

COLABORACIONES EN FÍSICA

CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA CIUDAD DE MADRID MEDIANTE UN MÉTODO DE ANÁLISIS DE IMAGEN DIGITAL

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años y con mayor intensidad, en las últimas semanas venimos asistiendo en nuestra ciudad, Madrid, a continuos avisos por parte de las autoridades locales respecto a niveles elevados de contaminación ambiental, y las consecuentes medidas tales como la reducción de la velocidad de los vehículos en las distintas carreteras de la ciudad o la prohibición de circulación para vehículos matrícula par/impar... todo ello con el objetivo reducir dichos niveles de contaminación. La presencia de contaminación atmosférica en el aire que respiramos tiene repercusiones importantes, a corto plazo y de una manera directa sobre la salud de las personas, a largo plazo y de un modo directo sobre el balance radiativo del planeta y por tanto sobre el clima en que vivimos.

La motivación principal de éste trabajo, parte inicialmente de la gran cantidad de imágenes que aparecen en medios de comunicación en relación a la contaminación, imágenes en las que se muestra sobre la ciudad un estra-

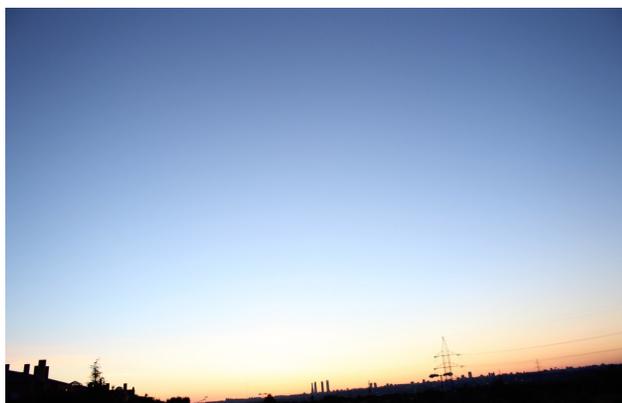


Figura 1. ¿Podemos obtener información cualitativa y cuantitativa sobre la contaminación presente en la atmósfera a partir de una imagen tomada con una cámara de fotos?

to más oscuro, correspondiente a la contaminación atmosférica existente. La pregunta en éste sentido es, ¿Podemos a partir de una imagen tomada con una cámara de fotos obtener información cualitativa y cuantitativa, es decir caracterizar la contaminación existente en la atmósfera?

EL AEROSOL ATMOSFÉRICO

La atmósfera en su estado natural es un gas formado principalmente por moléculas de oxígeno, nitrógeno, y trazas de argón e hidrógeno. Este gas en condiciones reales incluye también gotas de vapor de agua condensado así como partículas de polvo arrastradas por el viento de forma natural o bien secundarias a la actividad humana (procesos industriales, entornos urbanos, actividad agrícola). A esta dispersión de partículas sólidas o líquidas, ambas microscópicas en un medio gaseoso se la conoce como aerosol.

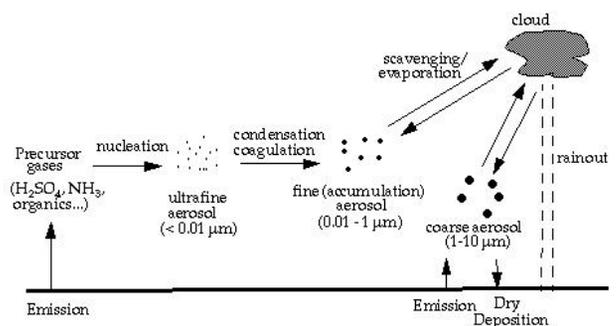


Figura 2. Producción, crecimiento y eliminación del aerosol atmosférico. Fuente: [1].

El proceso de conversión del gas atmosférico en aerosol (de tamaños de partículas de diferente) incluye reacciones muy complejas, cuyo resultado es la transformación del gas atmosférico en un aerosol atmosférico.

El aerosol atmosférico es importante por diversas razones, en primer lugar la presencia del aerosol en la atmósfera, modifica el balance radiativo terrestre, interactuando con la radiación solar y terrestre (dispersión, absorción, reflexión), y en segundo lugar, en aquellas ciudades de intensa actividad antropogénica (como Madrid) la presencia del aerosol atmosférico tiene efectos inmediatos sobre la salud de las personas. Éstos indujeron a la creación de recomendaciones internacionales

sobre la calidad del aire por parte de la Organización Mundial de la Salud [2]. Los valores establecidos en dichas recomendaciones fueron traspuestos a la legislación española y son de aplicación en la actualidad en la Comunidad de Madrid, la cual, a través de la Red de Calidad del aire de la Comunidad de Madrid ofrece informes diarios sobre la presencia en el aire de los distintos tipos de partículas.

LA INTERACCIÓN DE LA LUZ DEL SOL CON EL AEROSOL ATMOSFÉRICO

La luz del sol y la radiación electromagnética de origen terrestre, interaccionan con el aerosol atmosférico. Cuando una onda electromagnética alcanza una partícula del aerosol, ésta puede penetrar (refracción) en la partícula y ser capaz de atravesarla (atenuándose en intensidad) o no ser capaz de atravesarla en cuyo caso se dice es absorbida por la partícula, también puede ser reflejada, o difractada. Todos estos mecanismos toman energía de la onda electromagnética incidente y la dispersan, en todas direcciones. Por tanto en la dispersión de la radiación electromagnética una partícula alcanzada por una onda electromagnética pasa a ser emisora de la energía dispersada.

Las características de la intensidad de la radiación electromagnética dispersada depende del tamaño (diámetro) de la partícula dispersante (d_p) en relación a la longitud de onda incidente. Así cuando el tamaño de la partícula dispersante es mucho menor que la longitud de onda incidente ($d_p \ll \lambda$) la dispersión es tipo Rayleigh [3], en cuyo caso la intensidad de la onda irradiada es proporcional a λ^{-4} , independientemente de la forma de la partícula con máximos de energía dispersada en las direcciones posterior y anterior a la dirección de la onda electromagnética incidente. Cuando $d_p \gg \lambda$ la interacción de la onda electromagnética con la partícula puede tratarse como si ésta fuera un cuerpo limitado por una superficie plana, y por tanto el problema se reduce al ámbito de la óptica geométrica y la ley de Snell.

Cuando el diámetro de la partícula y la longitud de onda incidente son comparables ($d_p \sim \lambda$), no son aplicables la teoría de Rayleigh (porque el campo electromagnético deja de ser constante para la partícula que interacciona) ni la óptica geométrica (porque la partícula no es lo suficientemente grande). En este rango de tamaño de partícula $d_p \sim \lambda$ se aplica la Teoría de Mie de la dispersión (Mie, 1908) [3] que resuelve el problema general

de la dispersión y absorción de una onda plana electromagnética con una partícula esférica dieléctrica, homogénea e isotrópica [3] mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell dentro y fuera de la partícula esférica con condiciones de frontera adecuadas. La Teoría de Mie es general, y a partir de la misma se llega a las aproximaciones de Rayleigh y de la óptica geométrica en los ámbitos de aplicación de cada una de ellas.

LA LEY DISPERSIÓN DE RAYLEIGH Y SU APLICACIÓN EN LA ATMÓSFERA

Cuando los fotones de la luz blanca inciden sobre átomos o moléculas del aerosol interaccionan con los electrones enlazados de dichas moléculas induciendo un estado de vibración excitada en el electrón. Los electrones oscilantes vuelven a su estado de baja energía re-irradiando una parte de la energía que absorbieron inicialmente. *Rayleigh* estudió la relación existente entre la intensidad irradiada y la longitud de onda incidente, para una partícula homogénea en un medio isotrópico determinando que la cantidad de luz re-irradiada es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda incidente [3,4]:

$$I = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2 \cdot R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \left(\frac{d}{2} \right)^6 \quad (1)$$

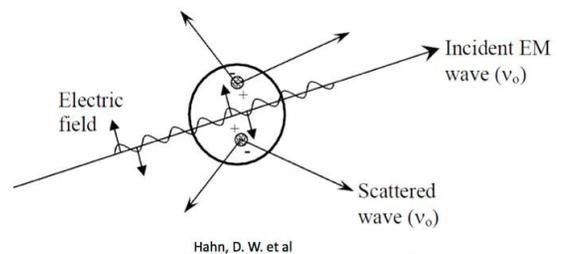


Figura 3. Dispersión Rayleigh, mecanismo.

I es la intensidad de la luz dispersada por una pequeña partícula frente a haz de luz de longitud de onda λ e intensidad I_0 . R es la distancia desde el punto de observación a la partícula. θ es el ángulo de dispersión, formado por la línea de visión (punto medida - partícula dispersante) y la línea de iluminación (fuente iluminación - partícula dispersante). “ n ” es el índice de refracción de la partícula dispersante y d es el diámetro de la partícula dispersante.

La ley de dispersión de Rayleigh es de aplicación sólo para partículas de tamaño muy inferior a la longitud de onda incidente. Por ello si lo que llega a la atmósfera es luz blanca, la luz irradiada por las moléculas gaseosas

(N_2) tendrá mayor intensidad para menores longitudes de onda, y consecuentemente el color del cielo es azul.

HIPÓTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVO

En la atmósfera real de la ciudad de Madrid, el aerosol atmosférico contiene una distribución de partículas menores, iguales y mayores a la longitud de onda incidente, lo que implicará que la ley de Rayleigh no se cumple, y en su lugar, la ley de potencias de la intensidad frente a la longitud de onda variará con otro exponente, desde un valor 4 (para una atmósfera completamente limpia) hasta valores cercanos a 0 para una atmósfera con fuerte presencia de aerosol atmosférico con tamaños de partículas grandes.

Asumimos como hipótesis de trabajo que la intensidad re-irradiada sigue una ley de potencias frente a la longitud de onda:

$$I = \alpha \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

donde debemos determinar los parámetros de ajuste a y α .

El objetivo del presente trabajo, por tanto, es estudiar y determinar la ley de potencias de Intensidad re-irradiada frente a longitud de onda de la radiación electromagnética incidente debida a la dispersión de la luz sobre la ciudad de Madrid, como medio para caracterizar el aerosol atmosférico presente en el cielo de la ciudad de Madrid, y utilizando para ello imágenes tomadas con una cámara de fotos.

METODOLOGÍA

Se tomarán imágenes digitales mediante un dispositivo experimental que consta de un sensor colorimétrico (cámara digital comercial SLR con trípode, podría utilizarse incluso cámaras de teléfonos móviles) un sensor fotométrico (fotómetro) y un patrón para la medida del blanco de los colores, del cielo de Madrid, en una localización geográfica, día y hora determinados, y se propone un algoritmo para procesar las imágenes tomadas y extraer datos de radiancia espectral para los tres colores principales (rojo verde azul), de este modo, obtendremos un conjunto de datos de radiancia espectral para longitudes de onda λ_{rojo} , λ_{verde} , λ_{azul} . Con dicho conjunto de datos realizaremos el ajuste a la ley de potencias (2) y la estimación del exponente de Angström.

Localización geográfica para la toma de medidas (imágenes)

Dado que la dispersión de Rayleigh es máxima en la dirección frontal a la luz, se busca una localización para la toma de imágenes donde la línea de visión sol – observador sea frontal respecto a la salida del sol en Madrid. Tras una búsqueda de localizaciones se elige como localización para la toma de imágenes un puente sobre la M-503 en Pozuelo de Alarcón, Madrid. La razón es que el puente ofrece una altura idónea, sin obstáculos visuales importantes y está situado frente a la salida del sol sobre Madrid, lo que permite obtener un adecuado campo visual del amanecer. La localización geográfica exacta es:

Pozuelo de Alarcón, puente sobre la M-503, esquina superior izquierda del puente

Google Maps: 40.433820, -3.797087, o bien:
40°26'01.8"N 3°47'49.5"W

Selección del día y hora para la toma de las medidas (imágenes)

La *selección del día* para la toma de las imágenes se ha realizado teniendo como criterio principal la ausencia de nubes en superficie y en altura de la columna vertical del punto a medir. La inspección de la presencia o ausencia de nubes se realiza visualmente. Para anticipar la ausencia de nubes en los días propuestos para la toma de imágenes se utiliza la web de la *Agencia Española de Meteorología AEMET*.

La *hora* elegida para la toma de la imagen se ha seleccionado teniendo en cuenta que de acuerdo con la *ley de Rayleigh* la dispersión es máxima cuando la línea de visión formada por la fuente, la partícula dispersante y el observador forma un ángulo de 0° o 180°. Este ángulo de 180° se produce en el momento en que los primeros rayos de sol aparecen en el horizonte, es decir en el momento de amanecer.

La *hora* para la realización de las medidas debe ser por tanto la hora en que se produce el amanecer en la ciudad de Madrid. Para conocer la hora del amanecer utilizamos datos del *Observatorio Astronómico Nacional*, dependiente del *Instituto Geográfico Nacional* en cuya web se indica la hora en que se produce el Orto y el Ocaso para una localización geográfica cada día.

Con vistas a registrar el mayor número de datos posibles, decidimos no solo tomar datos en el momento del orto, sino en las alturas cenitales del sol previas y pos-

teriores al Orto. Para ello, una vez fijada la hora del amanecer a partir de los datos del Observatorio Astronómico Nacional, precisamos conocer a qué hora corresponde una determinada altura cenital del sol, con vistas a determinar en qué momento debe tomarse cada imagen. El software *open source* de astronomía *Stellarium* [5], permite anticipar para una localización geográfica dada, el momento en que se produce un determinado evento astronómico (en nuestro caso el amanecer). Conocido éste se puede adelantar o atrasar el tiempo y determinar las coordenadas cenitales del astro que nos interesa en cada momento. Teniendo esto en cuenta, se determina la Tabla I con alturas cenitales del sol y hora a la que se produce dicho evento astronómico, con vistas a tomar la imagen en esa hora y registrar la intensidad de luz recibida, justo en ese momento:

Dispositivo Experimental

Sensor Fotométrico

Como sensor fotométrico se ha seleccionado una cámara *Canon EOS 1200 D* equipada con un sensor CMOS de 22.3 x 14,9 mm (acrónimo en inglés de *semiconductor complementario de óxido metálico*) de 18.0 megapíxeles. La configuración *Apertura, Sensibilidad de película y tiempo de exposición* se eligieron de acuerdo con Saito y colaboradores [6], para ganar una alta exposición en condiciones de iluminación al amanecer: Una *sensibilidad* de la película *ISO* con valor de 200, una *apertura* de número *f* 4, la mayor que esta cámara ofrece y para el *tiempo de exposición* se han seleccionado varios valores: 1/2000, 1/500, 1/50, 1/4 segundos tomado imágenes

con cada tiempo de exposición en cada uno de los instantes previstos, de modo que tengamos imágenes con un tiempo de exposición adecuado, tanto en condiciones de baja exposición (antes de amanecer) como en condiciones de elevada exposición (una vez el sol ha amanecido). La cámara se fija en un trípode. Con vistas a que el experimento sea lo más portable posible a otros tipos de dispositivos (como cámaras de teléfonos móviles), seleccionamos como formato de imagen de trabajo *JPG* en máximo tamaño ofrecido por la cámara con perfil de color *sRGB*. Esto implica que para la lectura de medidas habrá que realizar (como mínimo) una corrección: expansión *gamma* antes de realizar las lecturas de radiancia espectral. Para la realización del presente trabajo asumimos que el sensor fotométrico registra los tres colores principales, rojo, verde y azul con la misma sensibilidad y que las longitudes de onda asociadas a los tres colores principales son: 700 nm para el color rojo, 546.10 nm para el color verde y 435.9 nm para el color azul.

Sensor Intensidad Luz (Luminancia)

En la parte superior del trípode, donde se coloca la cámara, se ha adaptado un soporte (de cartón), para colocar un fotómetro (*RS ISO-TECH ILM Digital Light Meter*) que registre la intensidad de luz (Lux) que llegan a la cámara en cada toma de medidas. Cada vez que se toma una medida (imagen) procedemos a leer el valor de Luminancia que registra el fotómetro. Además leemos los valores de Luminancia registrados por el fotómetro cada minuto, con vistas a registrar la evolución de la Luminancia durante todo el proceso de medida.

Tabla I. Hora en la que el sol está a una determinada altura cenital.

Día 01 julio 2016		Día 13 julio 2016		Día 14 julio 2016		Día 23 agosto 2016	
Hora	Altura Cenital Sol	Hora	Altura Cenital Sol	Hora	Altura Cenital Sol	Hora	Altura Cenital Sol
06:15:00	-6°	06:22:00	-6°	06:24:00	-6°		-6°
06:21:00	-5°	06:27:00	-5°	06:31:00	-5°		-5°
06:28:00	-4°	06:32:00	-4°	06:37:00	-4°		-4°
06:32:00	-3°	06:37:00	-3°	06:41:00	-3°		-3°
06:37:00	-2°	06:43:00	-2°	06:46:00	-2°	07:24:00	-2°
06:42:00	-1°	06:49:00	-1°	06:51:00	-1°	07:29:00	-1°
06:49:00	0°	06:56:00	0°	06:58:00	0°	07:34:00	0°
06:56:00	1°	06:03:00	1°	07:05:00	1°	07:40:00	1°
07:03:00	2°	07:12:00	2°	07:12:00	2°	07:45:00	2°
07:10:00	3°	07:18:00	3°	07:18:00	3°	07:50:00	3°



Figura 4. Patrón colorimétrico.

Medida de Blanco Colorimétrico

Como medida de blanco para cada uno de los colores, se dispone de un patrón colorimétrico que se coloca en posición contraria al sol (es iluminado por éste). Se toman imágenes del patrón colorimétrico con la misma cámara en las horas en que se toman las imágenes (misma condiciones de exposición solar). La medida de blanco para cada color permitirá ajustar los valores obtenidos en cada imagen a los valores de referencia marcados por el blanco.

Procedimiento de enfoque para la toma de mediciones/imágenes

Las imágenes se han tomado con la cámara en orientación horizontal, posición de focal de la cámara en reposo (sin zoom), fijando el punto de enfoque central en la Torre Cepsa (248 m altura), perteneciente a las cuatro torres del SkyLine de Madrid, la razón es que la morfología de la misma la hace inmediatamente identificable en todas las imágenes: en la imagen adjunta se aprecia el característico “agujero” en la parte superior de la misma que es visible en la totalidad de las imágenes de medidas capturadas. Una vez enfocada la imagen en la Torre Cepsa, cambiamos el ángulo sobre el plano horizontal de la cámara, hasta dejar el punto de enfoque original (Torre Cepsa) en la parte inferior central de la imagen, de modo que capturamos la mayor cantidad de cielo posible, manteniendo la referencia de la superficie.



Figura 5. Torre Cepsa, Madrid, 248 m altura.

Procesamiento digital de las medidas (imágenes) realizadas

Una vez tomadas las medidas (imágenes) se procede al procesamiento de las mismas para la obtención de un conjunto de datos de Radiancia espectral frente a longitud de onda λ_{rojo} , λ_{verde} , λ_{azul} . Con dicho conjunto de datos realizaremos el ajuste a la ley de potencias (2) y la estimación del exponente de Angstrom. El punto de partida para el procesamiento de las imágenes es precisamente la imagen que ha sido capturada.

El procesamiento de las imágenes se ha realizado mediante dos aplicaciones informáticas:

1. En primer lugar se utiliza la aplicación *open source Fiji* [7] para tratamiento digital las imágenes.

Mediante la misma se programa una macro para automatizar el conjunto de tareas que nos permiten a partir de un una serie de imágenes contenidas en un directorio que se establece por el usuario, obtener registros de medidas de radiancia espectral frente a longitud de onda λ_{rojo} , λ_{verde} , λ_{azul} para una columna atmosférica completa y para estratos atmosféricos de altura equivalente a la unidad de escala que hemos definido (248 m, la altura de la Torre Cepsa).

La macro programada en Fiji, primero establece la escala de longitudes basada en la Torre Cepsa, seguidamente establece dos columnas atmosféricas, las extrae de la imagen, genera tres canales de radiancia espectral (rojo, verde, azul) para cada columna, genera una serie de 32 estratos en cada una

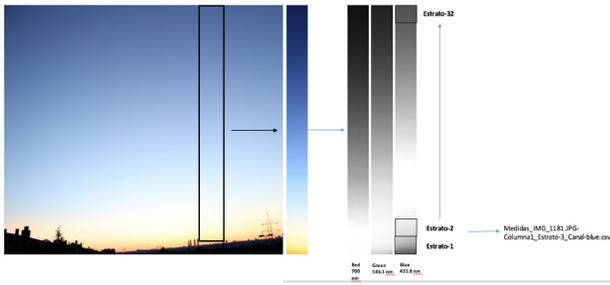


Figura 6. Generación de datos de estratos de cada canal, a partir de la Imagen de partida.

de las columnas-canal y exporta la lectura de radiancias espectrales de cada estrato de cada columna-canal a un fichero csv.

- En segundo lugar se programa un *script en el lenguaje de programación Python* [8], para generar el ajuste de datos a una ley de potencias según (2). En esta segunda parte del procesamiento digital de la imagen, partimos de los datos “en bruto” obtenidos a partir de cada columna, estrato atmosférico y canal, estos datos se procesan para generar un conjunto de pares Radiancia Espectral, Longitud de onda, con los que realizar el ajuste de datos. Finalmente se realiza el ajuste de datos para obtener los parámetros que mejor ajustan a la ley de potencias y el coeficiente R^2 de cada columna atmosférica y estrato atmosférico. El esquema es el representado en la Figura 7.

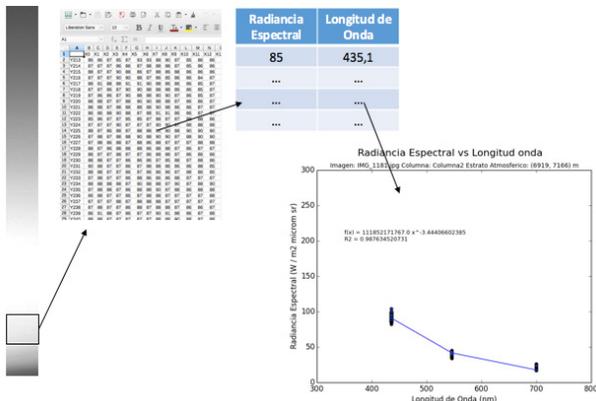


Figura 7. Generación de ajuste de Radiancia espectral frente a longitud de onda, a partir de los datos de cada estrato generado.

RESULTADOS

Análisis de resultados por columna atmosférica completa vs Análisis de resultados por estrato atmosférico

La presentación de resultados, la realizamos utilizando dos de las imágenes, la imagen 1489, del día 23 de agosto, y la imagen 1181 del día 14 de julio. De acuerdo con

lo comentado previamente, el método propuesto nos permite realizar un análisis por columna atmosférica completa o bien un análisis por estrato atmosférico, ya que además de los datos de la columna atmosférica completa, hemos segmentado los datos de cada columna por estratos, el objetivo de esta estrategia es analizar la situación del aerosol atmosférico a diferentes altitudes atmosféricas.

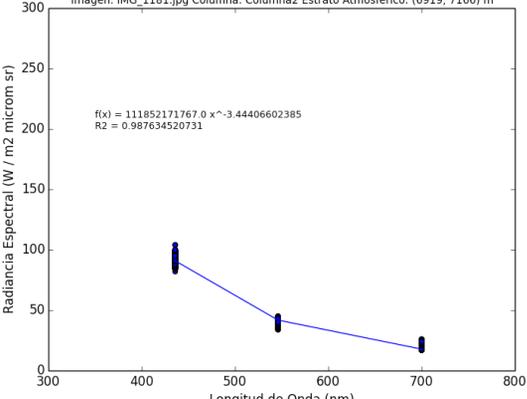
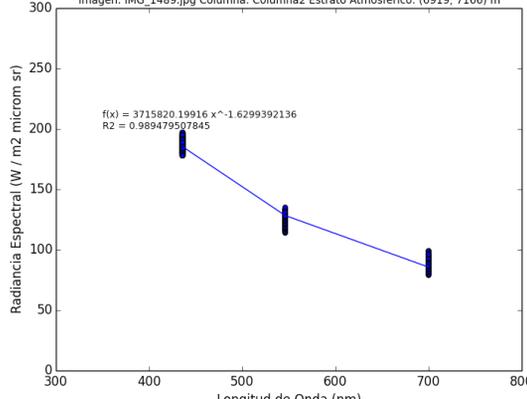
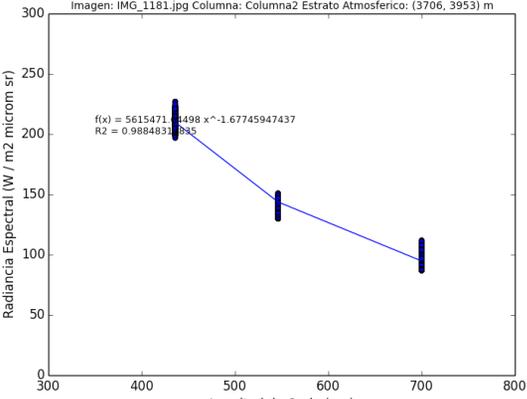
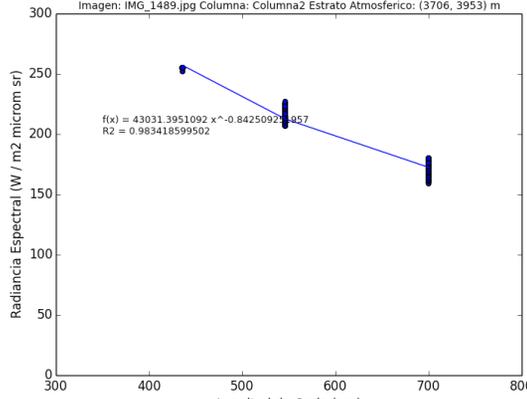
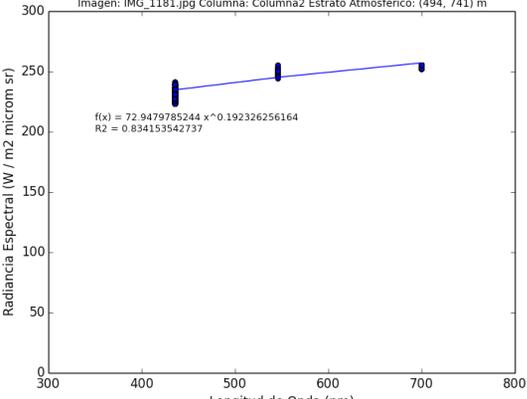
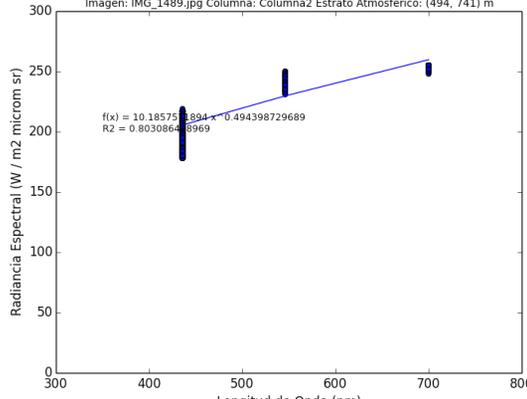
Es previsible que dado que estamos analizando el aerosol atmosférico de una zona urbana, de elevada actividad antropogénica la carga de aerosol atmosférico sea fuertemente intensa en los estratos atmosféricos inferiores más próximos a la superficie, donde se encontrarán las partículas más pesadas, y las partículas relativamente más ligeras procedentes de los motores diésel y motores de combustión, y a medida que nos elevamos en la columna atmosférica la carga de partículas del aerosol sea menos intensa. Finalmente en los estratos superiores la presencia del aerosol atmosférico debe tener menor intensidad.

Estas previsible diferencias en los estratos de cada columna anticipan una gran dispersión en los valores de radiancia espectral frente a longitud de onda cuando el análisis se plantea para una columna atmosférica completa y por tanto podemos anticipar valores de los coeficientes de determinación bajos en los ajustes por mínimos cuadrados de los datos de columnas atmosféricas completas. Por contra, para cada estrato atmosférico, los conjuntos de datos de radiancia espectral frente a longitud de onda, estarán previsiblemente más agrupados, por lo que los ajustes por mínimos cuadrados de los estratos atmosféricos ofrecerán previsiblemente un coeficiente de determinación adecuado. De acuerdo con éste razonamiento decidimos centrar los resultados y su análisis en el ajuste de los estratos atmosféricos, abandonando, de momento la idea de realizar el análisis para una columna atmosférica completa. Los estratos atmosféricos seleccionados para realizar el análisis son: estrato 1, de 494–791 m de altitud, estrato 2 de 3706–3953 m de altitud y estrato 3 de 6919–7166 m de altitud, y los resultados de los ajustes realizados se muestran en la Tabla II.

Análisis del exponente obtenido para la ley de potencias frente a la altitud

Por último, una vez hemos analizado la ley de potencias en los estratos atmosféricos principales, y teniendo en cuenta lo comentado en la previsión realizada en el punto anterior, el exponente de la ley de potencias debe ir

Tabla II. Radiancia Espectral vs Longitud de Onda para las imágenes 1181 (día 14 de julio de 2016) y 1489 (día 23 de agosto de 2016). Estratos atmosféricos seleccionados: 6919 a 7166 m de altitud, 3706 a 3953 m de altitud, 494 a 741 m de altitud.

Día 14 de julio de 2016	Día 23 de agosto de 2016
<p>Radiancia Espectral vs Longitud onda Imagen: IMG_1181.jpg Columna: Columna2 Estrato Atmosferico: (6919, 7166) m</p>  <p> $f(x) = 111852171767.0 x^{-3.44406602385}$ $R^2 = 0.987634520731$ </p>	<p>Radiancia Espectral vs Longitud onda Imagen: IMG_1489.jpg Columna: Columna2 Estrato Atmosferico: (6919, 7166) m</p>  <p> $f(x) = 3715820.19916 x^{-1.6299392136}$ $R^2 = 0.989479507845$ </p>
<p>Estrato atmosférico: 6919–7166 m Exponente Ley Potencias = -3.4441 ± 0.0001 $R^2 = 0.99$</p>	<p>Estrato atmosférico: 6919–7166 m Exponente Ley Potencias = -1.62994 ± 0.00013 $R^2 = 0.99$</p>
<p>Radiancia Espectral vs Longitud onda Imagen: IMG_1181.jpg Columna: Columna2 Estrato Atmosferico: (3706, 3953) m</p>  <p> $f(x) = 5615471.4498 x^{-1.67745947437}$ $R^2 = 0.98848310895$ </p>	<p>Radiancia Espectral vs Longitud onda Imagen: IMG_1489.jpg Columna: Columna2 Estrato Atmosferico: (3706, 3953) m</p>  <p> $f(x) = 43031.3951092 x^{-0.842509204957}$ $R^2 = 0.983418599502$ </p>
<p>Estrato Atmosférico: 3706–3953 m Exponente Ley Potencias = -1.67746 ± 0.00016 $R^2 = 0.99$</p>	<p>Estrato Atmosférico: 3706–3953 m Exponente de Ley Potencias = -0.84251 ± 0.00014 $R^2 = 0.98$</p>
<p>Radiancia Espectral vs Longitud onda Imagen: IMG_1181.jpg Columna: Columna2 Estrato Atmosferico: (494, 741) m</p>  <p> $f(x) = 72.9479785244 x^{0.192326256164}$ $R^2 = 0.834153542737$ </p>	<p>Radiancia Espectral vs Longitud onda Imagen: IMG_1489.jpg Columna: Columna2 Estrato Atmosferico: (494, 741) m</p>  <p> $f(x) = 10.185751894 x^{0.494398729689}$ $R^2 = 0.803086408969$ </p>
<p>Estrato atmosférico: 494–741 m Exponente de Ley Potencias = 0.19233 ± 0.00013 $R^2 = 0.83$</p>	<p>Estrato atmosférico: 494 – 741 m Exponente de Ley Potencias = 0.4944 ± 0.0003 $R^2 = 0.80$</p>

aumentando desde los estratos atmosféricos próximos a la superficie, hasta los estratos atmosféricos más elevados, y en este sentido nos preguntamos precisamente como es la relación existente entre el exponente obtenido para la ley de potencias (2) en cada estrato atmosférico y la altitud del estrato. De acuerdo con las características del aerosol atmosférico sobre la ciudad de Madrid cabría esperar una densidad del aerosol atmosférico elevada en los estratos inferiores, que a partir de un determinado estrato, de acuerdo con el nivel de contaminación atmosférica existente comienza a reducirse, es decir un exponente de la ley de potencias pequeño que comenzará a aumentar a partir de un determinado estrato atmosférico. Si esto es así la relación entre el exponente de la ley de potencias (2) y la altitud, podría mostrar, situaciones de alta concentración de contaminación por aerosol atmosférico, cuando el cambio en el exponente de la ley de potencias para estratos atmosféricos contiguos, cerca de la superficie, sea muy intenso.

Siguiendo esta idea, agrupamos todos los datos de exponentes obtenidos para la ley de potencias (2) frente a altitud, para cada imagen y representamos gráficamente con vistas a obtener una visión cualitativa de lo expuesto en el párrafo anterior. Las representaciones gráficas de cada imagen para el análisis de la relación exponente de ley de potencias (2) frente a altitud se muestran en la Figura 8, donde junto a cada gráfico de exponente de ley de potencias frente a altitud hemos incluida adjunta la columna atmosférica analizada.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Ajuste de datos de Radiancia Espectral a ley de potencias frente a longitud de onda

El análisis de los ajustes por mínimos cuadrados, realizados en los estratos atmosféricos seleccionados, muestra valores en todos los coeficientes R^2 adecuados, que van desde 0.8 a 0.99 lo que era de esperar por la mayor homogeneidad de los datos con los que se realizan los ajustes. Los estratos seleccionados para el análisis han tratado de ser representativos de lo que ocurre en la columna atmosférica, por ello hemos seleccionado un estrato a gran altura (6919–7166 m), uno a altura media (3706–3953 m) y otro a baja altura (494–741 m).

En el estrato de gran altura el exponente de la columna atmosférica del día 14 de julio (Figura 9A) es cercano a -4, (-3.44) lo que confirma nuestra previsión para el aerosol atmosférico a gran altura, lejos de la

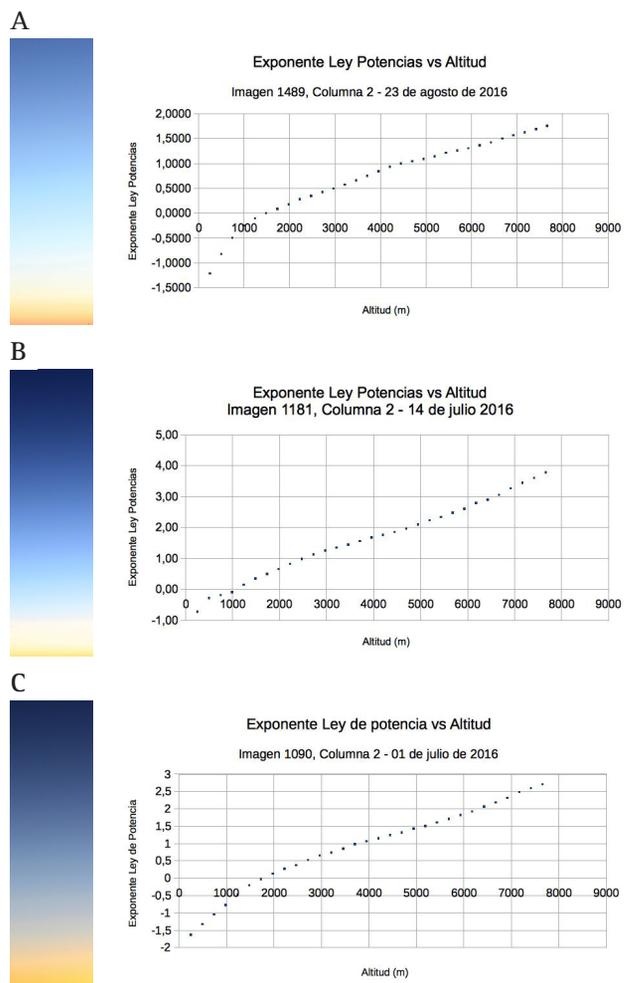


Figura 8. (A) Imagen 1489, Columna 2, 23 de agosto de 2016. (B) Imagen 1181, Columna 2, 14 de julio de 2016. (C) Imagen 1090, Columna 2, 01 de julio de 2016.

superficie principalmente existen gases naturales de la atmósfera y por tanto ésta presenta principalmente el color azul. En la imagen del 23 de agosto el exponente es menor (-1.63).

A medida que bajamos a los estratos inferiores estrato intermedio a 3706–3953 m y estrato superficial a 494–741 m, en ambas imágenes (Figura 9) ocurre lo mismo, el exponente que mejor ajusta la ley de potencias va reduciéndose hasta volverse incluso positivo en el estrato más cercano a la superficie. Esta tendencia ya la habíamos anticipado, y confirman que las partículas dispersantes del aerosol atmosférico, se organizan según peso en condiciones de ausencia de viento y por tanto la carga de partículas irá aumentando a medida que nos acercamos a la superficie. Este efecto es más intenso a la hora a la que están tomadas las imágenes ya que la temperatura a esta hora está en la banda de temperaturas inferiores del día, momento en que hay menor agitación térmica.

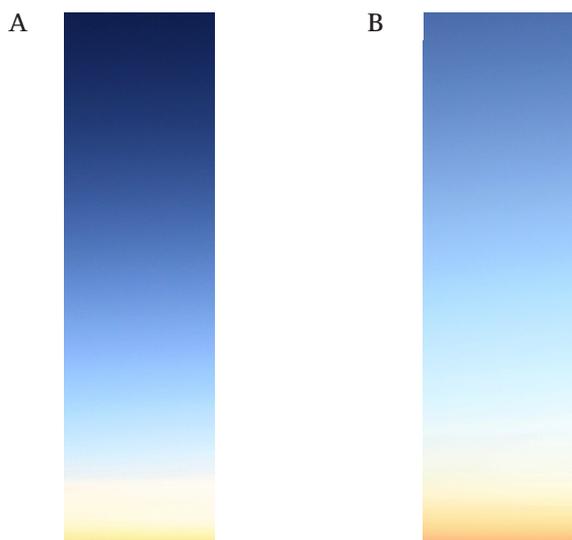


Figura 9. (A) Imagen 1181, Columna 2, 14/07/2016. (B) Imagen 1489, Columna 2, 23 de agosto de 2016.

Tabla III. Exponente Ley de potencias a distintos estratos atmosféricos.

	Img 1181	Img 1489
6919–7166 m	-3.4441 ± 0.0001	-1.62994 ± 0.00013
3706–3953 m	-1.67746 ± 0.00016	-0.84251 ± 0.00014
494–741 m	0.19233 ± 0.00013	0.4944 ± 0.0003

En las dos imágenes la reducción en el exponente de la ley de potencias parece ser regular: del primer estrato al segundo, se reduce a la mitad, en ambas imágenes, en el paso del estrato intermedio al estrato inicial, la reducción en el exponente es más acusada en el 14 de julio (Figura 9A) reducción en 1.86 puntos que en el día 23 de agosto (Figura 9B), reducción en 1.33 puntos.

Los valores tan bajos incluso positivos, en los exponentes de la ley de potencias dan una idea cualitativa, de la presencia de contaminantes en el ambiente de los estratos atmosféricos inferiores de la ciudad de Madrid.

Análisis del exponente obtenido para la ley de potencias frente a la altitud

El análisis de las gráficas obtenidas del exponente de la ley de potencias frente a la altitud, muestra para las tres gráficas, lo que ya anticipábamos, en primer lugar a medida que la altitud crece, el exponente de la ley de potencias también crece. Adicionalmente en las tres gráficas puede apreciarse la existencia de una serie de tramos de estratos atmosféricos donde la evolución del exponente con la altitud es lineal, estos tramos lineales están conectados por puntos donde se produce un marcado

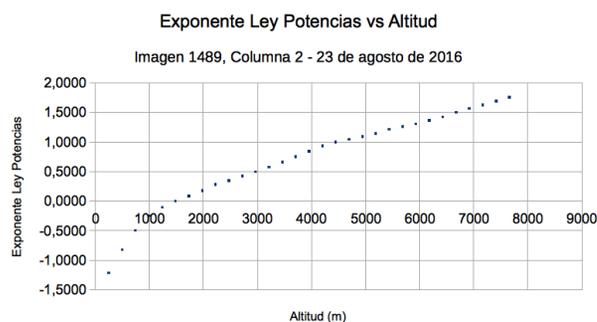


Figura 10. Representación Exponente de la ley de potencias obtenido en cada estrato analizado, frente a la altitud de cada estrato.

cambio en la pendiente de las recta, a modo de ejemplo marcamos en el gráfico de la Figura 8A, columna 2 a continuación los tramos y los cambios de pendiente (Figura 10).

Como sabemos cuándo el exponente es muy bajo, el nivel de aerosol atmosférico es muy alto, por lo que el análisis del primer tramo nos indica en primer lugar como de amplio es el aerosol atmosférico de máxima intensidad, para la imagen 1090 hasta los 1750 m tenemos exponentes negativos. Para la Figura 8A tenemos exponentes negativos hasta 1500 m, mientras que para la Figura 8B prácticamente en los 500–750 m estamos próximos a exponente 0. A priori, esto parece indicar que el día con mayor presencia de aerosol atmosférico en los estratos atmosféricos de la Ciudad de Madrid, fue el 23 de agosto, luego el 01 de julio y finalmente el 14 de julio. Si visualizamos las imágenes de las columnas que se han adjuntado a los gráficos, la simple inspección de los colores en los distintos estratos confirman estos resultados. Otro aspecto importante del análisis es la pendiente de la recta del primer tramo, pues pendientes muy grandes implicarán que el exponente de la ley de potencias crece con mayor rapidez y por tanto la intensidad del aerosol atmosférico decrece también con rapidez, de modo que la amplitud del aerosol en los estratos atmosféricos inferiores es más baja (lo que ocurre en la Figura 8B), mientras que pendientes pequeñas implican que amplitud del aerosol atmosférico es grande (lo que ocurre en la Figura 8C). Por último queda la pregunta de si es posible obtener información sobre la carga o densidad de aerosol a partir de los exponentes, es decir un exponente más negativo que otro, en dos imágenes diferentes ¿implica más densidad de aerosol atmosférico y por tanto más contaminación? En principio sí, pero en este punto de nuestro método la respuesta a esta pregunta requiere una cierta cautela, la comparación de las

imágenes y gráficos expuestos parece indicar que la Figura 8B que es la que mayor exponente presenta en los estratos inferiores, es también la que menos carga de aerosol, y la Figura 8C que es la que menor exponente llega a tener es también la que tiene un aerosol atmosférico más intenso.

Finalmente y con la intención de confirmar la idoneidad nuestra decisión de no realizar un análisis para la columna atmosférica completa, decidimos realizar el ajuste para ambas columnas atmosféricas completas: el ajuste por mínimos cuadrados ofreció valores del coeficiente de determinación R^2 de 0.16 y 0.19 respectivamente para las columnas atmosféricas 1489 y 1181 (Figura 9) respectivamente, lo que nos permite confirmar como idónea nuestra decisión.

LA INTERACCIÓN DE LA LUZ DEL SOL CON EL AEROSOL ATMOSFÉRICO

En este trabajo se ha propuesto un método para la caracterización inicial del aerosol atmosférico en la ciudad de Madrid, mediante toma de imágenes con cámara digital y posterior técnicas de procesamiento y análisis de imagen digital.

Como resultado de las primeras pruebas del método realizadas, hemos podido obtener el exponente que ajusta la ley de potencias de la energía re-irradiada por la dispersión de la luz en función de la longitud de onda de la radiación incidente, y si bien hemos observado que cuando los datos de medida son para una columna atmosférica la dispersión de las radiancias espectrales es elevada, e impide realizar un ajuste a ley de potencias, lo que está relacionado con el tipo de aerosol atmosférico presente (zona urbana de intenso carácter antropogénico), sin embargo, cuando hemos reducido el ajuste a estratos atmosféricos de amplitud de altura limitada y por tanto con valores de radiancia espectral menos dispersos, hemos observado cómo el método comienza a dar resultados más aceptables, con parámetros de ajuste próximos a lo que cabría esperar de acuerdo con las leyes físicas que de acuerdo con nuestra hipótesis, le son de aplicación y con coeficientes de determinación en los ajustes, razonables.

Una vez confirmada, que la estrategia más adecuada es el análisis por estratos atmosféricos, y teniendo en cuenta la potencia a nivel de procesamiento de datos, del método de imagen digital planteado para el análisis del aerosol atmosférico, hemos planteado el análisis del ex-

ponente de la ley de potencias frente a la altitud, y discutido sus resultados. En estudios posteriores, podría estudiarse la posibilidad de existencia de una correlación entre el exponente de la ley de potencias y el nivel de contaminación existente en los estratos atmosféricos inferiores, tanto respecto a la intensidad o densidad de aerosol atmosférico como respecto a la amplitud, es decir, hasta qué altitud atmosférica está presente. Adicionalmente un análisis en profundidad de los cambios en las pendientes de los tramos que se han mostrado en este apartado de los resultados, podrían llevarnos a conocer cuál es la causa de dichos cambios y a establecer correlaciones entre estos cambios y las características del aerosol en dichas zonas.

Finalmente, A partir de aquí, el presente trabajo es un punto de partida para el método de análisis propuesto, para el cual se requieren más experimentos para depurar, verificar y validar el método.

REFERENCIAS

- [1] Jacob D (2004). Introduction to Atmospheric chemistry. Princeton University Press, Nueva Jersey (EE.UU).
- [2] WHO (2005) Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.
- [3] Bohren CF, Huffman D R (1983). Absorption and Scattering of Light by Small Particles. John Wiley & Sons, Nueva York (EE.UU.).
- [4] Van de Hulst HC (1981). Light Scattering by Small Particles Dover. John Wiley & Sons, Nueva York (EE.UU.).
- [5] Stellarium. <http://www.stellarium.org/es>.
- [6] Saito M, Iwabuchi H (2015). A new method of measuring aerosol properties from digital twilight photographs. *Atmospheric Measurement Techniques* 8, 4295–4311.
- [7] Fiji. <http://imagej.net/Fiji>.
- [8] Python. <https://www.python.org/about>.
- [9] Ehrlich A, Bierwirth E, Wendisch M, Herber A, Gayet JF (2012). Airborne hyperspectral observations of surface and cloud directional reflectivity using a commercial digital camera. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 3493–3510.
- [10] Kataoka R, Miyoshi Y, Shigematsu K, Hampton D, Mori Y, Kubo T, Yamashita A, Tanaka M, Takahei T, Nakai T, Miyahara H, Shiokawa K (2013). Stereosco-

- pic determination of all-sky altitude map of aurora using two ground-based Nikon DSLR cameras. *Annales Geophysicae* 31, 1543–1548.
- [11] Kulmala M, Vesala T, Laaksonen A (2000). Aerosol Chemical Processes in the Environment. Lewis publishers, Boca Raton, (EE.UU.).
- [12] RIMA. <http://www.rima.uva.es/index.php/en>.
- [13] Wu B, Lu D (1988). Retrieval of stratospheric background aerosol scattering coefficient from twilight polarization measurements. *Applied optics* 27, 4889–4906.
- [14] Wyszecki G, Stiles WS (1982). Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. John Wiley & Sons, Nueva York (EE.UU.).
- [15] Zerefos CS, Tetsis P, Kazantzidis A, Amiridis V, Zerefos SC, Luterbacher J, Eleftheratos K, Gerasopoulos E, Kazadzis S, Papayannis A (2014). Further evidence of important environmental information content in red-to-green ratios as depicted in paintings by great masters. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 2987–3015.

Álvaro García de Tiedra
Tiedra Farmacéutica