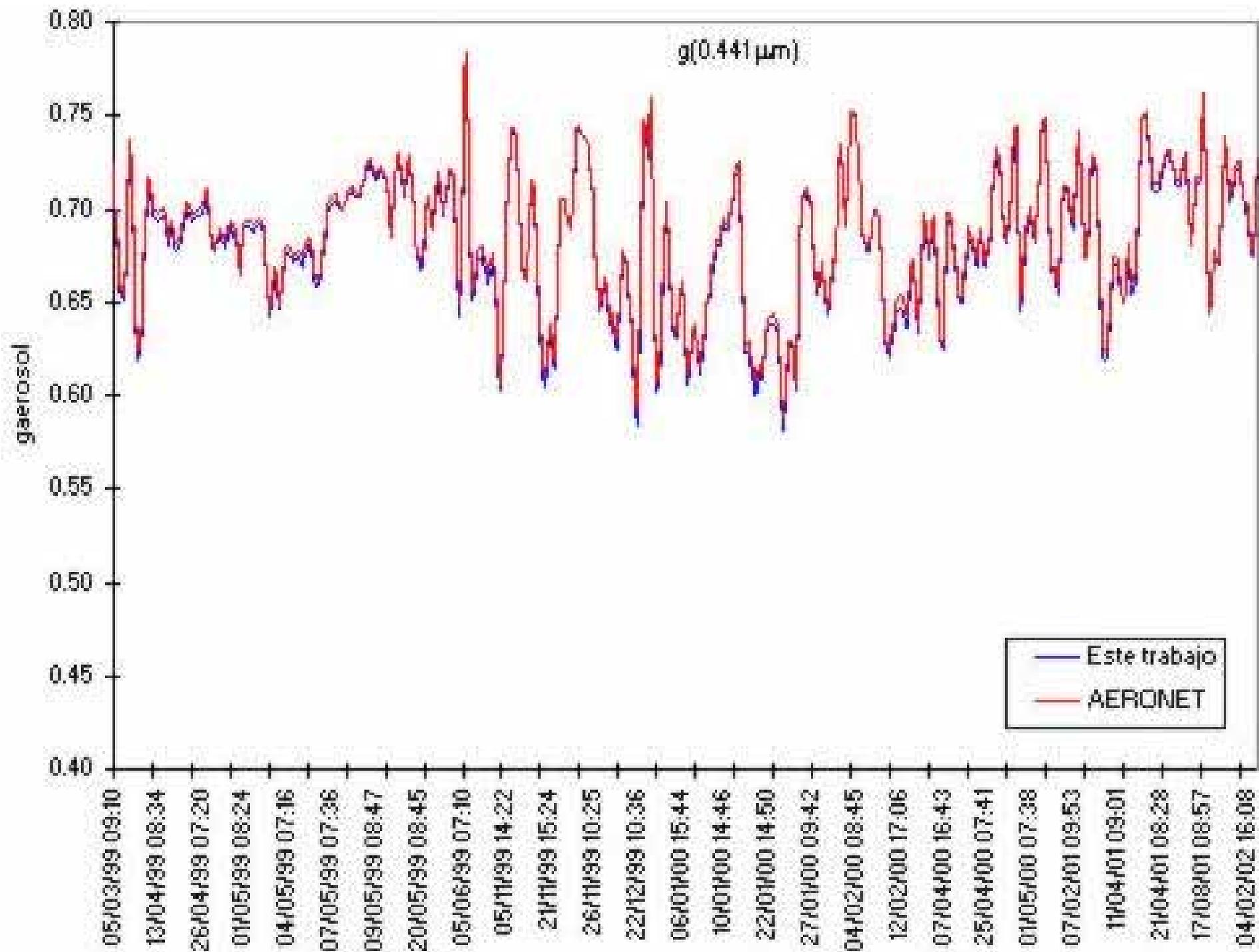
METODOLOGÍA

CÁLCULO DE PARÁMETROS ÓPTICOS

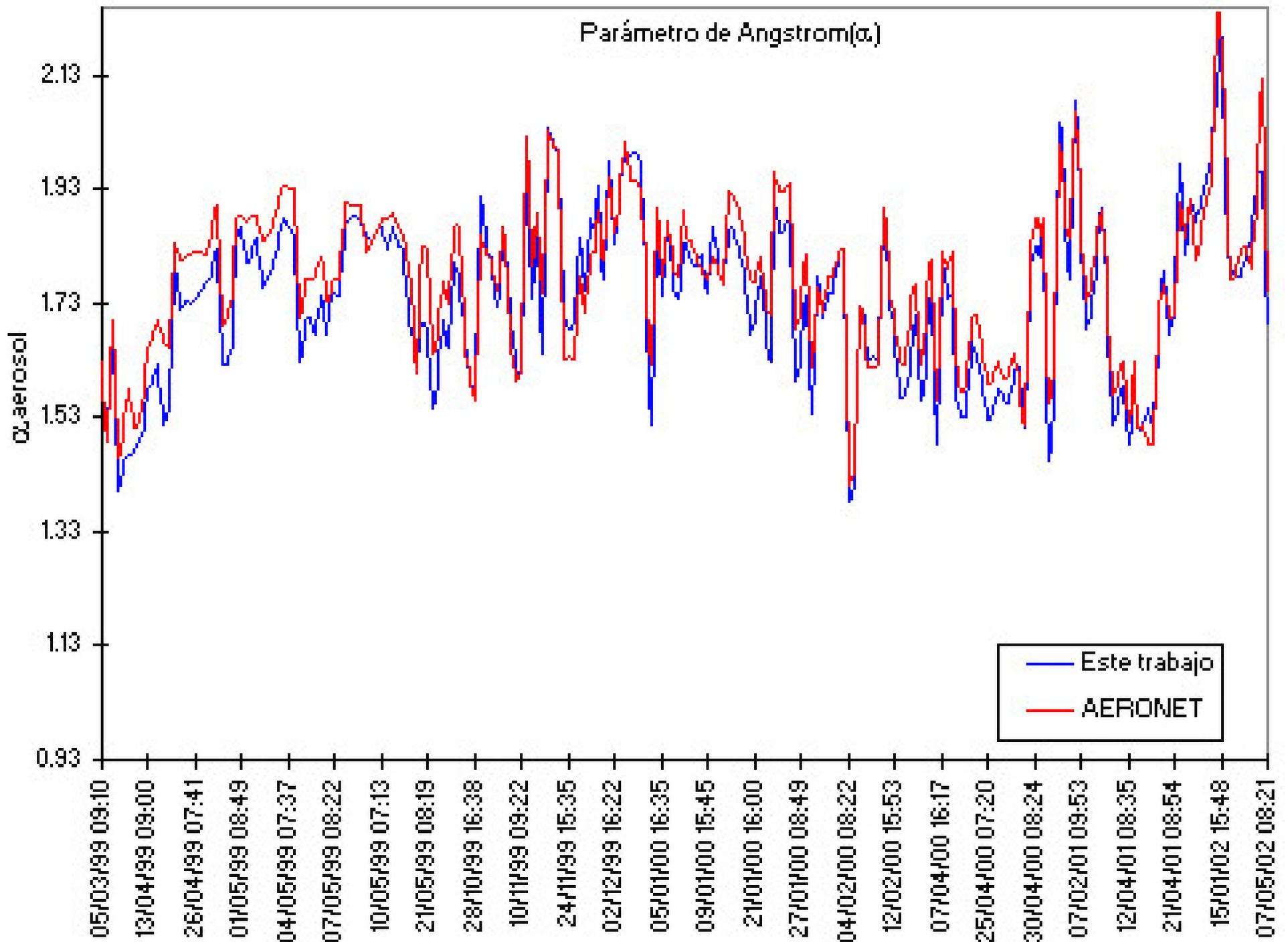
UTILIZACIÓN DE UN PAQUETE DE PROGRAMAS

t_{esp} y t_{ext} se calcularon aproximando esas integrales por sumas discretas usando el método de los trapezoides, considerando un rango de radios que van desde $\lambda = 0.050 \mu\text{m}$ a $\lambda = 10.0 \mu\text{m}$, y al que se le ha hecho una partición en subintervalos de longitud $dr = 0.005\mu\text{m}$. Esto exige que los sumandos (integrandos) se evalúen en cada uno de los radios correspondientes a cada punto medio de los subintervalos de la partición, considerando fijos los valores de λ y m .

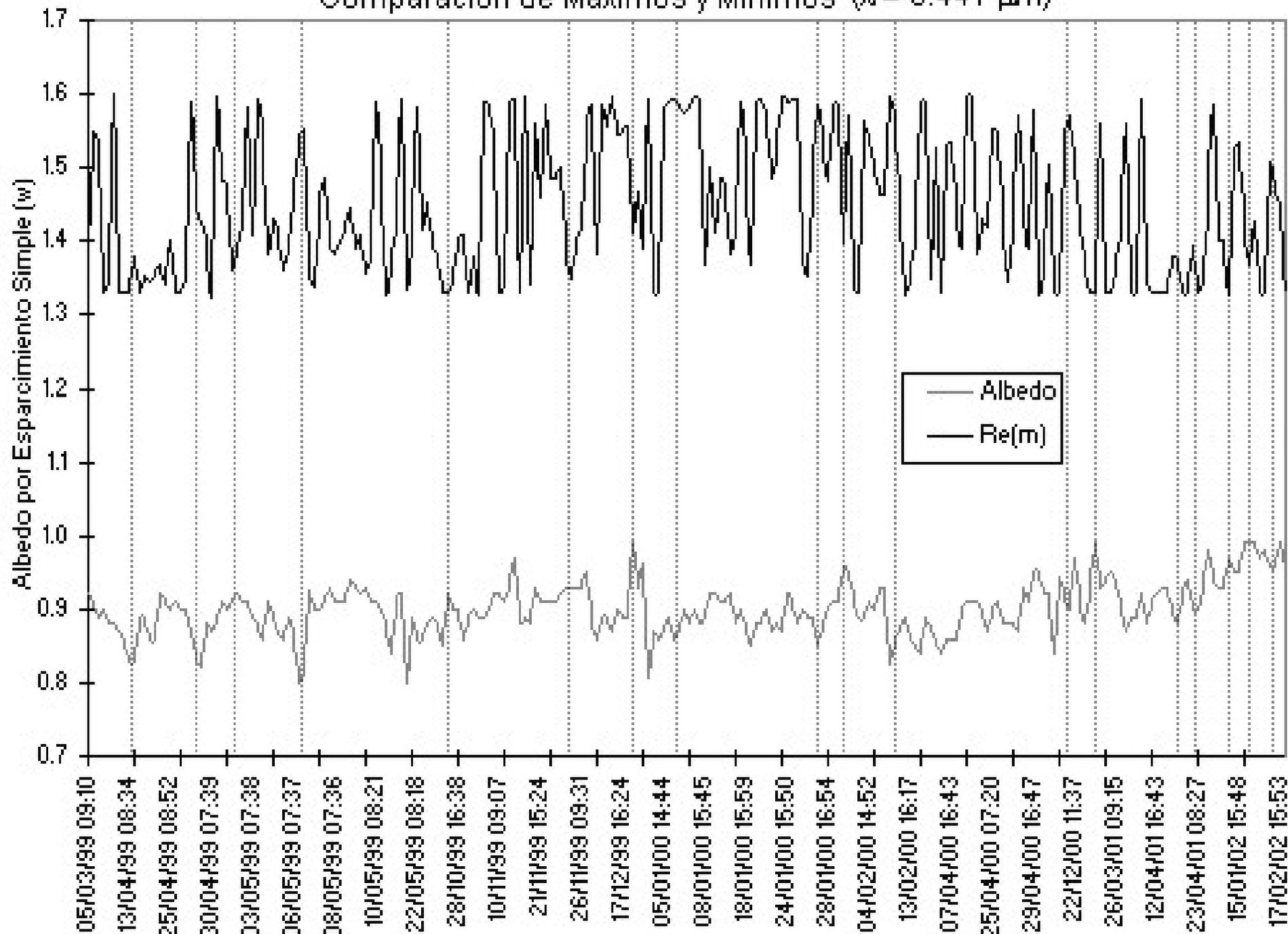




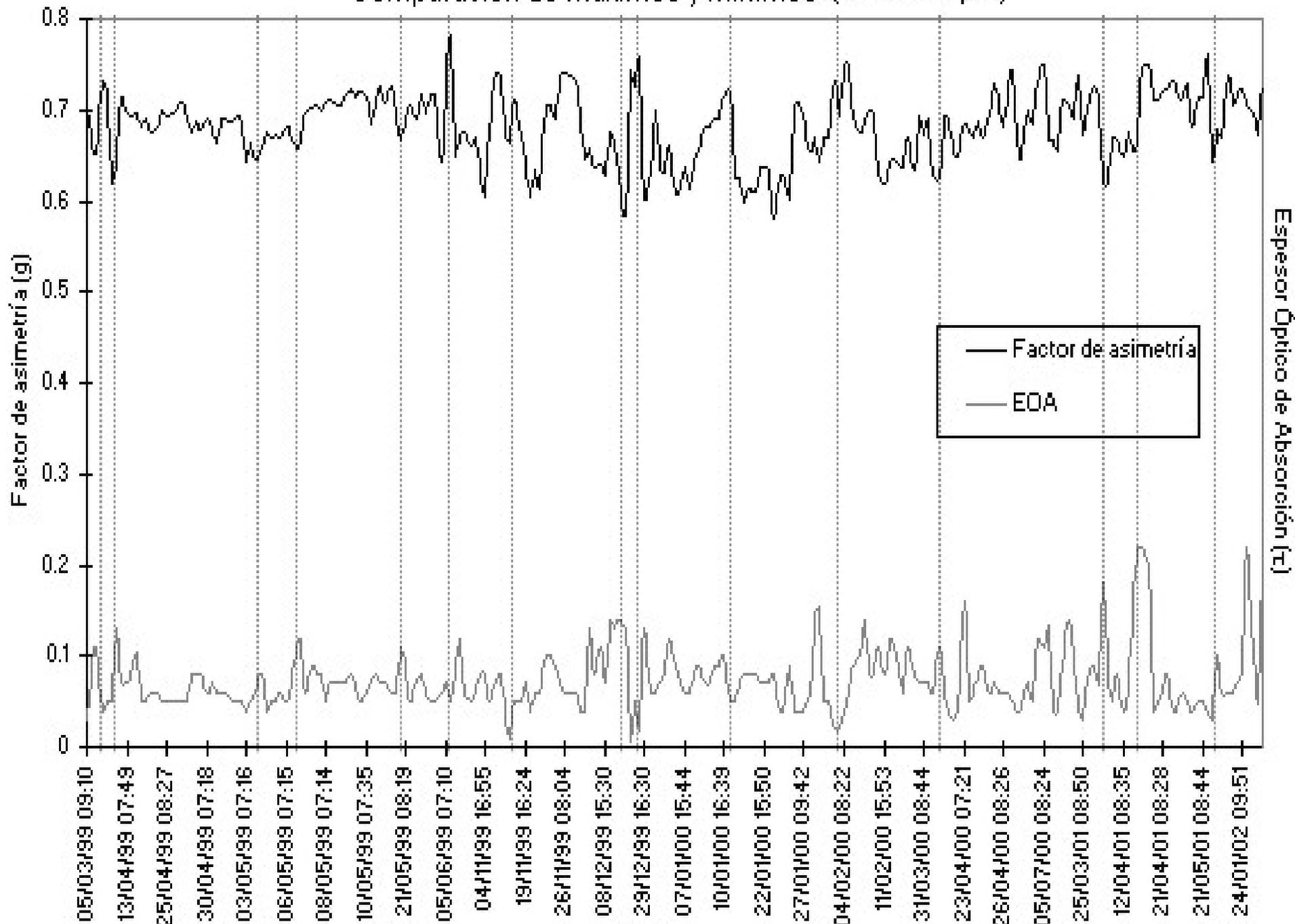
Parámetro de Ångstrom(α)



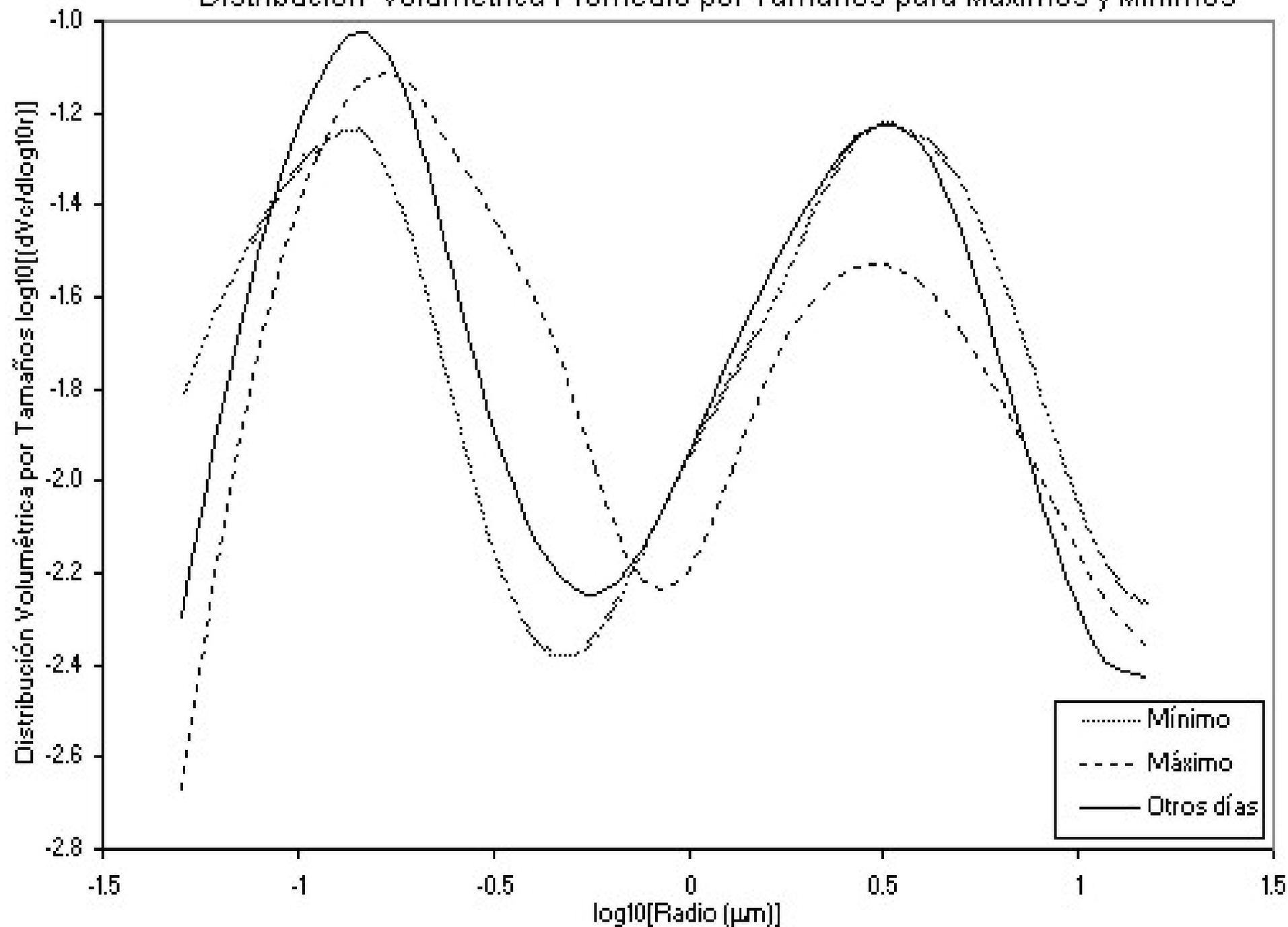
Comparación de Máximos y Mínimos ($\lambda = 0.441 \mu\text{m}$)



Comparación de máximos y mínimos ($\lambda = 0.441 \mu\text{m}$)



Distribución Volumétrica Promedio por Tamaños para Máximos y Mínimos





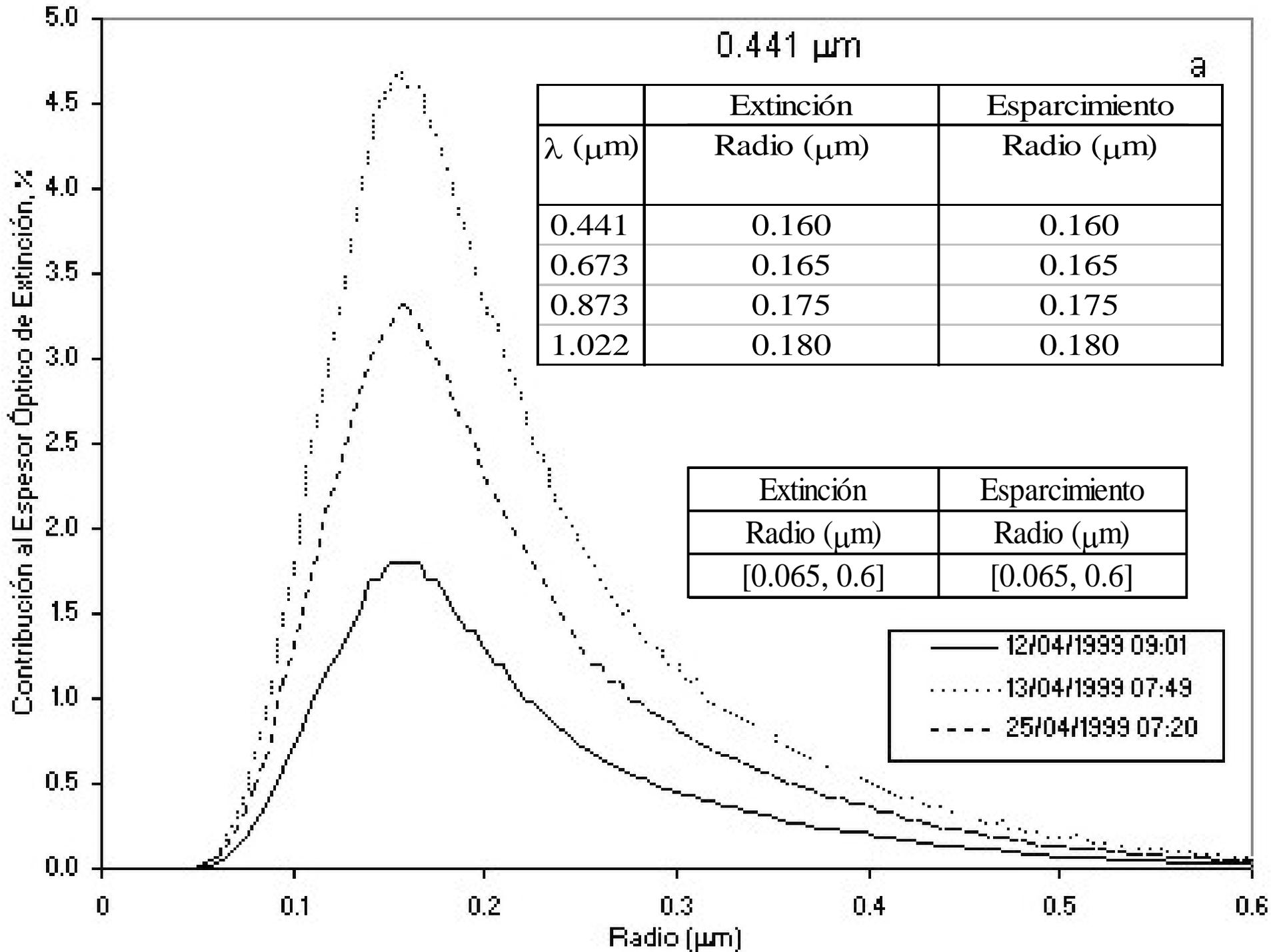
ANÁLISIS

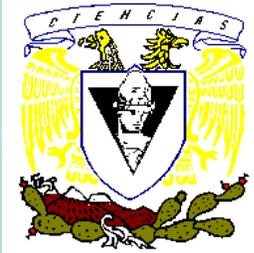
Aerosol tipo urbano-industrial y mixto

Propiedades ópticas	GSFC, Greenbelt, Maryland (1993-2000)	Creteil-París, Francia (1999)	Ciudad de México (1999-2000)	Maldivas (INDOEX) (1999-2000)	Ciudad de México (Este trabajo) (1999-2002)
Número de mediciones	200 (Jun-Sep)	40 (Jun-Sep)	300	150 (Ene-Abr)	237
Rango del parámetro de Ångstrom (α)	$(\tau \sim \lambda^{-\alpha})$ $1.2 \leq \alpha \leq 2.5$	$(\tau \sim \lambda^{-\alpha})$ $1.2 \leq \alpha \leq 2.3$	$(\tau \sim \lambda^{-\alpha})$ $1.0 \leq \alpha \leq 2.3$	$(\tau \sim \lambda^{-\alpha})$ $0.4 \leq \alpha \leq 2.0$	$(\tau = \beta \lambda^{-\alpha})$ $1.2 \leq \alpha \leq 2.2$ $0.07 \leq \beta \leq 0.38$
g 0.440/0.670/0.870/1.022	0.68/0.59/0.54/0.53 ± 0.08	0.68/0.61/0.58/0.57 ± 0.07	0.68/0.61/0.58/0.57 ± 0.07	0.74/0.67/0.64/0.63 ± 0.007	0.68/0.60/0.56/0.54 ± 0.04
Re(m)	(A 0.440 μm) $1.41 - 0.03\tau(0.440)$ ± 0.01	(A 0.440 μm) 1.40 ± 0.03	(A 0.440 μm) 1.47 ± 0.03	(A 0.440 μm) 1.44 ± 0.02	(A 0.441 μm) 1.45 ± 0.01
Im(m)	0.003 ± 0.003	0.009 ± 0.004	0.014 ± 0.006	0.011 ± 0.007	0.016 ± 0.008
ω 0.440/0.670/0.870/1.022	0.98/0.97/0.96/0.95 ± 0.02	0.94/0.93/0.92/0.91 ± 0.03	0.90/0.88/0.85/0.83 ± 0.02	0.91/0.89/0.86/0.84 ± 0.03	0.89/0.87/0.84/0.83 ± 0.04

Referencia:

Dubovik, Oleg., Brent Holben, Thomas F. Eck, Alexander Smirnov, Yoram J. Kaufman, Michael D. King, Didier Tanré & Ilya Slutsker. 2002. *Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations*. Journal of the Atmospheric Sciences. **59**, 590-608.





ANÁLISIS

PRUEBAS DE NORMALIDAD

Para un m_r de	el intervalo es
1.7	[1.65, 1.75]
2	[1.95, 2.05]
3	[2.95, 3.05]
4	[3.95, 4.05]

Tabla de intervalos para la agrupación de datos invertidos.

		Normal	No Normal	1 o 2 datos	Vacío	Total
$\omega_{aerosol}$	Mañana	37	3	4	20	64
$\omega_{aerosol}$	Tarde	20	4	21	19	64
$\rho_{aerosol}$	Mañana	37	3	4	20	64
$\rho_{aerosol}$	Tarde	23	1	20	20	64
Total		117	11	49	79	256

Resumen de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.



ANÁLISIS

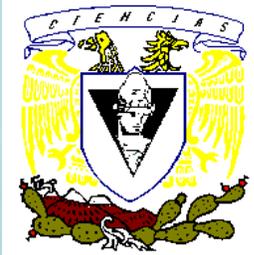
COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS

		Iguales	Diferentes	Vacío	Total
$\omega_{aerosol}$	Mañana	23	5	20	48
$\omega_{aerosol}$	Tarde	32	0	16	48
$\rho_{aerosol}$	Mañana	28	0	20	48
$\rho_{aerosol}$	Tarde	32	0	16	48
Total		115	5	72	192

Resumen de la comparación entre medias por año

	Iguales	Diferentes	Vacío	Total
$\omega_{aerosol}$	44	0	20	64
$\rho_{aerosol}$	39	5	20	64
Total	83	5	40	128

Resumen de la comparación entre medias antes y después del medio día



ANÁLISIS

COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS

		Medias en la mañana							
		$\omega_{aerosol}$				$g_{aerosol}$			
m_r	$\lambda(\mu m)$	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	0.441	0.875	0.850	0.931	----	0.6906	0.6673	0.7147	----
1.7	0.673	0.853	0.850	0.913	----	0.6007	0.6010	0.6247	----
1.7	0.873	0.820	0.847	0.893	----	0.5496	0.5643	0.5773	----
1.7	1.022	0.800	0.830	0.884	----	0.5317	0.5560	0.5614	----
2	0.441	0.887	0.896	0.922	0.965	0.6964	0.6951	0.7052	0.7220
2	0.673	0.871	0.894	0.895	0.965	0.6060	0.6111	0.6163	0.6220
2	0.873	0.840	0.881	0.870	0.955	0.5450	0.5637	0.5627	0.5690
2	1.022	0.820	0.869	0.856	0.945	0.5280	0.5474	0.5458	0.5545
3	0.441	0.894	0.899	----	----	0.7016	0.6979	----	----
3	0.673	0.876	0.891	----	----	0.5974	0.6120	----	----
3	0.873	0.836	0.866	----	----	0.5424	0.5650	----	----
3	1.022	0.812	0.848	----	----	0.5155	0.5500	----	----
4	0.441	0.902	0.890	----	----	0.6987	0.6990	----	----
4	0.673	0.878	0.876	----	----	0.5939	0.6085	----	----
4	0.873	0.837	0.846	----	----	0.5394	0.5635	----	----
4	1.022	0.813	0.828	----	----	0.5227	0.5511	----	----

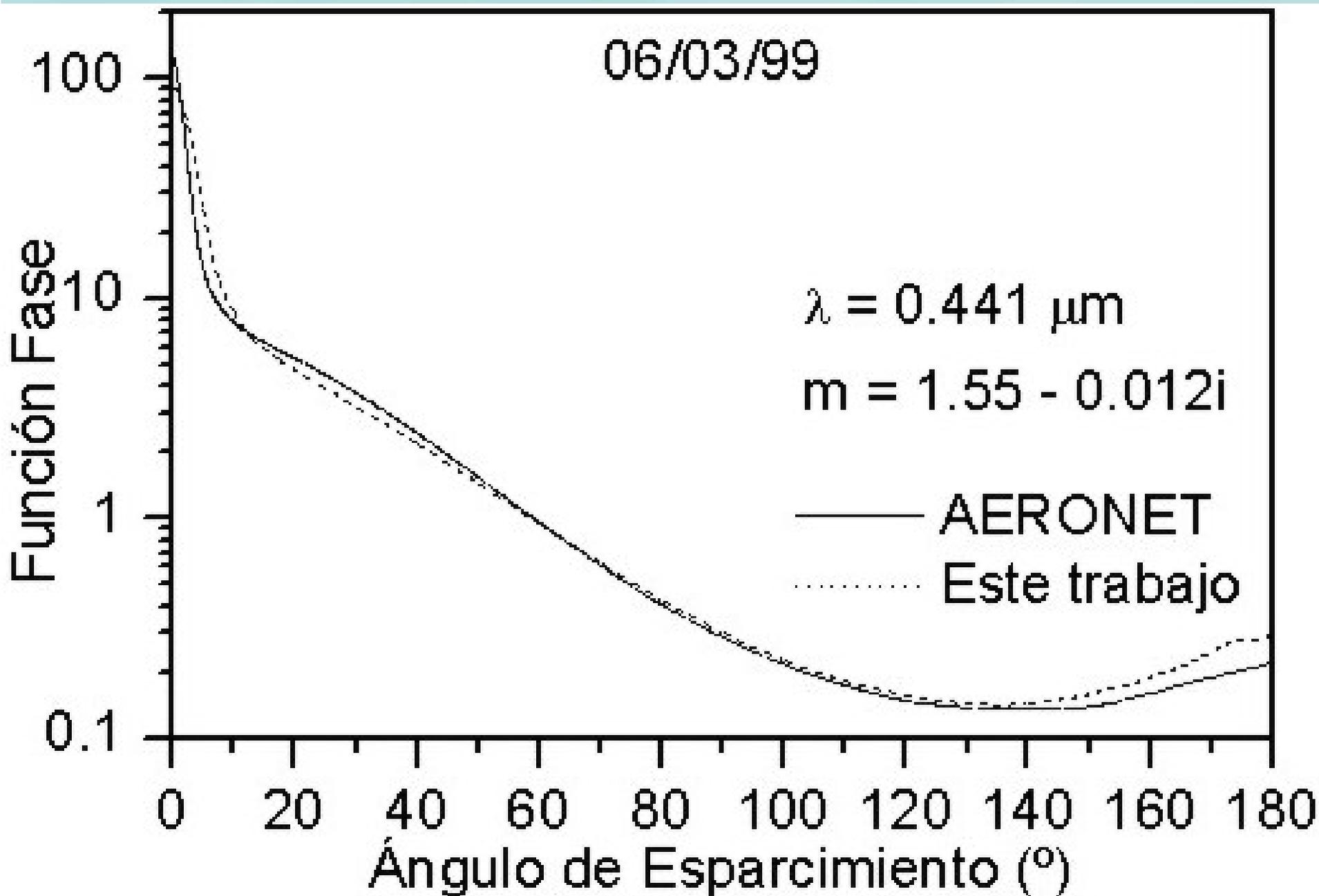
		Medias en la tarde							
		$\omega_{aerosol}$				$g_{aerosol}$			
m_r	$\lambda(\mu m)$	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	0.441	0.880	0.875	0.893	0.990	0.6520	0.6315	0.6200	0.6740
1.7	0.673	0.855	0.855	0.863	0.980	0.5650	0.5635	0.5420	0.5740
1.7	0.873	0.835	0.835	0.860	0.980	0.5405	0.5445	0.5260	0.5250
1.7	1.022	0.830	0.835	0.860	0.890	0.5395	0.5540	0.5377	0.5240
2	0.441	0.900	0.892	0.920	0.967	0.6723	0.6521	0.6610	0.6813
2	0.673	0.880	0.875	0.900	0.957	0.6110	0.5833	0.5470	0.5937
2	0.873	0.843	0.856	0.900	0.940	0.5733	0.5517	0.5120	0.5333
2	1.022	0.820	0.855	0.900	0.930	0.5603	0.5483	0.5180	0.5183
3	0.441	0.886	0.893	----	----	0.6530	0.6369	----	----
3	0.673	0.879	0.864	----	----	0.6003	0.5596	----	----
3	0.873	0.853	0.834	----	----	0.5705	0.5311	----	----
3	1.022	0.841	0.823	----	----	0.5634	0.5324	----	----
4	0.441	0.895	0.885	----	----	0.6170	0.5965	----	----
4	0.673	0.875	0.860	----	----	0.5640	0.5310	----	----
4	0.873	0.835	0.820	----	----	0.5315	0.5180	----	----
4	1.022	0.820	0.805	----	----	0.5210	0.5330	----	----

$$\omega \geq 0.800$$

$$g \geq 0.5155$$

Tabla de medias en la mañana y en la tarde para el albedo por esparsamiento simple y el factor de asimetría.

Nota: Los números sombreados con gris son las medianas de los grupos que no tuvieron una distribución normal.





ANÁLISIS

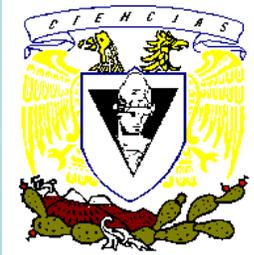
COEFICIENTES DE TURBIEDAD DE ÅNGSTROM Y VISIBILIDAD

		Normal	No Normal	1 o 2 datos	Vacío	Total
Alfa	Mañana	10	0	1	5	16
Alfa	Tarde	6	0	6	4	16
Beta	Mañana	9	1	1	5	16
Beta	Tarde	6	0	6	4	16
Visibilidad	Mañana	10	0	1	5	16
Visibilidad	Tarde	6	0	6	4	16
Total		47	1	21	27	96

. Resumen de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

		Iguals	Diferentes	Vacío	Total
Alfa	Mañana	6	1	5	12
Alfa	Tarde	8	0	4	12
Beta	Mañana	7	0	5	12
Beta	Tarde	8	0	4	12
Visibilidad	Mañana	7	0	5	12
Visibilidad	Tarde	8	0	4	12
Total		44	1	27	72

Resumen de la comparación entre medias por año.



ANÁLISIS

COEFICIENTES DE TURBIEDAD DE ÅNGSTROM Y VISIBILIDAD

	Iguales	Diferentes	Vacío	Total
Alfa	10	1	5	16
Beta	11	0	5	16
Visibilidad	11	0	5	16
Total	32	1	15	48

Intervalo	Partículas
[0,1]	Muy grandes
(1,2]	Grandes
(2,3]	Pequeñas
(3,4]	Muy pequeñas

Resumen de la comparación entre medias antes y después del medio día.

Intervalos para el parámetro de Ångstrom

	Medias en la mañana				Medias en la tarde			
	alfa (α)				alfa (α)			
m_r	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	1.7070	1.6880	1.7007	-----	1.3880	1.6790	1.5860	1.9610
2	1.7070	1.6506	1.6932	1.7345	1.7307	1.7266	1.5060	2.0363
3	1.7276	1.5859	-----	-----	1.6890	1.7509	-----	-----
4	1.7257	1.5620	-----	-----	1.9090	1.8225	-----	-----

Medias en la mañana y en la tarde del parámetro de Ångstrom (α).



ANÁLISIS

COEFICIENTES DE TURBIEDAD DE ÅNGSTROM Y VISIBILIDAD

	Medias en la mañana				Medias en la tarde			
	beta (β)				beta (β)			
m_r	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	0.144	0.130	0.139	-----	0.185	0.235	0.200	0.090
2	0.143	0.130	0.135	0.135	0.223	0.213	0.260	0.133
3	0.142	0.173	-----	-----	0.189	0.217	-----	-----
4	0.138	0.148	-----	-----	0.215	0.140	-----	-----

Intervalo	Cantidad
[0.0, 0.1]	Muy pocas
(0.1, 0.2]	Pocas
(0.2, 0.3]	Muchas
(0.3, 0.4]	Demasiadas

Medias en la mañana y en la tarde del coeficiente de turbiedad de Ångstrom (β).

Intervalos para el coeficiente de turbiedad de Ångstrom

Nota: El número sombreado con gris es la mediana del grupo que no tuvo una distribución normal.

	Medias en la mañana				Medias en la tarde			
	Visibilidad (Km)				Visibilidad (Km)			
m_r	1999	2000	2001	2002	1999	2000	2001	2002
1.7	13.38	15.47	13.67	-----	13.15	7.45	10.27	19.10
2	13.94	13.90	14.67	13.75	9.00	9.20	7.20	12.87
3	13.69	12.64	-----	-----	10.19	8.51	-----	-----
4	14.07	14.48	-----	-----	7.10	12.25	-----	-----

Atmósfera	β	α	Visibilidad (Km)
Limpia	0.00	1.30	340
Clara	0.10	1.30	28
Turbia	0.20	1.30	11
Muy Turbia	0.40	1.30	<5

Parámetros para varios grados de turbiedad. Tomada Iqbal, M. (1983).

Medias en la mañana y en la tarde de la visibilidad.

Nota: La visibilidad presentada en esta tabla no es en dirección horizontal, sino en dirección del almucantar.



APLICACIONES

Las propiedades ópticas del aerosol, tienen una participación fundamental en la solución de la ecuación de la transferencia de radiación en sus formas simplificadas (Grenoble, 1984).



CONCLUSIONES

- La diferencia entre los albedos y los factores de asimetría varía entre el 0% y el 1.1 %, y la diferencia entre los parámetros de Ångstrom varía entre el 0% y el 8.9 %.
- Mínimos y máximos locales.
- Distribución volumétrica por tamaños.
- Las partículas aerosólicas de la Ciudad de México y de las Maldivas esparcen menos radiación que el aerosol de Greenbelt, Maryland. En Creteil, París este esparcimiento es intermedio.
- Las partículas ópticamente activas tienen radios entre 0.065µm 0.6µm. Estas constituyen aproximadamente el 5.4% del total. (Picos)



CONCLUSIONES

- La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las propiedades ópticas muestran que la mayor parte de los grupos estudiados provienen de una distribución normal.
- La función fase es muy parecida a 0.441 mm , y difiere un poco entre los ángulos de esparcimiento de 30° y 180° a $0.673 \text{ }\mu\text{m}$, $0.873 \text{ }\mu\text{m}$ y $1.022 \text{ }\mu\text{m}$
- Las comparación entre las medias muestran que no hay una diferencia significativa entre los cuatro años, y entre la mañana y la tarde de cada año.
- Las propiedades ópticas del aerosol no cambiaron significativamente de 1999 a 2001.



CONCLUSIONES

- El aerosol está formado por partículas con radios entre $0.1 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$ que aumentan en cantidad de la mañana a la tarde y que esparcen la radiación que incide sobre ellas predominantemente hacia delante.
- Se creó una base de datos.
- Se guardaron los programas construidos en un CD.



AGRADECIMIENTOS

Dr. Agustín Muhlia V.
Dr. Martín J. Montero M.
Dr. Darrel Gibson B.
Dr. Amando Leyva C.
M. en C. Guillermo Montero M.
Dr. Brent Holben
CONACYT