

EVALUACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN DEBIDA AL BC Y BrC EN DOS AMBIENTES DISTINTOS

AUTOR: ÓSCAR MARTÍNEZ PASTOR

Tutor: José Fco. Nicolás Aguilera
Departamento de Física Aplicada
Curso académico 2023 - 2024
Facultad de Ciencias Experimentales

Resumen

En el presente estudio se ha realizado una comparación de la absorción de la radiación debida a los compuestos carbonosos (BC y BrC) presentes en el aerosol atmosférico en dos emplazamientos de características ambientales diferentes: un entorno urbano (UMH) y un entorno de carácter rural (BEN). El periodo temporal de muestreo abarcó aproximadamente un mes entre el final del invierno y el inicio de la primavera de 2023. La cuantificación de la absorción ha sido realizada mediante la determinación del coeficiente de absorción (σ_{ap}) y el parámetro AAE. Destacar entre los resultados obtenidos por un lado (1) la mayor absorción global (BC+BrC) registrada en el entorno urbano, pero con una diferencia respecto al entorno rural menor a lo esperable y (2) un mayor aporte de la fuente quema de biomasa a la emisión de compuestos absorbentes en el entorno rural. Al ser esta fuente la principal emisora de BrC, los valores de AAE obtenidos en la ubicación rural fueron superiores a los registrados en la urbana.

Palabras clave: Entornos urbano y rural; Quema de biomasa; coeficiente de absorción, Carbono negro (BC); Carbono Marrón (BrC); AAE.

Abstract

A comparison of light absorption by carbonaceous compounds (BC and BrC) present in atmospheric aerosol has been performed at two locations, (urban (UMH) and rural (BEN) sites), with different environmental features. The sampling period covered around one month, between the end of winter and the beginning of spring 2023. Absorption quantification was carried out by determining the absorption coefficient (σ_{ap}) and the AAE parameter. The outcomes obtained showed: (1) a higher absorption (BC+BrC) recorded in the urban environment, but with a smaller difference than that expected in relation to the rural environment, and (2) a greater contribution of the biomass burning source in the rural environment. As biomass burning is the main source of BrC, the AAE value obtained at rural location was higher than that recorded in UMH.

Keywords: Rural and urban environments; Biomass Burning; absorption coefficient; Black Carbon (BC); Brown Carbon (BrC); AAE.

Índice

1. Introducción.....	3
1.1 Generalidades de los aerosoles.....	3
1.2 Efecto climático de los aerosoles.....	4
1.3 Fuentes de aerosoles con capacidad de absorber la radiación solar.....	7
1.4 Cuantificación de la absorción: el coeficiente de absorción (σ_{ap}).....	8
2. Objetivos	11
3. Metodología.....	12
3.1 Localización espacio-temporal del estudio.....	12
3.2 Obtención de las propiedades ópticas de absorción.....	13
3.2.1 Coeficiente de absorción y concentración de BC	13
3.2.2 Eficiencia de Absorción Másica (MAE)	14
3.2.3 AAE.....	14
3.2.4 Obtención del σ_{BrC}	15
3.3 Obtención del PM y las variables meteorológicas.....	16
4. Resultados y discusión.....	18
4.1 Caracterización del ambiente atmosférico	18
4.2 Parámetros ópticos de absorción.....	20
4.2.1 Valores estadísticos.....	20
4.2.2 Distribución porcentual de frecuencias	21
4.2.3 Evolución temporal diaria.....	23
4.3 Valores de absorción del BC y BrC.....	24
4.3.1 Evolución horaria	25
5. Conclusiones.....	27
6. Proyección futura	28
7. Bibliografía	29

1. Introducción

1.1 Generalidades de los aerosoles

Los aerosoles se definen como partículas sólidas o líquidas en suspensión en la atmósfera, a excepción de todos los hidrometeoros (gotas de nubes, de lluvia o copos de nieve) (Boucher, 2015). Frecuentemente el término material particulado atmosférico en suspensión (PM) es usado de forma análoga.

Los aerosoles están siempre presentes en la atmósfera, sin embargo, sus concentraciones pueden ser muy variables debido a la heterogeneidad de sus fuentes y a su relativamente corto tiempo de permanencia en la atmósfera (del orden de horas a semanas). La variación de tamaños que presenta el PM oscila entre $0.001 \mu\text{m}$ y las $50 \mu\text{m}$. Más allá de ese tamaño se consideran que las partículas son sedimentables y tienen un tiempo de residencia mucho menor. En referencia a su tamaño y desde un punto de vista epidemiológico es habitual hablar del concepto de fracción másica. Por ejemplo, la fracción másica PM_{10} , hace referencia a la concentración másica (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) de partículas con diámetros aerodinámicos inferiores a $10 \mu\text{m}$. Para hacerse una idea del tamaño de este tipo de partículas la figura 1 presenta una comparativa de tamaños entre partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ y otras estructuras biológicas reconocibles.

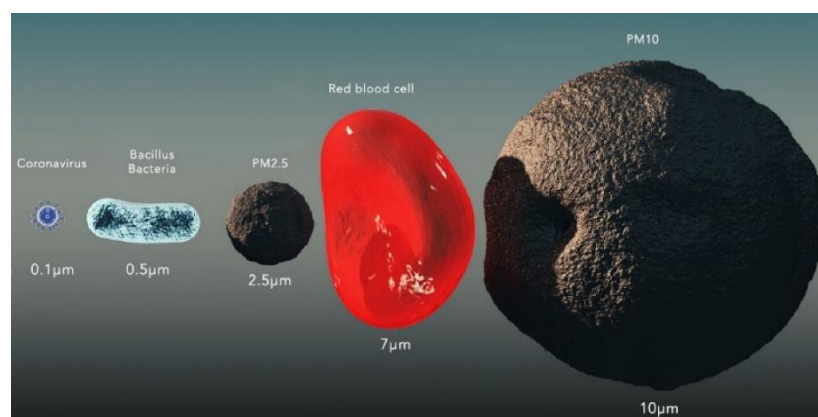


Figura 1. Comparativa de tamaños entre partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ con diversas estructuras biológicas conocidas.

Existen varias formas de clasificar al PM. Una clasificación frecuente hace referencia a su origen primario o secundario. Los aerosoles primarios son los emitidos directamente a la atmósfera en forma de partículas. Por ejemplo, los

aerosoles producidos por el efecto de la fricción del viento sobre una superficie oceánica o terrestre o los producidos durante una combustión incompleta. Los secundarios designan aquellas partículas que no han sido emitidas directamente en fase particulada, sino que proceden de la condensación de especies atmosféricas en fase gaseosa. Los aerosoles también pueden clasificarse según su origen. Distinguimos entre fuentes naturales (p.ej. emisiones procedentes del océano, el suelo o la vegetación), y antropogénicas (p. ej. la combustión de combustibles fósiles, las actividades industriales o el transporte). Por lo general, las fuentes naturales suelen emitir PM de mayor tamaño que las antrópicas.

Las fracciones más pequeñas ($PM_{2.5}$ y PM_{1}), generan mayores efectos adversos sobre la salud que las más gruesas (PM_{10}) ya que la composición química de las partículas de menor tamaño presenta compuestos químicos más perjudiciales como, por ejemplo: carbono elemental, compuestos orgánicos como los PAHs o diversos metales como como As, Cd, Fe, Zn y Ni (Wichmann y Peters, 2000). Además, las partículas más finas pueden ser inhaladas más profundamente llegando incluso a la región alveolar.

1.2 Efecto climático de los aerosoles

Antes de abordar el efecto climático de los aerosoles es necesario conocer el significado del concepto de Forzamiento Radiativo (FR). El FR indica la variación, expresada en W/m^2 , del flujo radiativo neto en la tropopausa. Por ello, mide la influencia de un determinado factor que puede causar un cambio en el clima. FR positivos se traducen en aumentos de la temperatura media global.

En la atmósfera además de determinados gases (CH_4 , CO_2 , etc...) conocidos como gases efectos invernadero (GEI), los aerosoles también interactúan con la radiación electromagnética. A diferencia de los GEI, cuyo resultado final de su interacción constituye un FR positivo, el efecto de los aerosoles es variable ya que pueden generar forzamientos positivos y/o negativos en función de su composición química.

La interacción de los aerosoles está constituida por dos procesos, el de dispersión y el de absorción de la radiación electromagnética. La gran mayoría de los aerosoles dispersan la radiación, efecto que deriva en un enfriamiento del sistema. Algunos como el sulfato presentan una gran eficiencia de dispersión.

Aerosoles tipo carbono negro (BC) y marrón (BrC), que es el carbono orgánico con capacidad de absorber la radiación o el polvo mineral tienen efectos de calentamiento. El BC constituye el elemento con mayor eficiencia en la absorción de la radiación.

La figura 2 muestra las contribuciones a los FR hechas por algunos de los factores influidos por actividades humanas entre ellos GEI y aerosoles. Los valores reflejan el forzamiento total en comparación con el comienzo de la era industrial (alrededor de 1750). (Figura obtenida del IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007).

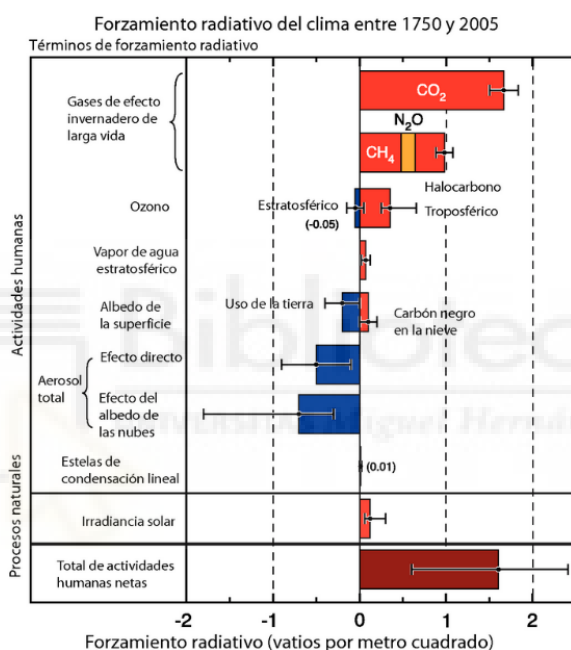


Figura 2. Agentes principales del forzamiento radiativo del clima entre 1750 – 2005.

Como se puede apreciar el efecto de los aerosoles global es claramente de enfriamiento (en azul) y por lo tanto contrario al de los GEI.

Actualmente se consideran tres tipos de interacciones de los aerosoles en los que se genera enfriamiento y/o calentamiento del sistema. Estos son:

1- Interacción Aerosol-Radiación (ARI):

Se incluyen dos tipos de efectos dentro de esta agrupación. El denominado “efecto directo”, que constituye la absorción y dispersión directa de la radiación por parte de los aerosoles. Aquí se debe considerar que la retrodispersión tiene un efecto de enfriamiento ya que reduce la cantidad de radiación que entra en la

superficie terrestre. Por su parte la absorción lleva consigo una posterior reemisión de la energía (calentamiento) en la capa atmosférica de aerosoles donde se lleva a cabo dicha absorción. Esto a su vez hace que el perfil vertical de temperaturas atmosférico se modifique lo que conlleva variaciones en la humedad, estabilidad atmosférica y formación de nubes. A este fenómeno se le denomina tradicionalmente “efecto semidirecto”.

2- Interacción Aerosol-Nube (ACI):

Dentro de este tipo de interacción encontramos dos efectos indirectos. El primero de ellos denominado “efecto Twomey o albedo de las nubes” se basa en los aerosoles actúan como núcleos de condensación necesarios para la formación de gotas de nubes. Una gran concentración de estos genera gotas más pequeñas y ello deriva en una mayor reflexión de la radiación solar, lo cual conlleva un enfriamiento de la superficie. Por su parte, el segundo efecto indirecto llamado “efecto tiempo de vida” está relacionado con el anterior ya que la modificación de las propiedades microfísicas de la nube tiene un impacto en la evolución de esta, en particular en la habilidad de generar gotas lo suficientemente grandes como para que precipiten, por lo que los aerosoles también pueden afectar a la eficiencia de la precipitación y al tiempo de vida de la nube lo cual puede influir tanto en el tiempo meteorológico como en el clima.

3- Interacción Aerosol-Superficie (ASI):

Esta interacción conlleva dos componentes. Por un lado, los aerosoles absorbentes depositados sobre la nieve o el hielo hacen que este tipo de superficies sean menos reflectivas y más absorbentes, lo cual contribuye al calentamiento de la superficie. Por otro lado, los aerosoles también pueden actuar con la vegetación, con cambios en la radiación solar entrante o como fuente de nutrientes (Boucher, 2015).

El FR (con sus márgenes de error) de estas componentes se puede apreciar en la figura 3. La figura está extraída de Myhre et al., 2013. Como puede apreciarse el efecto total del aerosol (línea azul punteada) presenta un FR medio de $\sim 1.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

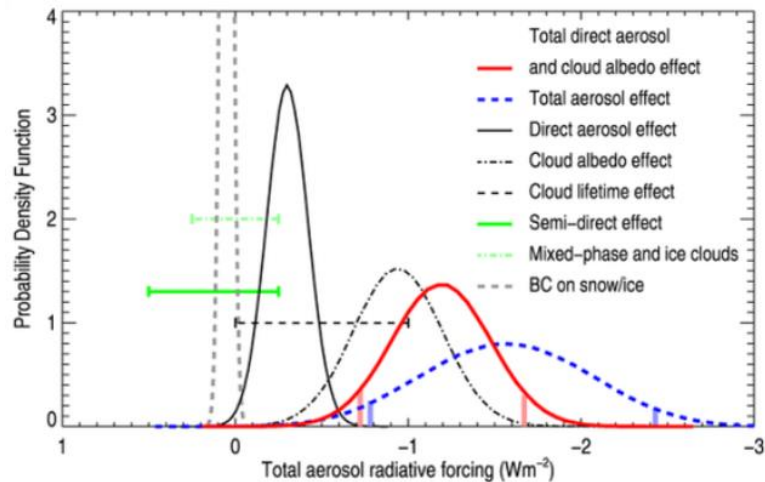


Figura 3. Funciones de densidad de probabilidad referentes a los distintos efectos de los aerosoles en su interacción con la radiación. Se muestra el FR total de los aerosoles en azul.

1.3 Fuentes de aerosoles con capacidad de absorber la radiación solar

Las principales fuentes de compuestos capaces de absorber la radiación solar (BC y BrC) son la quema de Biomasa (BB) y la combustión de combustibles fósiles (p.ej. tráfico). Otras fuentes como la fuente secundaria SOA (Secondary Organic Aerosol) o el material cristal también pueden ser emisoras de BrC (López-Caravaca et al., 2024).

BB genera aerosoles primarios que proceden de la combustión incompleta de la materia orgánica. Los aerosoles de la combustión de biomasa incluyen el carbono orgánico (parte del cual tiene la capacidad de absorber la radiación-BrC), y BC. Estos aerosoles suelen ser submicrónicos. Las fuentes de aerosoles de la combustión de biomasa son tanto naturales como antropogénicas. BB también emite compuestos gaseosos, como compuestos orgánicos volátiles y dióxido de azufre que son precursores de aerosoles. La combustión de carbón y derivados del petróleo produce sobre todo BC, pero también BrC. El tráfico constituye la principal fuente de BC en entornos urbanos. Estas emisiones también suelen ser de tamaño submicrométrico.

Describimos brevemente algunas características del BC y el BrC.

- BC: es el componente que más eficiente absorbe la radiación solar y el que más contribuye a la misma. Aunque su contribución a la concentración másica de las partículas no suele superar el 10%, se estima

que el BC causa uno de los FR positivos más grandes, por detrás del CO₂. Su dependencia con la longitud de onda de la radiación (λ) es bastante suave como puede apreciarse en la figura 4 (curva de color rojo).

- BrC: se puede definir como el conjunto de compuestos orgánicos con capacidad de absorber la luz. BB constituye una de las principales fuentes de emisión de este tipo de compuestos que tienen la capacidad de absorber la luz en el UV y en menor cuantía en el inicio de la región visible (VIS), no así en el infrarrojo (IR). Su dependencia con λ es mayor que la del BC (ver la curva azul en la figura 4).

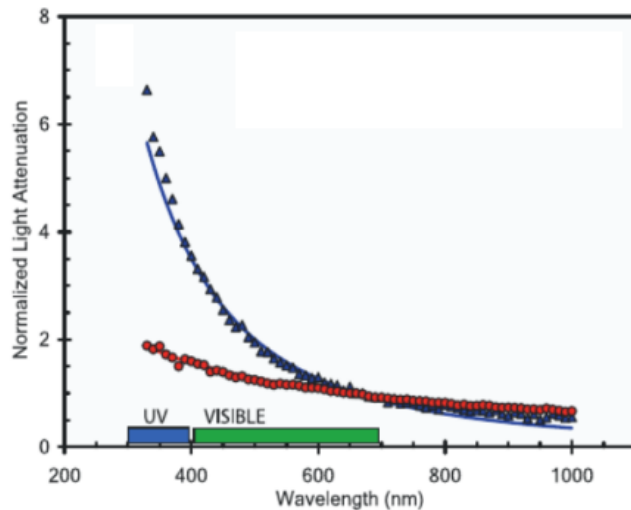


Figura 4. Absorción de la radiación en función de la λ para una fuente emisora de BC (rojo) y para una fuente emisora que, además de emitir BC, emite compuestos absorbentes diferentes al BC (azul).

- El polvo mineral debido a los óxidos de hierro que contiene también es capaz de absorber la luz y presenta una fuerte absorción hacia las longitudes de onda más cortas (UV e inicio del VIS). Las partículas de polvo mineral son emitidas principalmente por los desiertos y se encuentran entre las partículas en suspensión de mayor tamaño.

1.4 Cuantificación de la absorción: el coeficiente de absorción (σ_{ap})

La intensidad (o flujo) de radiación que atraviesa una distancia x (en este caso un determinado espesor atmosférico) en la dirección de su propagación puede ser evaluada mediante la ley de Lambert-Beer:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} \cdot e^{-\sigma_{ext}(\lambda) \cdot x} \quad (1)$$

Donde σ_{ext} es el coeficiente de extinción para la radiación de longitud de onda λ y presenta dos componentes: la atenuación por scattering/dispersión (σ_{sp}) y por absorción (σ_{ap}):

$$\sigma_{\text{ext}}(\lambda) = \sigma_{\text{sp}}(\lambda) + \sigma_{\text{ap}}(\lambda) \quad (2)$$

Ambas atenuaciones a su vez tendrían 2 contribuciones debidas a la interacción con gases y con aerosoles. En este trabajo analizaremos la contribución por la absorción de aerosoles. Como el exponente de una función exponencial no tiene dimensiones las unidades de las atenuaciones viene dadas en Mm^{-1} .

El proceso de absorción depende de la longitud de onda (λ), el tamaño de las partículas y , como ya hemos comentado, de su composición química. En general, la mayor eficiencia en la absorción se produce cuando el tamaño del aerosol es similar a la longitud de onda de la radiación incidente, por lo que las partículas más pequeñas son las más eficientes a la hora de absorber la radiación.

Los valores de σ_{ap} pueden variar considerablemente en función del ambiente. Lógicamente, ambientes más urbanos, con mayor densidad vehicular, presentaran mayores valores de absorción. La tabla 1 muestra algunos valores medios de σ_{ap} obtenidos en una variedad de ambientes en la península Ibérica.

Tabla 1. Coeficientes de absorción (Mm^{-1}) en función del tipo de ambiente muestreado (se indica la altitud del enclave sobre el nivel del mar).

Localización	Ambiente	λ (nm)	σ_{ap}	Referencia
Burjassot (60 m)	Urbano	520	18.6	Segura et al., 2016
Granada (680 m)	Urbano	550	24	Titos et al., 2012
Evora (295 m)	Urbano	670	8.9	Nepomuceno et al., 2014
Barcelona (80 m)	Urbano	637	~16	Ealo et al., 2018
Elche (93 m)	Urbano	520	8.1	López-Caravaca et al., 2024
Mt. Montseny (720 m)	Regional	637	2.8	Pandolfi et al., 2011
Mt. Aitana (1558 m)	Remoto	520	2.2	Nicolás et al., 2018
Mt. Montsec (1570 m)	Remoto	637	1.5	Pandolfi et al., 2014
Mt. Izaña (2400 m)	Remoto	550	0.8	Andrews et al., 2011

Como puede apreciarse en entornos remotos (de alta montaña) los coeficientes de absorción están frecuentemente por debajo de los 3 Mm^{-1} en las longitudes de onda visibles. En los ambientes de carácter más urbano, la gran mayoría de ubicaciones están por encima de los 8 Mm^{-1} para longitudes a partir de los 520 nm. Como dato comparativo el valor de σ_{ap} en Elche para una $\lambda=660 \text{ nm}$ es de 5.7 Mm^{-1} en el estudio referenciado en la tabla 1. Esto es debido a que la mayor absorción se produce en la región UV y el valor de esta va descendiendo paulatinamente conforme λ va aumentando como se aprecia en la figura 4.

En ausencia de polvo mineral, el coeficiente de absorción presenta únicamente dos componentes, el debido a la absorción por BC y por BrC. En la gran mayoría de estudios llevados a cabo el porcentaje de absorción debido al BC siempre es superior y el debido al BrC se establece en un intervalo que oscila entre el $\sim 5\%$ y el $\sim 45\%$ (Pani et al., 2021). La variabilidad de este porcentaje radica en el tipo de fuentes predominantes en cada localización o incluso en cada periodo temporal dentro de un mismo enclave. Cuanto mayor importancia presenten las fuentes emisoras de BrC como el BB, mayor porcentaje tendrá. Véase como ejemplo (extraído de Liakakou et al., 2020) como en una misma localización (entorno de fondo urbano en Atenas) los valores de absorción debidos al BrC (σ_{BrC}) son claramente superiores durante el invierno que en verano debido a que el BB es ostensiblemente mayor durante este periodo.

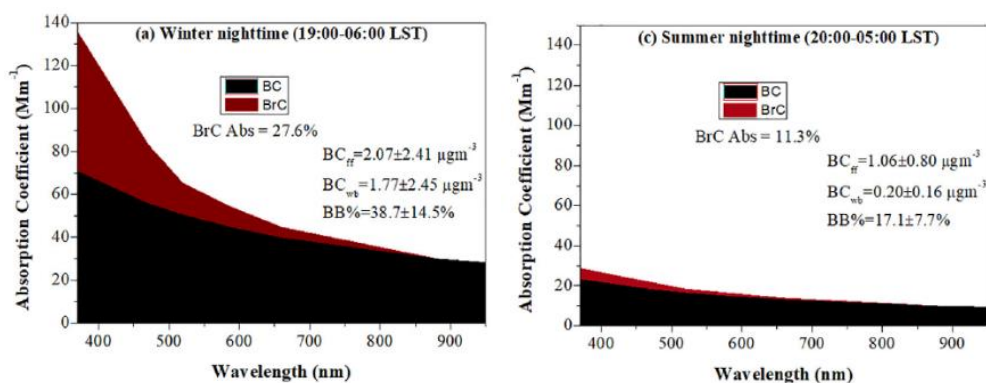


Figura 5. Variaciones espectrales del coeficiente de absorción durante el invierno y el verano en Atenas. Se muestra la contribución debida a la absorción del BrC (marrón) y por el BC (negro).

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es realizar una diferenciación en la absorción de la radiación debida al BC y BrC en dos localizaciones de características ambientales distintas, un entorno urbano y otro con carácter más rural.

La consecución de este objetivo lleva consigo alcanzar dos objetivos de carácter secundario:

- Determinar y caracterizar las dos componentes de la absorción ($BC-\sigma_{BC}$ y $BrC-\sigma_{BrC}$) en ambos enclaves.
- Cuantificar la importancia que las dos principales fuentes emisoras de BC y BrC a la atmósfera (tráfico y quema de biomasa) tienen en cada localización.



3. Metodología

3.1 Localización espacio-temporal del estudio

La toma de datos se realizó simultáneamente en dos estaciones de medida. La primera de ellas (estación UMH) ($38^{\circ}16'N$; $0^{\circ}41'W$; 86 msnm) está ubicada en el interior de la Universidad Miguel Hernández de Elche (figura 6). La estación está activa y operada por el Laboratorio de Contaminación Atmosférica (LCA) desde el año 2021. La estación está dotada del equipamiento necesario para la medida de propiedades ópticas de aerosoles y para la determinación de la concentración de partículas de diferentes tamaños. Por su ubicación podría encuadrarse dentro del tipo de estaciones cuyas mediciones corresponden a un fondo urbano. La segunda estación (estación BEN) ($38^{\circ}42'N$; $0^{\circ}46'W$; 592 msnm) está localizada en las afueras del pueblo de Beneixama (figura 6). Esta estación está dotada de un equipamiento similar a la de la estación urbana y esta operada por el LCA desde 2022. La estación BEN es una estación de fondo rural. El ambiente atmosférico monitorizado por esta estación se caracteriza durante el invierno por frecuentes emisiones procedentes de quemas de biomasa de tipo doméstico (hogares y quemas de rastrojos). Por lo que, si bien en ambas estaciones fuentes de partículas como la quema de biomasa y el tráfico están presentes, es de suponer que durante los meses más fríos en BEN predomina la primera fuente y en UMH la fuente de carácter vehicular.



Figura 6. Estación de fondo urbano ubicada en la UMH (izq.) y estación de fondo rural ubicada en Beneixama (dcha.)

La toma de datos ópticos y de concentración másica simultánea se realizó entre el final del invierno y el inicio de la primavera de 2023, en concreto desde el 07/03/2023 hasta el 05/04/2023.

3.2 Obtención de las propiedades ópticas de absorción

3.2.1 Coeficiente de absorción y concentración de BC

El coeficiente de absorción (σ_{ap}) sirve para poder cuantificar la cantidad de luz absorbida por el PM presente en una determinada área. Para obtener el valor de este coeficiente se ha utilizado un Aethalometro AE33 (ver figura 7).



Figura 7. Aethalometro AE33 utilizado en este trabajo.

En principio el AE33 proporciona valores de atenuación de la luz a causa del PM acumulado en un filtro móvil en siete longitudes de onda diferentes: 370 nm (UV), 470 nm (Azul), 520 nm (Verde), 590 nm (Amarillo), 660 nm (Rojo), 880 nm (IR) y 950 nm (IR). Sin embargo, el valor de atenuación que se obtiene (σ_{ATN}) es superior al verdadero valor de absorción ($\sigma_{ap} < \sigma_{ATN}$) debido a un efecto que tiene lugar en el filtro donde se acumula el PM conocido como “efecto de multidispersión”. El efecto se basa en que existe un incremento de la atenuación debido a la multidispersión que sufre la luz al atravesar las fibras que constituyen el filtro donde se deposita el PM. Para corregir este efecto los valores de atenuación son divididos por un factor (H^*) que depende del tipo de filtro utilizado en el AE33, en nuestro caso su valor vale 1.76 (Savadkoohi et al., 2023).

Una vez conocido el valor de σ_{ap} se puede obtener el valor de concentración de BC para cada λ . Para ello se utiliza la ecuación:

$$BC(\lambda) = \sigma_{ap}(\lambda) / MAE(\lambda) \quad (3)$$

Donde MAE es la correspondiente eficiencia de absorción másica para una determinada λ . Los valores de MAE para el BC en cada longitud de onda los proporciona el fabricante. Por ejemplo, para el caso de $\lambda = 880$ nm (valor de referencia donde se proporcionan los valores de BC debido a que en esa longitud de onda es el único compuesto absorbente) su valor es de $7.77 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. MAE es un parámetro óptico crítico que se utiliza para evaluar la capacidad de absorción de luz por parte del BC (Bond y Bergstrom, 2006) (o de cualquier otro compuesto absorbente). El valor de MAE vincula las propiedades ópticas y la concentración química del compuesto químico con capacidad de absorber la luz.

El principio de funcionamiento del AE33 y algunas de sus aplicaciones pueden verse en <https://mageesci.com/mproducts/magee-scientific-aethalometer/>. El tiempo de muestreo fue de 5 minutos, a partir del cual se han calculado los promedios horarios y diarios utilizados en este trabajo.

El AE33 también puede proporcionar gracias a un algoritmo interno (procedimiento descrito en Sandradewi et al., 2008) el porcentaje de absorción que es debido únicamente a la quema de biomasa (%BB).

3.2.2 Eficiencia de Absorción Másica (MAE)

Como ya ha sido indicado anteriormente para el caso del BC, la eficiencia de absorción másica, más conocida por sus siglas en inglés "MAE", nos indica la mayor o menor eficiencia a la absorción de la luz que presentan cualquier fracción másica, compuesto o elemento. En nuestro caso, MAE ha sido determinada para la fracción másica PM_{10} a partir de la siguiente expresión:

$$\text{MAE}(\lambda) = \sigma_{\text{ap}}(\lambda) / \text{PM}_{10} \quad (4)$$

Dentro de las distintas fracciones másicas el mayor valor de MAE se obtendría para la fracción PM_1 , ya que es en esta fracción donde principalmente se encuentra el BC.

3.2.3 AAE

El valor del Exponente de Absorción de Angstrom (Absorption Angstrom Exponent - AAE) ha sido determinado a partir de la siguiente expresión:

$$\text{AAE} = - \frac{\text{Ln} \frac{\sigma_{\text{ap}}(\lambda_1)}{\sigma_{\text{ap}}(\lambda_2)}}{\text{Ln} \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (5)$$

donde en este caso: $\lambda_1=370$ nm y $\lambda_2=950$ nm.

El valor de AAE nos indica quien es el principal componente en el proceso de absorción puesto que informa de como varia σ_{ap} con la λ . De este modo, un valor de AAE cercano a 1, nos indica que la absorción se está produciendo principalmente por el BC. Valores superiores a 1 implican la contribución de otros componentes como el polvo mineral o el BrC.

Otro método equivalente para obtener el valor de AAE es realizar una representación gráfica $\sigma_{ap} = f(\lambda)$ y a partir de ella realizar un ajuste potencial. La potencia obtenida se puede identificar al valor de AAE.

En la figura 8 tenemos dos ejemplos, en uno de ellos la fuente predominante es la quema de biomasa (donde se emite un importante contenido en BrC, además de BC). En él se puede apreciar un valor de AAE= 2.22 debido a que el BrC presenta una fuerte dependencia con la λ en la zona del UV y VIS. En el otro caso la fuente de emisión es el tráfico rodado (con un contenido predominante en BC). En este caso el valor de AAE se acerca más a 1.

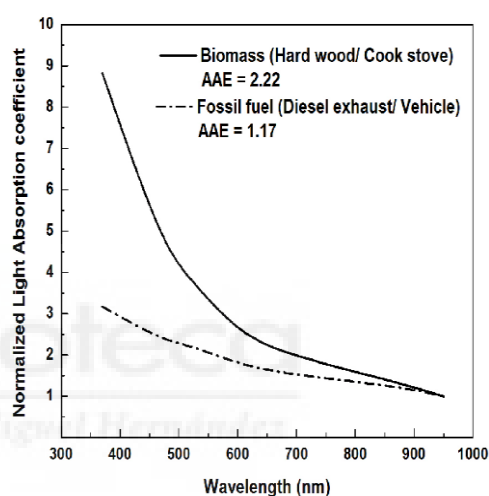


Figura 8. Representación de σ_{ap} en función de λ para aerosoles provenientes de diferentes fuentes.

3.2.4 Obtención del σ_{BrC}

Si suponemos escasa presencia de polvo mineral y por lo tanto partimos de que la absorción total de la radiación (σ_{ap}) únicamente tiene dos componentes, la debida al BC y al BrC según la ecuación:

$$\sigma_{ap,\lambda} = \sigma_{BC,\lambda} + \sigma_{BrC,\lambda} \quad (6)$$

Siguiendo el procedimiento anterior de representar $\sigma_{ap} = f(\lambda)$ podemos llegar a obtener la contribución del BrC en el proceso de absorción.

Véase el siguiente ejemplo mostrado en la figura 9 (obtenido de Rathod y Sahu, 2022) para ejemplificar el procedimiento. En la figura se ha representado en la línea azul la variación con la λ de σ_{ap} total obtenida (es decir con las contribuciones en la absorción tanto del BrC como del BC) con el Aethalometro. Por otro lado, se ha obtenido cual sería la variación espectral si únicamente el absorbente fuese el BC (λ^{-1}) (línea negra). Esta variación se obtiene gracias a que sabemos que en la zona IR únicamente el BC es capaz de absorber la radiación. Finalmente, por diferencia, para cada λ , se obtiene el valor del coeficiente de absorción debido al BrC (línea roja).

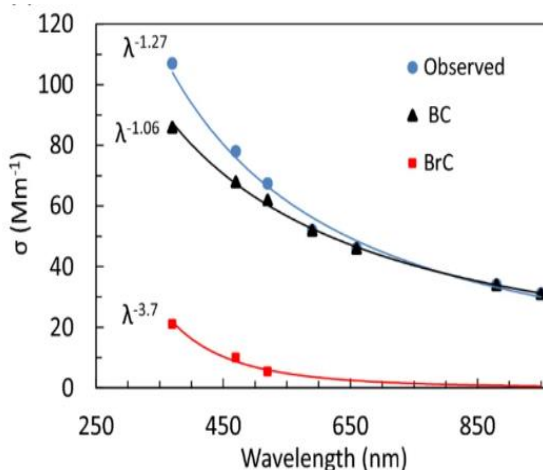


Figura 9. Representación de σ_{ap} total en función de λ (azul), y la correspondiente al BC (negro). La absorción debida al BrC (rojo) se obtiene por diferencia de ambas.

Como se puede apreciar a partir de $\lambda > 660$ nm las contribuciones del BrC son insignificantes. En el ejemplo anterior y de forma aproximada podríamos decir que de unos $110 Mm^{-1}$ de absorción total a 370 nm, casi $90 Mm^{-1}$ corresponden a la absorción debida al BC y el resto, unos $20 Mm^{-1}$, son debidos al BrC.

3.3 Obtención del PM y las variables meteorológicas

Los registros de PM han sido obtenidos gracias a dos captadores gravimétricos ubicados en ambas estaciones de medida. En la estación UMH el captador utilizado fue uno de bajo volumen $2.3 m^3 \cdot h^{-1}$ (Derenda 3.1), mientras que en la estación de fondo rural el medidor fue de alto volumen $30 m^3 \cdot h^{-1}$ (MCV). Los filtros utilizados se pesaron por cuadruplicado antes y después de la recogida de muestras en una balanza Ohaus AP250D 8 (en el caso de los filtros recogidos en la estación urbana) y una Mettler-Toledo modelo XP105 (para el caso de los filtros recogidos en la estación rural). Todos los filtros se acondicionaron en una cámara de temperatura y humedad controladas ($50 \pm 5\%$, 20 ± 1 °C) durante al menos 24 h antes de pesarlos.

Los parámetros meteorológicos utilizados en la estación urbana han sido obtenidos a partir de los datos proporcionados por una estación meteorológica situada a las afueras de la ciudad. La estación denominada “Agroalimentari” pertenece a la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica. La disponibilidad de los datos puede encontrarse en: (<https://mediambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/datos-historicos>). Datos meteorológicos obtenidos de AVAMET (Asociación Valenciana de Meteorología) (<https://www.avamet.org/>) se utilizaron para la caracterización ambiental de la estación rural.



4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización del ambiente atmosférico

En este apartado detallamos el ambiente atmosférico de las dos ubicaciones escogidas. Nos centramos para ello en la comparación de las diferentes variables atmosféricas monitorizadas (temperatura (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (v) y la precipitación acumulada y el PM₁₀ en ambos ambientes.

La tabla 2 presenta los valores medios de las variables meteorológicas junto con su desviación estándar (DS). También se incluye la oscilación ($\text{valor}_{\text{max}} - \text{valor}_{\text{min}}$) de la temperatura y la humedad relativa.

Tabla 2. Valor medio y DS de las principales variables meteorológicas medidas.

Parámetro	UMH	BEN
T (°C)	17.9 (3.2)	14.1 (2.5)
Osc. T (°C)	9.6 (2.3)	15.8 (4.2)
HR (%)	53.1 (13.3)	54.7 (8.0)
Osc. HR (%)	42.0 (10.8)	35.3 (10.4)
v (m/s)	1.6 (0.5)	1.2 (0.5)
V _{max} (m/s)	8.3 (2.8)	8.6 (2.1)
Precipitación (mm)	0.8	1.2

Como se puede apreciar la temperatura en la ubicación urbana es algo mayor que en el entorno rural, lo cual es lógico ya que BEN está situada bastante más al interior de la provincia y a una considerable mayor altitud sobre el nivel del mar. Podemos considerar que la temperatura media es ligeramente elevada en el caso de UMH y muy elevada en BEN para el periodo de estudio (finales del invierno y principios de la primavera). Esta consideración se basa en el hecho de que por ejemplo la T_{media} en BEN no superaba durante el mes de marzo los 10 °C en los tres años anteriores (2020-2022) a este estudio (Fuente: AVAMET). También llama la atención la gran oscilación térmica ($T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$) registrada en BEN. La humedad relativa y la velocidad en ambos enclaves son muy similares. Como curiosidad hemos detectado un comportamiento diferente en la HR_{max} . Mientras que la HR_{max} (que suele acontecer durante el periodo nocturno)

registrada en BEN (datos no mostrados) se ha mantenido prácticamente constante durante el periodo de medida, en UMH ha oscilado notoriamente. La precipitación en ambas zonas de estudio es prácticamente nula. Lo cual nuevamente llama la atención ya que, en años anteriores, durante el mismo periodo de muestreo, la precipitación no fue tan escasa, sobre todo en BEN.

Como hemos indicado varios de los parámetros meteorológicos analizados en BEN han resultado desviarse significativamente de los esperados a razón de los registros mostrados en otros años durante el mismo periodo de medida. Este hecho puede tener cierta influencia en las medidas de absorción que se han efectuado puesto que la influencia de la quema de biomasa, como fuente importante de partículas con capacidad de absorción de la luz, sea algo menor a la esperada.

De la tabla 2 también podemos deducir que, al registrarse muy pequeñas diferencias en las variables meteorológicas en los dos enclaves, las posibles diferencias que puedan obtenerse en los parámetros de absorción de una y otra ubicación no estarán vinculados de forma significativa a la meteorología.

El valor de PM_{10} también nos puede informar del ambiente atmosférico de un entorno indicándonos la mayor o menor concentración de material particulado existente. Las concentraciones medias obtenidas han sido muy similares: $PM_{10(UMH)} = 19.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $PM_{10(BEN)} = 19.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El número de datos diarios en cada ubicación fue de $N_{BEN}=29$ y $N_{UMH}=23$. Valores estadísticos del PM_{10} ambos pueden verse en la figura 10.

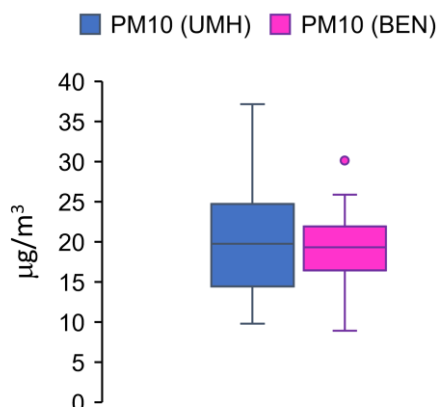


Figura 10. Comparación estadística del PM_{10} registrado en los dos enclaves.

Al respecto de esta figura se debe indicar que los segmentos horizontales que están dentro de las cajas representan el valor de la mediana, las partes inferior y superior de las cajas informan sobre los valores de los percentiles 25 (P25) y 75 (P75) y los segmentos superiores (Ls) e inferiores (Li) están relacionados con el rango intercuartílico (RI) de la forma: $Ls = RI \cdot 1.5 + P75$ y $Li = P25 - RI \cdot 1.5$ siendo $RI = (P75 - P25)$. Los puntos representan valores atípicos.

Puede observarse como la variabilidad de concentraciones fue superior en UMH. Los valores de concentración más elevados en ambos sitios tuvieron lugar el día 30/03/2023 debido a una intrusión de masa de aire sahariano procedente del norte de África. Si bien su impacto no fue muy significativo se llegaron a alcanzar valores máximos de $37.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en UMH y $30.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en BEN respectivamente.

Teniendo en cuenta que el ambiente muestreado por ambas estaciones es diferente (fondo urbano y rural), se esperaba encontrar una mayor disparidad en los valores de PM_{10} registrados ambas ubicaciones.

4.2 Parámetros ópticos de absorción

4.2.1 Valores estadísticos

En este apartado vamos a mostrar e interpretar los valores referentes a los distintos parámetros de absorción medidos. También se analizará su variación temporal. La tabla 3 muestra los valores medios y desviaciones estándar (DS) de dichos parámetros. El día de intrusión no ha sido considerado.

Los valores mostrados en la tabla 3 son valores esperados en función de los ambientes que se han muestreado. Lógicamente el entorno urbano presenta mayor valor en la absorción, si bien la diferencia es muy poco significativa, apenas un 18% en la zona UV. En cualquier caso, los valores de absorción en el entorno urbano no son muy elevados y se sitúan en la parte baja de valores registrados en entornos similares en España (López-Caravaca et al., 2024). Se puede observar como la absorción va disminuyendo a medida que la longitud de onda aumenta, siendo la absorción en la zona UV prácticamente el triple que en la zona IR. Esto es debido a que el único compuesto que es capaz de absorber la radiación en la zona IR es el BC, mientras que en el VIS y UV el BrC también lo puede hacer. El valor de BC tampoco difiere mucho e induce a considerar que

la fuente de tráfico (principal fuente de BC en entornos urbanos) tiene un similar peso específico en ambos enclaves.

Tabla 3. Valores medios y desviaciones estándar de los parámetros ópticos de absorción monitorizados en ambas estaciones.

Parámetro	UMH	BEN
$\sigma_{ap,370}$ (Mm^{-1})	9.3 (4.9)	7.6 (3.0)
$\sigma_{ap,440}$ (Mm^{-1})	7.5 (3.8)	5.9 (2.3)
$\sigma_{ap,520}$ (Mm^{-1})	6.2 (3.0)	4.7 (1.8)
$\sigma_{ap,590}$ (Mm^{-1})	5.2 (2.5)	4.0 (1.5)
$\sigma_{ap,660}$ (Mm^{-1})	4.5 (2.2)	3.4 (1.3)
$\sigma_{ap,880}$ (Mm^{-1})	3.3 (1.6)	2.4 (0.9)
$\sigma_{ap,950}$ (Mm^{-1})	3.2 (1.5)	2.2 (0.9)
BC_{880} (ng/m^3)	713.0 (358.5)	543.5 (212.5)
BB (%)	18.8 (3.7)	28.3 (6.0)
$AAE_{370-950}$	1.213 (0.070)	1.336 (0.110)

El valor del % de BB obtenido en el entorno rural es superior al registrado en UMH, indicando que la combustión de biomasa ya sea por causas domésticas o quemas controladas es superior

. Resultado esperable. Del mismo modo, el protagonismo del BrC en la absorción de la luz en BEN debe ser superior ya que el valor de AAE es algo mayor que en UMH. Este resultado también es lógico ya que el BrC tiene como principal fuente de emisión la quema de biomasa.

Finalmente, los valores de MAE promedio obtenidos para $\lambda=370$ nm (ver metodología sección 3.2.2) son similares ($0.467 m^2 \cdot g^{-1}$ en UMH y $0.391 m^2 \cdot g^{-1}$ en BEN) lo cual indica una parecida eficiencia de absorción de la luz por parte del PM_{10} en ambos ambientes.

4.2.2 Distribución porcentual de frecuencias

Procedemos a comparar la distribución porcentual de frecuencias (utilizando valores horarios-figura 11) para $\sigma_{ap,370}$, y AAE en ambos enclaves.

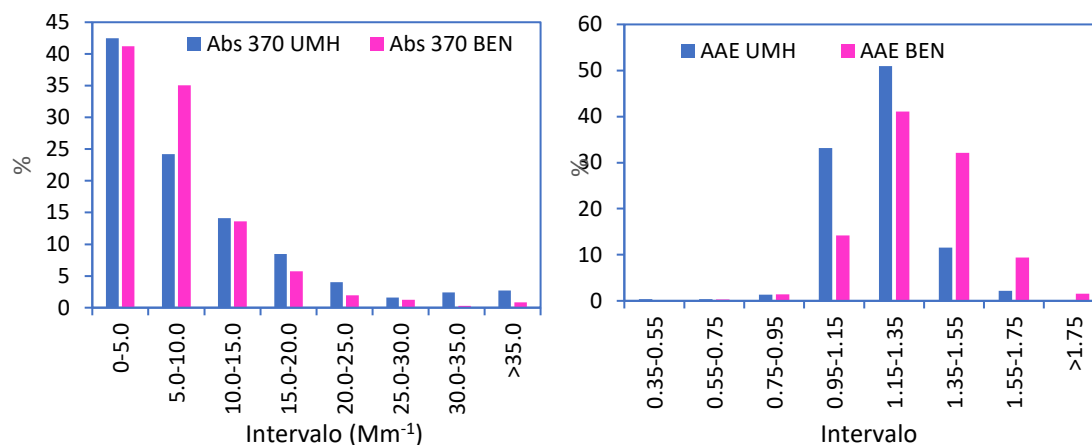


Figura 11. Comparación de la distribución porcentual de frecuencias para $\sigma_{ap,370}$, y AAE en UMH y BEN.

Respecto a las distribuciones de absorción se aprecia que, tanto en UMH como en BEN, las absorciones más pequeñas ($<5.0 \text{ Mm}^{-1}$) son claramente dominantes con valores porcentuales superiores al 40%. El porcentaje de absorción en el siguiente intervalo también sigue siendo muy significativo en BEN (35%). De hecho, en la localización rural más del 75% de sus registros de absorción están por debajo de los 10 Mm^{-1} . Los valores intermedios y altos de absorción se registran predominantemente en UMH.

La distribución de frecuencias de AAE es bastante diferente a la presentada por la absorción. De hecho, ambas distribuciones tienen una forma que se asemeja a la distribución gaussiana. Es el intervalo de valores entre 1.15 y 1.35 el mayoritario en ambos ambientes. Como era de esperar la asimetría de la distribución en el caso de BEN es claramente positiva registrando $\sim 10\%$ de sus registros con valores superiores a 1.55. Este conjunto de valores estará sin duda asociados con episodios de quema de biomasa.

Se ha realizado un test de Kolmogorov-Smirnov para determinar la normalidad de estas distribuciones (AAE). En el caso de UMH se ha obtenido un $p\text{-value} = 0.01 < 0.05$ y para BEN un $p\text{-value}$ de $0.13 > 0.05$. Por lo que podemos afirmar que la distribución de valores de AAE en el entorno rural se corresponde con una distribución de tipo normal.

4.2.3 Evolución temporal diaria

La figura 12 presenta la evolución temporal diaria de algunos parámetros de absorción durante el periodo de medida en ambas localizaciones.

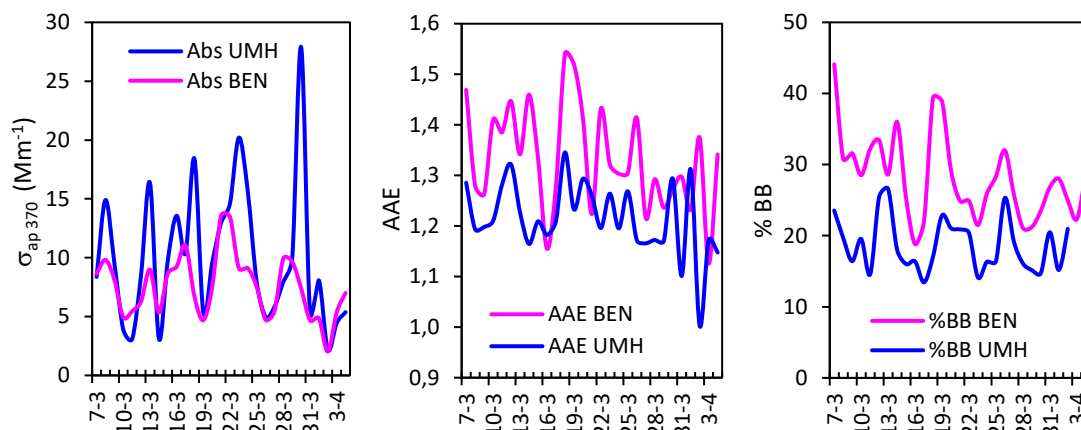


Figura 12. Comparación de la evolución temporal diaria entre los dos enclaves de medida de: la absorción a 370 nm, el %BB y el valor de AAE.

La absorción ($\lambda=370$ nm) en UMH presenta un elevado máximo diario el día 30/03/2023 (~ 28 Mm^{-1}), día que tuvo lugar la intrusión de masas de aire sahariano. Por lo que ese día la absorción total presentará además de las dos contribuciones habituales (BC y BrC) un porcentaje de absorción procedente del polvo mineral. Sin embargo, ese mismo máximo curiosamente no se registra en BEN. Posiblemente por que el impacto en PM fue menor en la estación rural. Tanto los valores de AAE como de %BB son claramente superiores en BEN mostrando dos claros máximos en ambos parámetros, el primer día de medida y el 18/03/2023. Es de suponer que en ambos días la quema de biomasa en el entorno rural fue significativa.

La relación %BB y valor de AAE en ambas estaciones se puede observar en la figura 13. Como se indicó anteriormente, esta relación viene determinada por el hecho de que a mayor valor de AAE, mayor implicación del BrC en la absorción y por otro lado la fuente principal de BrC es la quema de biomasa. La figura muestra una correlación muy similar en ambos enclaves puesto que la relación entre %BB y AAE es independiente del tipo de ambiente muestreado.

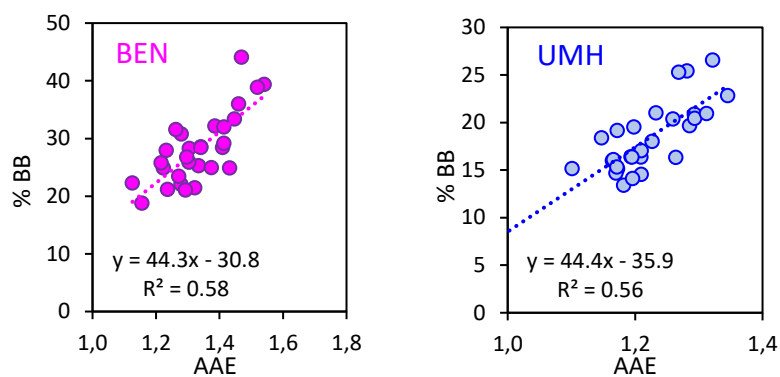


Figura 13. Relación entre %BB y AAE en ambas estaciones.

4.3 Valores de absorción del BC y BrC

Siguiendo el procedimiento aplicado para la obtención de la absorción debida al BrC (σ_{BrC}) descrito en la metodología, los valores diarios y horarios de σ_{BrC} han sido obtenidos. La tabla 4 muestra sus valores medios y el porcentaje respecto al valor total de absorción en cada longitud de onda en los dos emplazamientos.

Tabla 4. Valores medios (Mm^{-1}) debidos a la absorción por BC y BrC y contribución porcentual del BrC en los dos emplazamientos.

λ (nm)	$\sigma_{BC}(UMH)$	$\sigma_{BC}(BEN)$	$\sigma_{BrC}(UMH)$	$\sigma_{BrC}(BEN)$	% $\sigma_{BrC}(UMH)$	% $\sigma_{BrC}(BEN)$
370	8.05	5.76	1.76	1.80	17.7	23.8
440	6.77	4.84	1.07	1.08	13.6	18.3
520	5.73	4.10	0.58	0.64	9.2	13.6
590	5.05	3.61	0.23	0.30	4.2	7.8
660	4.51	3.23	0.09	0.18	2.0	5.2
880	3.39	2.42				
950	3.14	2.24				

Como se puede apreciar los valores de $\sigma_{BrC}(BEN)$ son prácticamente iguales o incluso mayores a los obtenidos en la localización urbana por lo que el % de absorción debida al BrC es mayor en todas las longitudes de onda. Este porcentaje lógicamente va disminuyendo conforme aumenta la longitud de onda, en la que teóricamente para una $\lambda=880$ nm debe ser cero.

Los porcentajes de σ_{BrC} obtenidos en ambientes urbanos en todo el mundo a 370 nm suelen oscilar entre un 10 y los 45% (Pani et al., 2021), por lo que el

porcentaje de σ_{BrC} obtenido en la localización urbana (17.7) se sitúa en la parte inferior de este intervalo.

Una particularidad que se ha detectado es la mayor coincidencia de fuentes de BrC y BC obtenida en UMH respecto a la encontrada en BEN. Para ello hemos representado la variación de la absorción de BC y BrC en ambos enclaves (figura 14).

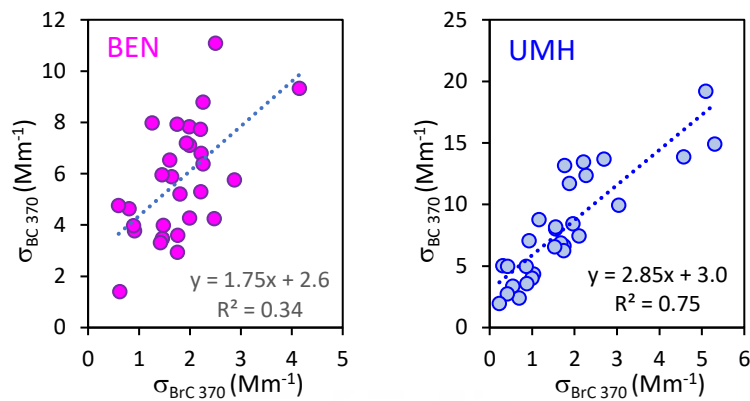


Figura 14. Correlación entre las absorciones por BrC y BC en ambas estaciones.

La menor correlación encontrada en BEN puede deberse a que además de las fuentes coincidentes entre BC y BrC (BB y tráfico), es posible que la importancia de otras fuentes de BrC como el BrC secundario o el biogénico sea más significativa que en UMH.

4.3.1 Evolución horaria

La figura 15 nos muestra la evolución temporal promedio horaria en ambas localizaciones de la absorción debida al BC, al BrC y AAE durante el periodo de medida.

El perfil horario de la absorción por BrC y BC en UMH y en BEN presenta un patrón marcado por la mayor o menor densidad vehicular. Esta muestra picos en la franja horaria (07:00-09:00h) y sobre el final de la jornada (~20:00h). Los mínimos en la absorción registrados durante las horas centrales del día se deben principalmente a que en esas horas se produce una mayor dilución de contaminantes consecuencia de una mayor altura de la capa de mezcla. Dos diferencias que se evidencian entre los dos enclaves son: 1- parece que en el ámbito rural los máximos van desfasados entre una y dos horas respecto a los

registrados en UMH (esto da a entender que la actividad antrópica se inicia y acaba antes) y 2- en el caso de la absorción por BrC los valores registrados en BEN son comparables sino superiores a los de UMH. No obstante, el perfil de σ_{BrC} mostrado en la estación rural (perfil más bien urbano) enmascara la hora/s de quema de biomasa en dicho entorno, a no ser que estas coincidan con máximos en la densidad vehicular.

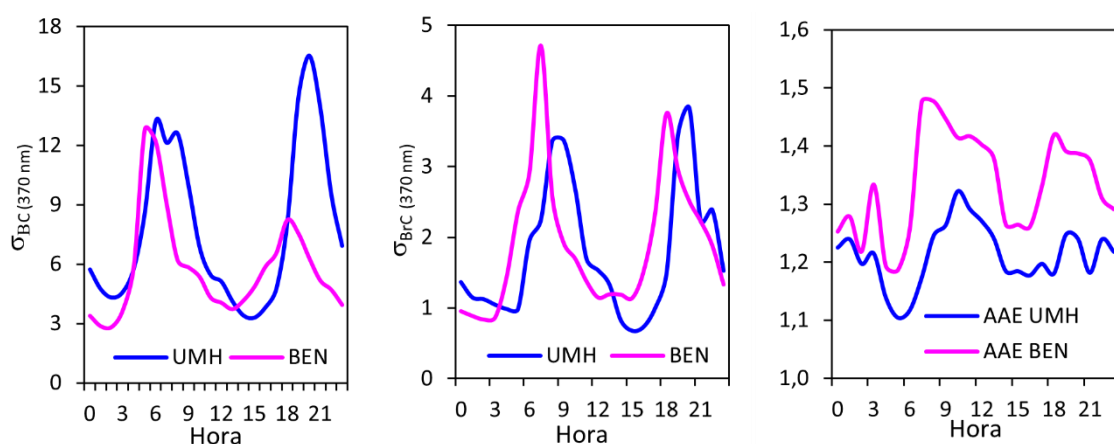


Figura 15. Comparación de la evolución temporal horaria entre los dos enclaves de medida de: la absorción a 370 nm por BC y BrC y el valor de AAE.

Esta última suposición en parte puede ser probada viendo la evolución del valor de AAE en el entorno rural. En las mismas horas en las que $\sigma_{BrC(BEN)}$ presenta máximos, los valores de AAE son los más elevados (valores superiores a 1.4). Por lo tanto, es en esos periodos donde supuestamente más emisiones por quema de biomasa tiene lugar.

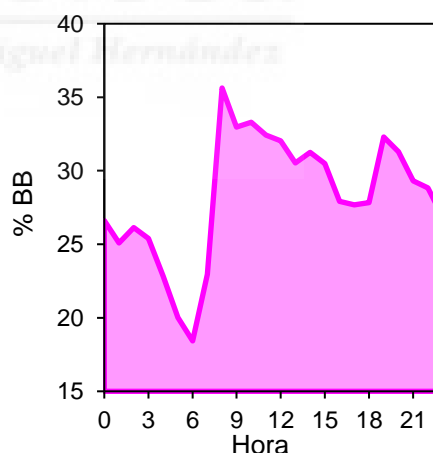


Figura 16. Evolución horaria del porcentaje de BB en la estación rural.

Para reafirmar este resultado la figura 16 muestra la evolución horaria del %BB en la estación rural. Recordemos que un mayor % de quema de BB implicaría un mayor valor de la absorción por parte del BrC y también un mayor valor de AAE. Según se puede apreciar el pico coincidente al inicio de la mañana justificaría los máximos matinales de AAE y $\sigma_{BrC(BEN)}$ mostrados en la figura 15. Sin embargo, el descenso mostrado en los valores de %BB durante las horas centrales del día no es tan acusado como el de la absorción por BrC si bien el máximo relativo de la tarde si aparece.

5. Conclusiones

Detallamos las conclusiones obtenidas en el presente estudio:

- La meteorología existente entre ambos enclaves parece no ser causa de una posible diferenciación en los valores de absorción.
- Los valores de PM_{10} y σ_{ap} , si bien ligeramente superiores en el entorno urbano, han sido más similares de lo esperado. Por lo que posiblemente la influencia antrópico-urbana de la estación UMH está bastante minimizada. Muestra de ello es la similitud de valores de BC en ambos enclaves.
- Como cabía esperar, la contribución de la fuente quema de biomasa es superior en la estación rural lo que deriva en mayores valores de AAE y una absorción por BrC similar (incluso ligeramente superior) a la del enclave urbano.
- En función de las correlaciones entre σ_{BC} y σ_{BrC} obtenidas en ambas localizaciones, parece ser que la influencia de otras fuentes de BrC (fuente secundaria y biogénica) en la estación rural sean más significativas.
- Los perfiles horarios de absorción tanto por BrC como por BC son bastante similares y muestran un patrón relacionado con la mayor o menor densidad vehicular. Cabe la posibilidad que en el entorno rural este perfil enmascare o coincida con la emisión por quema de biomasa.

6. Proyección futura

Destacamos dos proyectos futuros que complementarían el trabajo realizado y podrían proporcionar información relevante.

- Ampliar el periodo de estudio a un año para poder observar la variación estacional de los parámetros monitorizados. A lo largo de un año, otras fuentes emisoras y determinados eventos como periodos de elevada estabilidad atmosférica o intrusiones de masas de aire sahariano podrían tener relevancia en la variabilidad de la absorción de la radiación.
- Aplicar diversas metodologías sobre los datos obtenidos con el objetivo de poder determinar la contribución de cada una de las fuentes emisoras de compuestos absorbentes. La aplicación de estos procedimientos nos llevaría a cuantificar cuanta de la absorción por BC es debida a la quema de biomasa y cuanta al tráfico. Del mismo modo en el caso del BrC se podría además obtener la influencia de la fuente secundaria.



7. Bibliografía

- Andrews, E., Ogren, J.A., Bonasoni, P., Marinoni, A., Cuevas, E., Rodríguez, S., Sun, J.Y., Jaffe, D.A., Fischer, E.V., Baltensperger, U., Weingartner, E., Coen, M.C., Sharma, S., Macdonald, A.M., Leaitch, W.R., Lin, N.H., Laj, P., Arsov, T., Kalapov, I., Jefferson, A., Sheridan, P. (2011). Climatology of aerosol radiative properties in the free troposphere. *Atmos. Res.* 102, 365-393.
- Bond, T.C., Bergstrom, R.W. (2006). Light Absorption by Carbonaceous Particles: An Investigative Review. *Aerosol Sci. Tech.* 40, 27–67.
- Boucher, O. (2015). *Atmospheric Aerosols: Properties and climate impacts*. Springer. ISBN 978-94-017-9648-4.
- Ealo, M., Alastuey, A., Pérez, N., Ripoll, A., Querol, X., and Pandolfi, M.: Impact of aerosol particle sources on optical properties in urban, regional and remote areas in the north-western Mediterranean, *Atmos. Chem. Phys.* 18, 1149–1169.
- IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Liakakou, E., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G., Stavroulas, I., Tsagkaraki, M., Paraskevopoulou, D., Bougiatioti, A., Dumka, U.C., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N., 2020. Long-term brown carbon spectral characteristics in a Mediterranean city (Athens). *Sci. Total Environ.* 708, 135019.
- López-Caravaca, A., Crespo, J., Galindo, N., Yubero, E., Clemente, A., Castañer, R., Nicolás, J.F. (2024). Characterization of water-soluble organic carbon absorption at an urban background site in the south-eastern Iberian Peninsula. *Atmos. Environ.* 324, 120435.
- Myhre, G., Myhre, C.E.L., Samset, B. H., Storelvmo, T. (2013). Aerosols and their Relation to Global Climate and Climate Sensitivity. *Nat. Educ. Know.* 4(5), 7.

- Nepomuceno, S., Wagner, F., Silva, A. (2014). Multiyear Measurements of the Aerosol Absorption Coefficient Near the Surface in a Small-Sized Urban Area in Portugal. *Adv. Meteorol.* 24.
- Nicolás, J.F., Castañer, R., Crespo, J., Yubero, E., Galindo, N., Pastor, C., (2018). Seasonal variability of aerosol absorption parameters at a remote site with high mineral dust loads. *Atmos. Res.* 210, 100-109.
- Pandolfi, M., Cusack, M., Alastuey, A., Querol, X. (2011). Variability of aerosol optical properties in the Western Mediterranean Basin. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 8189-8203.
- Pandolfi, M., Ripoll, A., Querol, X., Alastuey, A. (2014). Climatology of aerosol optical properties and black carbon mass absorption cross section at a remote high-altitude site in the western Mediterranean basin. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 6443-6460.
- Pani, S.K., Lin, N-H., Griffith, S.M., Chantara, S., Lee, C-T., Thepnuan, D., Tsai, Y.I. (2021). Brown carbon light absorption over an urban environment in northern peninsular Southeast Asia. *Environ. Pollut.* 276, 116735.
- Rathod, T.D., Sahu, S.K. (2022). Measurements of optical properties of black and brown carbon using multi-wavelength absorption technique. *J. Earth Syst. Sci.* 131, 32.
- Sandradewi, J., Prévôt, A.S.H., Weingartner, E., Schmidhauser, R., Gysel, M., Baltensperger, U. (2008). A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer. *Atmos. Environ.* 42, 101-112.
- Savadkoobi, M., Pandolfi, M., Reche, M.C., Niemi, J.V., Mooibroek, D., Gloria Titos, G., Green, D.C., Tremper, A.H., Hueglin, C., Liakakou, E., Mihalopoulos, M., Stavroulas, I., Artiñano, B., Coz, E., Alados-Arboledas, L., Beddows, D., Riffault, V., De Brito, J.F., Bastian, S., Baudic, A., Costabile, F., Chazeau, B., Gómez-Amo, J.L., Estellés, V., Matos, V., van der Gaag, E., Gille, G., Luoma, K., Manninen, H.E., Norman, M., Silvergren, S., Petit, J-E., Putaud, J-P., Rattigan, O.V., Timonen, H., Tuch, T., Merkel, M., Weinhold, K., Vratolis, S., Vasilescu, J., Favez, O.,

Harrison, R.M., Lag, P., Wiedensohler, A., Hopke, P.H., Petäjä, T., Querol, X. (2023). The variability of mass concentrations and source apportionment analysis of equivalent black carbon across urban Europe. *Environ. Inter.* 178, 108081.

- Segura, S, Estellés, V., Esteve, A.R., Marcos, C.R., Utrillas, M.P; Martinez-Lozano, J.A. (2016). Multiyear in-situ measurements of atmospheric aerosol absorption properties at an urban coastal site in western Mediterranean. *Atmos. Environ.* 129, 18-26.
- Titos, G., Foyo-Moreno, I., Lyamani, H., Querol, X., Alastuey, A. (2012). Optical properties and chemical composition of aerosol particles at an urban location: An estimation of aerosol mass scattering and absorption efficiencies. *J. Geophys. Res.* 117, D04206.
- Wichmann, H.E., Peters, A. (2000). Epidemiological evidence of the effects of ultrafine particle exposure. *Philos. Trans. A* 358, 2751–2769.

