
Trabajo de fin de grado

GRADO EN FÍSICA



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

EFECTO DE LAS NUBES SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA ESPECTRAL

Autor: Diego Ruiz Ramos

*Tutores: David Mateos Villán
Roberto Román Díez*

29 de junio de 2021

Índice

Abstract	II
Resumen	II
Índice de figuras	III
1. Introducción	1
1.1. Definiciones previas	2
1.1.1. Radiación solar. Absorción y scattering Rayleigh y Mie	3
1.1.2. La radiación UV. Componentes y tipos	4
1.2. Dependencia con los gases atmosféricos. La columna de ozono	7
1.3. Dependencia con la cantidad de aerosoles	9
1.4. Dependencia con la nubosidad	10
1.5. Objetivos	11
2. Metodología: Instrumentación, medidas y modelo	13
2.1. Estación de medida e instrumentación	13
2.2. Medidas y modelo utilizados	15
2.3. Procedimiento y metodología	16
3. Resultados	19
3.1. Validación del modelo	19
3.1.1. Radiación global	19
3.3.2. Radiación directa (Beam)	20
3.2. Dependencia con las nubes. CMF	21
3.2.1. Radiación global	22
3.2.2. Radiación directa	23
4. Discusión y conclusiones	25
ANEXOS	I
A. Parámetros estadísticos	I
B. Código	III
C. Gráficas	IX
Referencias	XI

Abstract

Ultraviolet (UV) radiation is the most energetic among all extraterrestrial sources that reach the Earth, being able to cause multiple effects on live beings inhabiting it. There are numerous factors controlling the amount of radiation reaching, as well as the way it hits the Earth's surface. In this study, the effect of one of the main UV radiation modulators, the clouds, which can absorb or scatter radiation, preventing it from reaching the ground level; will be analyzed.

There are simulated data for clear sky conditions at our disposal, obtained by *LibRadtran* radiative transference model. They will be validated, in the first place, proving that they are an accurate approximation to experimental data measured on cloud-free sky days. Once their usefulness is certified, cloud enhancing or attenuating effect over UV radiation will be quantified. For this purpose, a cloud characteristic parameter, CMF (*Cloud Modification Factor*), will be calculated as a function of sky cloudiness.

Resumen

La radiación ultravioleta (UV) es la más energética de todas las fuentes extraterrestres que llegan a la Tierra, pudiendo tener múltiples efectos sobre los seres vivos que habitan en ella. Son numerosos los factores que controlan la cantidad y la manera en la que esta radiación llega a la superficie terrestre. En este estudio se analizará el efecto de uno de los principales moduladores de la radiación UV, las nubes, las cuales pueden absorber o dispersar parte de ella, evitando que alcance el nivel del suelo.

Se dispone de datos simulados para el caso de cielos despejados de nubes obtenidos con el modelo de transferencia radiativa *LibRadtran*, los cuales se validarán en primer lugar, comprobando que se tratan de una buena aproximación a los datos experimentales medidos en días de cielo sin nubes. Una vez certificada su utilidad, se cuantificará el efecto atenuador o acentuador de las nubes sobre la radiación UV mediante un parámetro característico de las mismas, el CMF (*Cloud Modification Factor*), en función de la nubosidad del cielo.

Índice de figuras

1. Introducción	1
1.1. Irradiancia solar extraterrestre (negro) y a nivel del suelo (gris). Espectro a nivel de suelo tomado con una elevación solar de 44° sobre el horizonte. Correspondiente a Toledano (2005) [1]	2
1.2. Ángulos solares cenital, acimutal y de elevación [2]	3
1.3. (a): Scattering Rayleigh, (b): Scattering Mie y (c): Mie para partículas grandes. Correspondiente a Mateos (2012) [3]	4
1.4. Distribución de radiación solar directa, difusa y absorbida. Correspondiente a Iqbal (1983) [4]	5
1.5. Espectro de acción eritemático normalizado, irradiancia espectral en la superficie (gris, Figura 1.1) e irradiancia UVER espectral (negro). Escala logarítmica en el eje de coordenadas. Correspondiente a Román (2014) [5]	6
1.6. Protección solar recomendada en función del índice UV. (OMS, 2003) [6]	7
1.7. Ciclo de Chapman	8
1.8. Variación del AOD con λ en función de los parámetros α y β	10
2. Metodología	13
2.1. Espectrorradiómetro Bentham DMc-150	13
2.2. Estación del GFAT en la azotea del CEAMA	14
2.3. Fotómetro CIMEL CE-318	15
3. Resultados	19
3.1. Datos de irradiancia medidos (azul) y modelados (rojo) para la radiación global el día 30 de octubre de 2008, a las 9:00 horas, con medida de 0 octas y un SZA de 66.021°	19
3.2. Representación espectral de los parámetros estadísticos absolutos y relativos de la comparativa modelo-medidas para la radiación global	20
3.3. Datos de irradiancia medidos (azul) y modelados (rojo) para la radiación global el día 30 de octubre de 2008, a las 9:05 horas, con medida de 0 octas y un SZA de 65.288°	20
3.4. Representación espectral de los parámetros estadísticos absolutos y relativos de la comparativa modelo-medidas para la radiación directa	21
3.5. CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación global	22
3.6. CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación directa	23

Anexo C

	IX
C.1. <i>Parámetros estadísticos relativos (en %) para la radiación global. Otro método de cálculo.</i>	IX
C.2. <i>r^2 para cada longitud de onda de la radiación global</i>	IX
C.3. <i>Parámetros estadísticos relativos (en %) para la radiación directa. Otro método de cálculo.</i>	IX
C.4. <i>r^2 para cada longitud de onda de la radiación directa</i>	IX
C.5. <i>CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación global (280-400nm)</i>	X
C.6. <i>CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación global: Datos despreciados (280-300nm)</i>	X
C.7. <i>CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación directa (280-400nm)</i>	X
C.8. <i>CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación directa: Datos despreciados (280-310nm)</i>	X

Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo.

Agradecer enormemente a mis tutores Roberto Román Díez y David Mateos Villán la implicación y dedicación mostrada durante estos meses, la paciencia y ayuda que me han prestado cuando no conseguía avanzar, por sus correcciones, ideas, enseñanzas y ánimos que, aunque tuviera que ser virtualmente, me llegaban con cada correo.

Dar las gracias a mis padres, Jose Ángel y M^a Isabel, y a mi hermana, Elena, pilares fundamentales en mi vida. Por su cariño, su bondad, sus consejos. Por guiarme y ayudarme a ser la persona que soy hoy en día, por estar siempre ahí, escucharme y darme todo lo que he necesitado, así como a mis abuelos y al resto de mi familia.

A mis amigos, que también son familia, a los de siempre y a los de ahora, por las palabras de ánimo cuando más lo necesitaba, todas las risas y experiencias vividas y hacer que disfrute más de todo este camino. Por ser compañeros de alegrías y de tristezas, de desahogo y de tan buenos momentos, además de los que están por venir.

Acordarme también de mis compañeros, amigos, con los que he coincidido estos cuatro años, por hacer llevaderos los periodos más duros de la carrera y por todos los buenos que siempre recordaré. Gracias por haber formado parte de esta etapa, sin vuestra ayuda esto no habría sido posible.

Mención especial para mi novia, Lidia, a la que quiero mostrar todo mi agradecimiento por su apoyo incondicional, por estar presente en los peores y en los mejores momentos, por tu comprensión, tus ánimos, tu cariño, cada sonrisa que me sacas, por entenderme y motivarme. Por hacer la vida más fácil, lograr que confíe en mí mismo y hacerme ver el lado bueno de las cosas. Sé que contigo cualquier meta será alcanzable.

Por último, agradecer al Grupo de Física de la Atmósfera (GFAT) de la Universidad de Granada la cesión de los datos del espectrorradiómetro Bentham utilizados para este trabajo.

A mi familia

1. Introducción

El Sol es una estrella que se comporta como un cuerpo negro cuya superficie se encuentra a una temperatura media de 5790 K (*de la Casinière y Cachorro, 2008*) [7]. Está compuesto principalmente de hidrógeno y emite un espectro de radiación según la ley de Planck. Al ser el cuerpo celeste más próximo a la Tierra, constituye la principal fuente de toda la energía extraterrestre que alcanza nuestra atmósfera.

Esta radiación se puede dividir en tres intervalos según su longitud de onda, λ , los cuales, de mayor a menor λ son: el infrarrojo (IR) cercano, el *visible* (llamado así por contener las longitudes de onda perceptibles por el ojo humano, $\sim 400 - 720$ nm), y el ultravioleta (UV).

La radiación ultravioleta es aquella radiación electromagnética con una longitud de onda del orden de entre 100 y 400nm, denominada así por tener las longitudes de onda más pequeñas que el último color del espectro visible, el violeta. Este tipo de radiación, pese a que solo supone en torno al 5% de la radiación solar terrestre (Diffey, 2002) [8], es la más energética que llega a nuestro planeta, siendo capaz de producir distintos efectos sobre los seres vivos, entre ellos, por supuesto, los seres humanos.

La exposición a la radiación ultravioleta es beneficiosa en pequeñas cantidades con, por ejemplo, un papel fundamental en la producción y síntesis de la vitamina D necesaria para la absorción de calcio y su deposición en los huesos (Reichrath y Reichrath, 2012) [9]. Además de ser de utilidad para tratar diversas enfermedades, como el raquitismo, la psoriasis y el eczema (OMS, 2003) [6].

Sin embargo, los efectos de dicha radiación son acumulativos, por lo que una exposición prolongada puede causar un rápido envejecimiento de la piel, además de distintas enfermedades cutáneas y oculares: desde las conocidas quemaduras solares, llamadas eritemas, hasta los varios tipos de cánceres de piel (Diffey, 1991) [10], pasando por las cataratas o la queratitis actínica (OMS, 2003). Incluso se ha comprobado su relación con una disminución de la eficacia del sistema inmunitario (Krutmann, 1994) [11].

Esta radiación llega a la Tierra como parte de toda la radiación solar que alcanza nuestro planeta, y por tanto son numerosos los factores de los que depende dicha llegada y su potencia, conocida como irradiancia. Esto se debe a que, en su paso por la atmósfera, la radiación solar, y por tanto la UV, sufre una serie de procesos basados básicamente en dos mecanismos: absorción y dispersión o *scattering*.

Algunos de los factores atmosféricos causantes de estos fenómenos son los gases de la atmósfera, las condiciones de nubosidad del cielo o la cantidad de aerosoles suspendidos en el aire. Los primeros interaccionan con la radiación solar mediante *scattering* molecular, conocido también como dispersión Rayleigh (Román, 2014) [5], y mediante absorción selectiva, con especial atención al ozono O_3 y la capa que forma este gas en la estratosfera. En el caso de las nubes y los aerosoles, estos lo hacen mediante lo que se conoce como *scattering* de Mie y una absorción que varía suavemente con la longitud de onda en el rango solar.

Otros factores que modulan los niveles de radiación en la superficie son la posición de ambos Sol y Tierra, la posición del observador respecto al Sol según el ángulo solar cenital (SZA, ver sección 1.1.1), el albedo superficial o la altitud a la que nos hallemos (Mateos, 2012) [3]. Sin embargo, estos quedan fuera del estudio aquí realizado, el cual se centrará en el análisis del efecto de las nubes.

1.1. Definiciones previas

Conviene comenzar definiendo algunos de los conceptos que se manejarán a lo largo de todo este estudio de la **radiación UV**, siendo esta la energía radiativa que se transporta por el espacio en forma de ondas electromagnéticas, de longitudes de onda comprendidas en el ultravioleta (100 - 400 nm) propagándose a la velocidad de la luz (Tipler y Mosca, 1976) [12]. Este término se refiere de manera general al fenómeno físico que acontece.

La **irradiancia** es la medida de la potencia incidente por unidad de superficie de un tipo cualquiera de radiación electromagnética, en este caso ultravioleta, en unidades de W/m^2 . Como se puede observar en la Figura 1.1, esta depende de la longitud de onda λ , presentando la irradiancia solar sus valores máximos en la franja del visible.

Por su parte, la **irradiación** es la medida de la energía de esa radiación por unidad de superficie, resultante de integrar en el tiempo la irradiancia, y se mide en el SI en J/m^2 . También se puede expresar en unidades de potencia por tiempo, como Ws/mm^2 o Wh/m^2 .

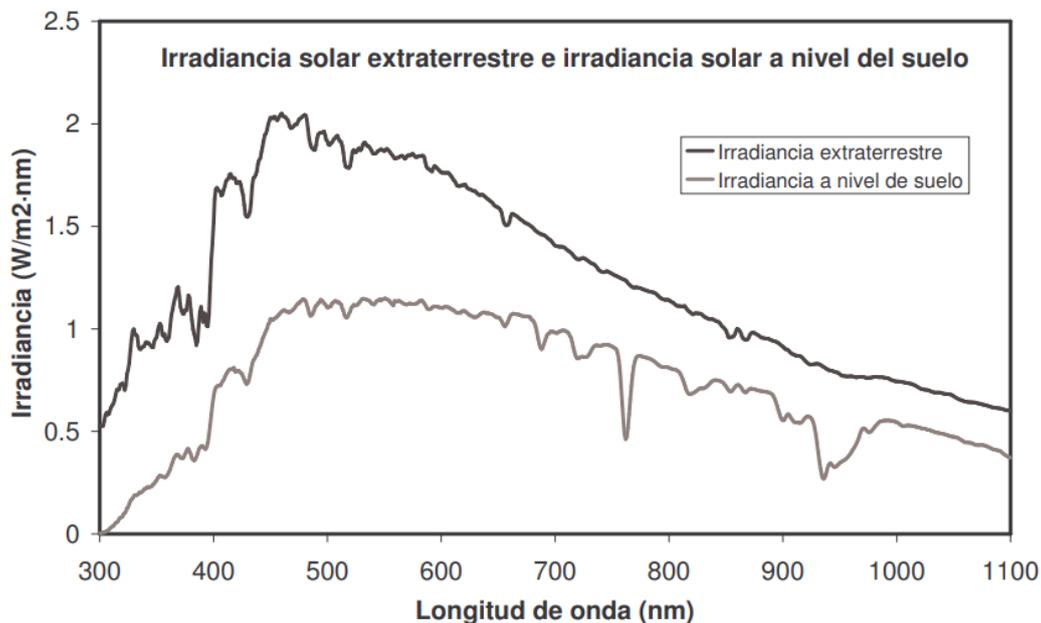


Figura 1.1: Irradiancia solar extraterrestre (negro) y a nivel del suelo (gris). Espectro a nivel de suelo tomado con una elevación solar de 44° sobre el horizonte. Correspondiente a Toledano (2005) [1]

integral a todos los ángulos (esto es, la sección eficaz total, la cual tiene unidades de superficie) y depende inversamente de la cuarta potencia de la longitud de onda de la radiación, de manera que se puede concluir la relación:

$$I_r \propto \sigma_{ri} \propto \lambda^{-4} \quad (1)$$

Sin embargo, la teoría de Rayleigh solo es válida mientras la longitud de onda de la luz sea mucho más grande que un tamaño característico de las partículas dispersoras, como el diámetro. Según Kerker [16], para la validez de la teoría, esta relación debe ser $d/(2\lambda) < 0,05$. Es por esto que el scattering de Rayleigh para la luz solar en la atmósfera se produce al incidir sobre los gases atmosféricos, por lo que a veces es también conocido como scattering molecular.

Por otro lado, el scattering causado por partículas mayores que las dispersoras Rayleigh, es decir de diámetros mayores a una décima parte de la longitud de onda de la radiación incidente, recibe el nombre de scattering, o **dispersión de Mie** (McCartney, 1976) [17]. Este scattering no tiene limitaciones de tamaño y se puede aplicar a la dispersión causada por aerosoles y partículas de nubes (Mateos, 2012) [3]. En la Figura 1.3 se pueden observar las diferencias entre los modos de scattering de Rayleigh y Mie.

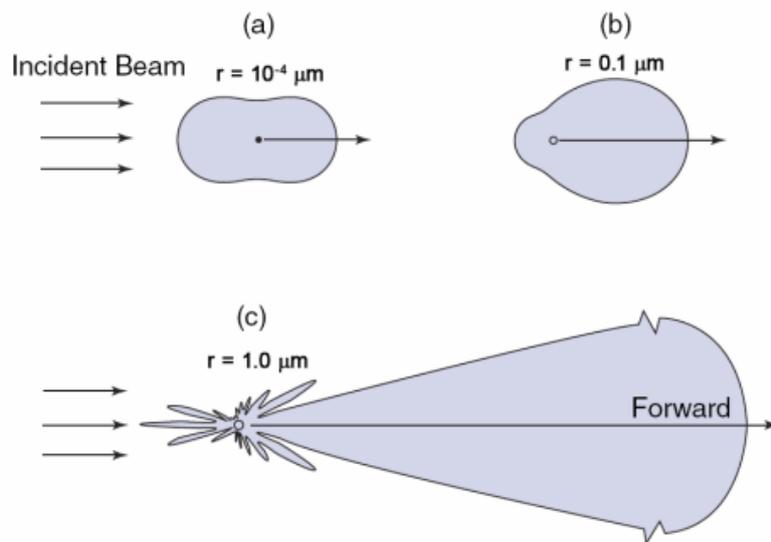


Figura 1.3: (a): *Scattering Rayleigh*, (b): *Scattering Mie* y (c): *Mie para partículas grandes*. Correspondiente a Mateos (2012) [3]

1.1.2. La radiación UV. Componentes y tipos

Por todo ello, la radiación que llega la superficie (*radiación global*) se puede decir que es la suma de dos componentes: la *radiación directa*, "beam", que es aquella que nos alcanza con la dirección del SZA y el acimut solar (esto es, el ángulo que indica la dirección del Sol según los puntos cardinales, obsérvese la Figura 1.2); y la *radiación difusa*, que representa la que ha sido dispersada por la atmósfera y llega a la superficie con una dirección diferente cualquiera.

Estas distinciones se pueden apreciar con claridad en la Figura 1.4.

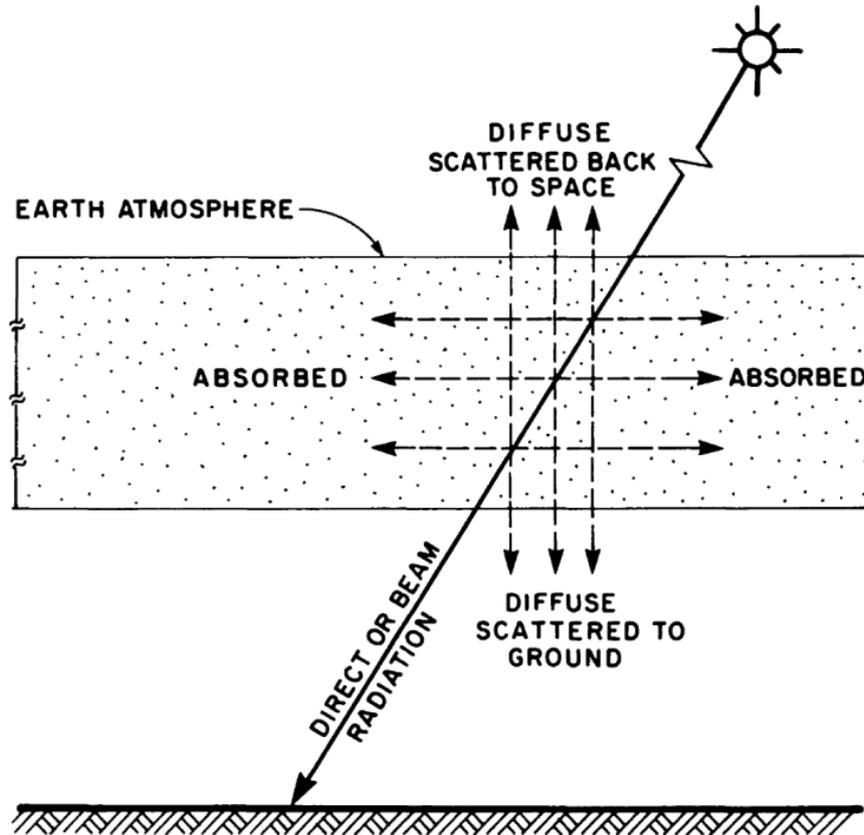


Figura 1.4: Distribución de radiación solar directa, difusa y absorbida. Correspondiente a Iqbal (1983) [4]

Además, dentro de la radiación UV se definen tres bandas según la Organización Mundial de la Salud, en función la longitud de onda de la misma (OMS, 2003) [6]:

- 100-280 nm \Rightarrow La radiación UV-C: la más energética, y por tanto nociva, aunque no supone realmente un peligro ya que es absorbida en su totalidad por los gases atmosféricos, en particular el ozono de la baja estratosfera, localizada a entre 12 y 35 km de altitud, y no llega a la superficie terrestre. Incluso si este ozono se redujera enormemente, toda la UV-C se seguiría absorbiendo por completo (Calbò et. al, 2005) [18].
- 280-315 nm \Rightarrow La radiación UV-B: menos energética que la anterior, es absorbida y dispersada solo parcialmente por la atmósfera, de manera que se trata de la radiación UV de mayor frecuencia, y por tanto energía, que alcanza la superficie.
- 315-400 nm \Rightarrow La radiación UV-A: que atraviesa la capa de ozono sin dificultad, y al alcanzarnos es de utilidad en la síntesis de la vitamina D por el cuerpo, aunque, a pesar de ser la menos energética, con efectos del orden de mil veces menor que los de la UV-B, una exposición prolongada puede también producir efectos perjudiciales sobre los organismos vivos.

Los fenómenos de absorción y dispersión mencionados provocan que la radiación UV en la superficie terrestre, formada por UV-A y UV-B, se corresponda con solamente un 7'45 % de la radiación solar incidente en la capa más externa de la atmósfera. (Fröhlich y London, 1986) [19]

Por otro lado, se habla de **radiación UV eritemática (UVER)** como medida de la efectividad de la radiación para causar los mencionados eritemas en la piel humana. La respuesta eritemal de la piel humana a la radiación UV varía con la longitud de onda, representándose esta respuesta mediante el espectro de acción eritemático $\varepsilon(\lambda)$, definido por *McKinlay y Diffey* (1987) [20], que tiene en cuenta el mayor peligro de las longitudes del UV-B con respecto a las del UV-A como se puede observar en la Figura 1.5. La irradiancia UVER espectral (Línea negra en la Figura 1.5) se puede obtener pesando la irradiancia solar UV espectral que alcanza la superficie (línea gris) con el espectro de acción eritemático (línea punteada) (Román, 2012) [5]

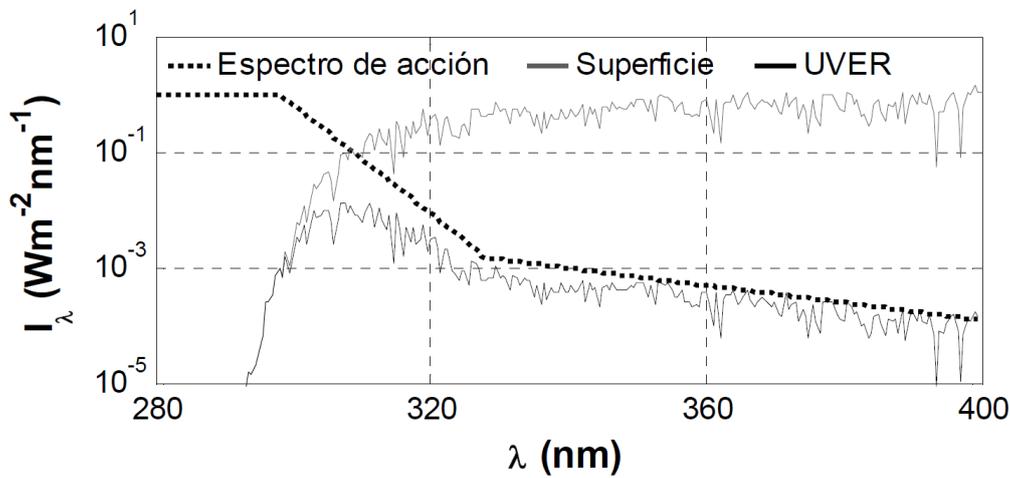


Figura 1.5: Espectro de acción eritemático normalizado, irradiancia espectral en la superficie (gris, Figura 1.1) e irradiancia UVER espectral (negro). Escala logarítmica en el eje de coordenadas. Correspondiente a Román (2014) [5]

A partir de ambos se puede obtener la irradiancia solar UVER integrada entre 280 y 400 nm según la siguiente ecuación:

$$UVER = \int_{280}^{400} I(\lambda) \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

siendo $UVER$ la irradiancia homónima, I la irradiancia solar espectral en la superficie y $\varepsilon(\lambda)$ el espectro de acción eritemático.

De cara a la información al público, se suele utilizar el **índice UV**, o **UVI**, que señala la capacidad de la radiación UV solar de producir lesiones en la piel en cada franja horaria de un día concreto (OMS, 2003) [6]. Representa lo mismo que la irradiancia UVER, pero reescalada para valores enteros en una escala entre 0 y 11 (aunque excepcionalmente puede tomar valores mayores) siguiendo la relación $UVI = 40 \text{ m}^2\text{W}^{-1} \cdot UVER$ (en Wm^{-2}).

Esta escala es más manejable por la población para conocer el cuidado que deberían tener ese día a la hora de proteger su piel de posibles quemaduras solares. Los distintos valores de

este índice se pueden agrupar en tres categorías según la protección solar recomendada, como se puede apreciar en la Figura 1.6:

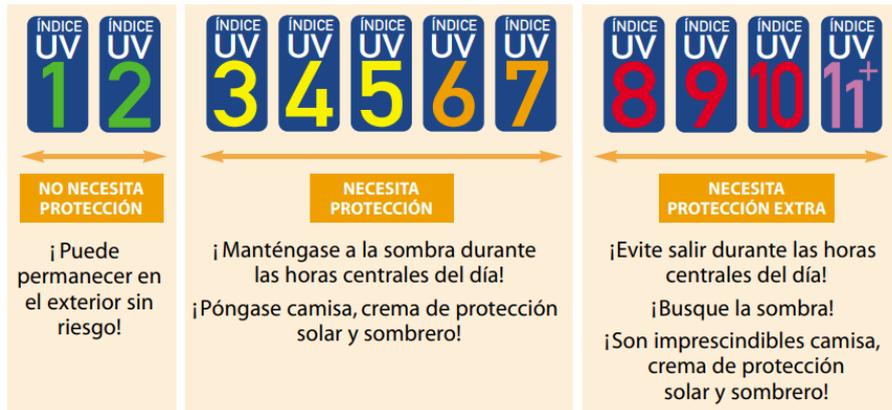


Figura 1.6: Protección solar recomendada en función del índice UV. (OMS, 2003) [6]

1.2. Dependencia con los gases atmosféricos. La columna de ozono

Los gases de la atmósfera, compuesta principalmente por nitrógeno y oxígeno, interactúan mediante dispersión Rayleigh con la radiación solar que la atraviesa, de manera que los fotones radiativos se redirigen hacia otras direcciones.

La probabilidad de que la redirección se haga con un determinado ángulo Θ , que será el formado por la dirección del fotón dispersado con la incidente, está relacionada con la función de fase de los gases, o *función de fase Rayleigh*, p_R , la cual será simétrica, independiente de la longitud de onda y tiene la forma (de la Casinière y Cachorro, 2008) [7]:

$$p_R(\Theta) = \frac{3}{4} [1 + \cos^2(\Theta)] \quad (3)$$

De (3) se puede obtener que las máximas probabilidades de dispersión se dan para ángulos de 0° y 180° , es decir, que el fotón mantenga la dirección con la que incide o se retrodisperse, mientras que el caso menos probable es el de dispersión en ángulo recto ($\pm 90^\circ$). También se observa que la mitad de la luz que sufre el scattering Rayleigh se redirige en sentido contrario al de incidencia ($\Theta > 90^\circ$), concordando con lo representado en la Figura 1.3 (a).

La interacción entre radiación y gases también puede dar lugar al fenómeno de absorción. Esta absorción es selectiva en el caso de los gases, los cuales absorben unas bandas espectrales concretas que variarán con el tipo de gas, siendo algunos de los más importantes involucrados en este proceso el ozono, el vapor de agua y el dióxido de carbono (Román, 2012) [5]. En este estudio nos centraremos en el primero de ellos.

El ozono se produce habitualmente en la estratosfera según una serie de reacciones que componen lo que se conoce el ciclo de Chapman. Este comienza como consecuencia de la disociación del oxígeno molecular O_2 bajo la acción de la radiación UV solar de longitud de onda

inferior a los 242 nm (Velázquez, 2001) [13] El oxígeno atómico resultante se recombina con oxígeno molecular en presencia de otra molécula (normalmente nitrógeno u oxígeno) que disipa la energía liberada en la reacción.

Al mismo tiempo, el ozono también se está destruyendo, tanto reaccionando con el oxígeno atómico para retornar a la forma molecular (más estable) como, sobre todo, fotodisociándose por la radiación UV entre 200 y 340 nm. Todos estos procesos se representan más visualmente en la Figura 1.7.

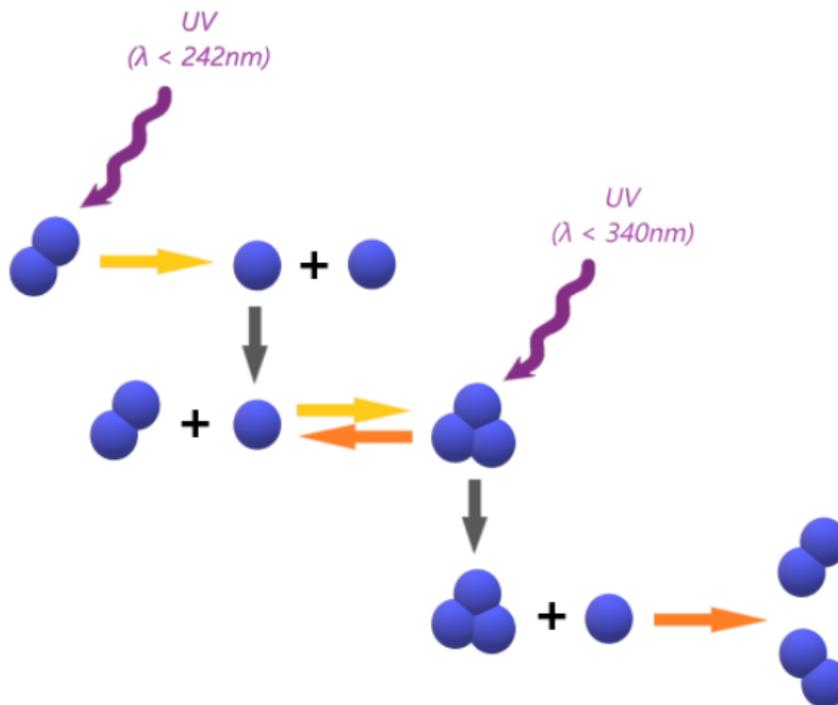


Figura 1.7: *Ciclo de Chapman*

Como la radiación UV está tan involucrada en las reacciones de creación (en la Figura 1.7, flechas amarillas) y destrucción (flechas naranjas) de ozono, la concentración de este gas junto con su distribución vertical tienen un papel muy relevante en el control de la cantidad de UV que alcanza la tierra, especialmente la de UV-C y UV-B, más energéticas y, por tanto, potencialmente dañinas como se mencionó en la sección 1.1.2.

Para medir el ozono presente en la atmósfera, el parámetro más utilizado es la columna total de ozono (TOC), que equivale al grosor de la columna vertical de ozono sobre un área unidad llevado a 1 atm y 0°C , las condiciones estándar de presión y temperatura. Se mide en atm-cm, aunque se suele expresar en unidades Dobson (DU), siguiendo la relación $1\text{ atm-cm} = 1000\text{ DU}$. 1 DU de ozono equivale a $2.69 \cdot 10^{20}$ moléculas por metro cuadrado en una columna de ozono (Mateos, 2012) [3]. Por otro lado, se puede apreciar el efecto protector del ozono, ya que hace reducir la irradiancia UVER en torno a un 0.31 % por cada DU (Román et al., 2012) [21].

1.3. Dependencia con la cantidad de aerosoles

Los aerosoles se pueden definir como una suspensión de partículas sólidas o líquidas en un medio gaseoso (Toledano, 2005) [1], y su tamaño en nuestra atmósfera varía entre milésimas de micra hasta 100 μm (Román, 2012) [5]

Pueden producirse mediante reacciones o procesos físico-químicos de la propia atmósfera o ser eyectados a la misma por la actividad humana o de forma natural (como por ejemplo: la calima, que es polvo del desierto en suspensión; el humo de incendios o cenizas volcánicas) y serán capaces de dispersar (mediante dispersión de Mie, ver sección 1.1.1) y absorber (aunque de manera no tan selectiva como los gases) parte de la radiación solar en la atmósfera. Si al incidir un fotón sobre una partícula del aerosol se absorbe o redirige por dispersión, se habla de un fenómeno de *extinción*.

Para el tratamiento del efecto de los aerosoles, se suele recurrir al espesor óptico de aerosoles por extinción, AOD. Será suma del espesor óptico de aerosoles por absorción (AAOD) y el espesor óptico de aerosoles por dispersión (SAOD), relacionados respectivamente con la probabilidad de que un fotón incidente perpendicularmente a la superficie terrestre sufra absorción, o un fenómeno de *scattering*, por la cantidad de aerosol presente en la misma.

De esta manera, el AOD, también escrito indistintamente como τ , está a su vez relacionado con la posibilidad de que dicho fotón sufra extinción, la cual vendrá representada por la ley de Beer-Bouguer-Lambert:

$$\frac{I_0(\lambda)}{I_{dir}(\lambda)} = e^{-m\tau} \quad (4)$$

donde I_{dir} es la irradiancia directa medida a nivel del suelo, I_0 es la irradiancia extraterrestre, corregida de la distancia Tierra-Sol; y m es la masa óptica relativa, la cual se define como la proporción entre la masa de aire que atraviesa la radiación en la dirección incidente y la que atravesaría si la incidencia fuese vertical respecto del suelo.

El AOD en el rango solar varía empíricamente con la longitud de onda de la radiación, siguiendo la fórmula de Ångström (Ångström, 1963) [22]:

$$\tau_\lambda = \frac{\beta}{\lambda^\alpha} \quad (5)$$

donde el exponente de Ångström, α , está relacionado con la distribución de tamaños del aerosol, tomando valores mayores cuanto más pequeñas sean las partículas, siempre en el rango 0 - 4; y el coeficiente de turbiedad, β , corresponde al valor del AOD para una longitud de onda de 1 μm . Ambos son adimensionales mientras que λ se toma en μm .

En la Figura 1.8 se contempla la dependencia del AOD espectral para diferentes valores de los coeficientes α y β en el rango del UV que alcanza la superficie.

Numerosos autores han dado cuenta de los efectos de los aerosoles sobre los niveles radiativos de la superficie. Entre ellos, *Román et. al* (2012) encontraron que para una longitud de onda de 440nm, los niveles de UVER decrecen en promedio un 28.4% por unidad de AOD [21]. *Marín et al.* (2007) observaron que para $\lambda = 550$ nm, el paso de un espesor óptico de aerosoles de 0.1 a 0.3, hacía caer la UVER entre un 14% y un 20%, así como entre un 13% y un 19% cuando aumenta de 0.3 a 0.5, correspondiendo la mayor disminución al invierno y la menor al verano [23].

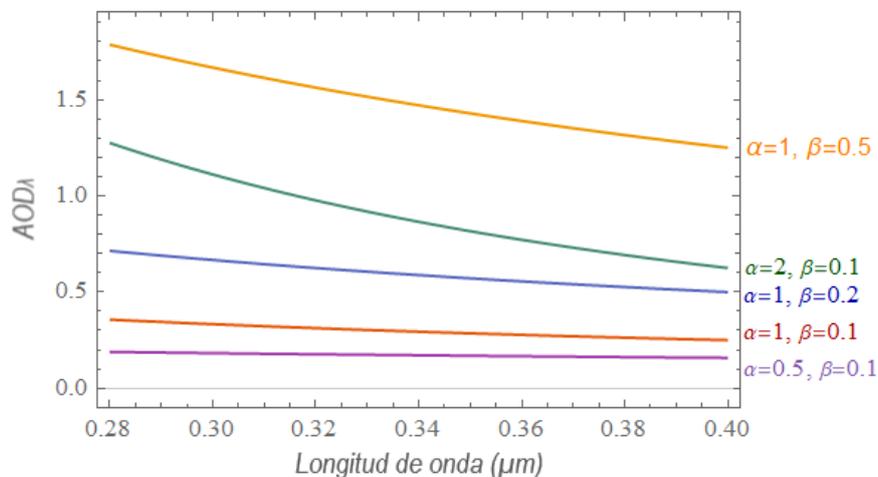


Figura 1.8: Variación del AOD con λ en función de los parámetros α y β

1.4. Dependencia con la nubosidad

Uno de los principales factores que controlan los niveles de radiación UV, y objeto de este estudio, es la nubosidad del cielo. Las nubes son masas compuestas de cristales de hielo o gotas de agua microscópicas suspendidas en la atmósfera. Se forman normalmente por condensación de humedad en partículas y pueden por ello presentar una distribución en el cielo no necesariamente homogénea. Además, su presencia es fuertemente variable tanto en el tiempo como en el espacio.

Las nubes dispersan la radiación que llega mediante dispersión de Mie, la cual se produce cuando la luz choca contra grandes partículas o moléculas (de un tamaño mayor a la longitud de onda incidente sobre ellos), absorbiendo una parte de la luz y reflejando el resto, dando a las nubes un color claro cuando son ligeras y oscuro cuando son espesas o la atmósfera está muy cargada, acentuándose el efecto Mie.

Es por esto que se puede, correctamente, pensar que la presencia de las nubes atenúa la radiación UV superficial, siendo así en la mayoría de casos. Sin embargo, la influencia de las nubes puede ser en ocasiones de tal manera que la radiación en la superficie sea mayor

que la que llegaría en condiciones de cielo despejado según estudios como Estupiñán et al. (1996) [24] o Schafer et al. (1996) [25], que llegó a medir algunos incrementos de hasta el 11 % de transmisión de la UV-B, lo que se conoce como “efecto realce”, o en inglés *enhancement effect*.

Ante la usual heterogeneidad de la distribución de las nubes por el cielo, los *octas*, que miden la cubierta de nubes en octavos de cielo cubierto, son la principal unidad en la que se toman las medidas de nubosidad. De esta manera se representa con un número entero las partes del cielo cubiertas por nubes si dividiésemos este en 8 partes, lo que hace equivaler un cielo completamente nublado a un valor de 8 octas y uno totalmente despejado a 0 octas.

El parámetro que se utilizará para describir los efectos de las nubes sobre la radiación se conoce como factor de modificación por nubes, o CMF por sus siglas en inglés (*Cloud Modification Factor*), el cual se define de la siguiente manera:

$$CMF = \frac{UV_{med}}{UV_{desp}} \quad (6)$$

donde UV_{med} es la radiación medida bajo cualquier condición de nubosidad y UV_{desp} esa misma radiación medida bajo las mismas condiciones atmosféricas pero con cielo despejado, eliminando el efecto de las nubes. Dichas cantidades UV suelen ser irradiancias eritemales ponderadas, aunque pueden ser otros valores UV sin ponderar. Este cociente tiene el significado físico de transmitancia de las nubes en un intervalo espectral dado.

De esta manera seremos capaces de comparar y estimar, haciendo uso de simulaciones de cielo despejado, el efecto atenuador o acentuador de las nubes sobre la radiación incidente.

1.5. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es observar cualitativamente y cuantificar el efecto de las nubes sobre la radiación solar ultravioleta espectral incidente sobre nuestro planeta. Es decir, cómo su acción influye en la cantidad y la manera en que dicha radiación alcanza la superficie terrestre y, por ello, a los seres vivos habitantes en ella, en comparación con el caso de cielos despejados de nubes.

Se busca realizar una serie de comprobaciones estadísticas con los datos experimentales para validar el modelo de cielo despejado de los que se dispone, y una vez certificada su utilidad, se hará uso de ellos para comparar dichas simulaciones con las medidas de llegada de radiación bajo distintos cielos nublados tomadas en la ciudad de Granada entre los años 2008 y 2012.

Una vez logrado esto, su impacto se analizará mediante el CMF (*Cloud Modification Factor*), un parámetro característico de las nubes, con el objetivo de además observar el efecto que se produce tanto sobre la radiación global como sobre su componente directa, en cielos con diferentes niveles de nubosidad.

2. Metodología: Instrumentación, medidas y modelo

En esta sección se describirá la estación en la que se tomaron las medidas analizadas en este trabajo, así como la manera en la que se obtuvieron y los instrumentos utilizados para ello. Se mencionará también la disponibilidad de un modelo de cielo despejado como ayuda a la hora de estudiar los efectos de las nubes.

Además, se resumirá el modo en el que se operó para verificar el modelo del que se disponía, se calcularon los parámetros correspondientes y se analizó la dependencia de la llegada de radiación UV con los distintos niveles de nubosidad.

2.1. Estación de medida e instrumentación

En la azotea del Centro Andaluz del Medio Ambiente (CEAMA, localizado en Granada, España, a latitud 37.16°N y longitud 3.6°O , a 680 m sobre el nivel del mar), se encuentra la estación del Grupo de Física Atmosférica (GFAT), la cual recolecta información meteorológica y radiométrica mediante radiómetros de banda ancha en todas las regiones del espectro: UV, visible e IR; un fotómetro (CIMEL CE318) y un espectrorradiómetro Bentham DMc-150 como el de la Figura 2.1.



Figura 2.1: *Espectrorradiómetro Bentham DMc-150*

Este espectrorradiómetro consiste en un doble monocromador con un espejo robótico para poder recibir entradas de dos fuentes de luz diferentes. A su salida hay instalado un tubo fotomultiplicador (R1527 Hamamatsu) que registra la luz UV dispersada, con un filtro azul en el detector para evitar que lleguen longitudes de onda del visible. El monocromador junto con el detector se encuentran en un contenedor a 25°C de temperatura, estabilizado por un sistema

refrigerador de celda Peltier aire/aire. La entrada del monocromador está conectada a dos difusores situados en la azotea del CEAMA (Figura 2.2) mediante dos fibras ópticas (LI-J1010), de manera que se pueda tomar medidas de radiación directa en uno de ellos y de global y difusa en el otro. Nos referiremos en este estudio al conjunto de monocromador, detector y difusores (con las fibras ópticas) como *espectrorradiómetro Bentham*.

En la Figura 2.2(a) se ve el difusor encargado de medir la componente directa de la irradiancia mediante un tubo colimador con tres diafragmas ópticos y un campo de visión de 1.2° , colocado en un seguidor solar con precisión en el apuntado mejor a 0.02° gracias a un sensor solar (modelo 2AP de Kipp y Zonen) que garantiza que el tubo esté siempre apuntando al disco solar (Antón et al., 2013) [26]. A su lado, la Figura 2.2(b) muestra el otro difusor, que tomará las medidas de irradiancia global y también las de difusa, ayudado por una banda de sombra giratoria.

El instrumento toma medidas cada 15 minutos de todas ellas en el intervalo entre 280 y 400 nm, con pasos de 0.5 nm. Se tardan aproximadamente 4 minutos (un segundo por cada longitud de onda medida) en tomar un espectro completo de radiación global, tiempo tras el cual se toman espectros de radiación directa y difusa.



(a) Difusor encargado de medidas de radiación directa (tubo gris a la derecha), montado en el seguidor solar. También se muestran los tres diafragmas ópticos. (b) Difusor encargado de medidas de radiación global y difusa. En la parte superior se puede apreciar la banda de sombra.

Figura 2.2: Estación del GFAT en la azotea del CEAMA

Por su parte, el espesor óptico de aerosoles y el exponente de Angström se obtienen a partir de las medidas de irradiancia solar directa que toma un fotómetro solar CIMEL CE-318 (como el de la Figura 2.3), situado junto al espectrorradiómetro Bentham, a 340, 380, 440, 500, 670, 870 y 1020 nm (Román et al., 2013) [27]. Estos datos se obtuvieron directamente de la red AERONET, usándose los datos de la versión 3.

Los datos de octas aquí analizados se tomaron automáticamente mediante la cámara ASI de Granada y fueron revisados manualmente debido a algunos problemas del algoritmo en condiciones de alta calima (polvo sahariano en suspensión), donde en ocasiones el algoritmo original clasificaba el cielo como con una alta cobertura nubosa, debido a su color blanquecino en presencia de polvo, a pesar de estar despejado de nubes (Cazorla, 2008) [28].



Figura 2.3: *Fotómetro CIMEL CE-318*

2.2. Medidas y modelo utilizados

Entre 2008 y 2012 se tomaron datos de radiación UV espectral en la ciudad de Granada con el mencionado espectrorradiómetro Bentham, los cuales serán utilizados para este estudio, junto con unas simulaciones de cielo despejado que servirán para comparar y analizar la dependencia con las nubes que controlan la llegada del UV a la Tierra.

Estos datos contienen para cada medida registrada (una cada 15 minutos) valores de irradiancia global, G , irradiancia directa medida en la dirección normal al Sol, B (*beam*), e irradiancia directa en superficie horizontal, D , obtenida según $D = B \cos(SZA)$. Para cada uno de estos tipos de medida se obtuvieron valores de la irradiancia en mW/m^2 para cada longitud de onda entre 280 y 400 nm, con saltos de 0.5 nm.

Estos vendrán en cada caso complementados con datos del SZA, de la cubierta de nubes en octas (proporcionados por la cámara de cielo ASI); la columna de ozono diario en DU medida por satélite (gracias al instrumento de monitoreo de ozono, OMI, a bordo de la nave Aura), el AOD a 340, 380 y 440 nm para cada medida, así como su promedio diario; y el

exponente de Ångström, α , calculado con el AOD a 440 y 870 nm, (estos dos últimos obtenidos de la red AERONET [29]) así como el promedio diario de los valores medidos durante el día.

Además, se dispone de un modelo con valores simulados bajo cielos sin nubes para la radiación global, directa y difusa. Estas simulaciones se realizaron con el modelo de transferencia radiativa *LibRadtran* [30], utilizando como parámetros de entrada el ozono, los aerosoles (AOD y exponente de Ångström) y los parámetros geo-temporales: el SZA y la distancia Tierra-Sol.

Este trabajo se centrará en el análisis de la radiación global y en la componente directa de la misma (beam), dejando a un lado la radiación difusa.

2.3. Procedimiento y metodología

Para analizar esta dependencia con las nubes, debemos asegurarnos, en primer lugar, de que el modelo de cielo despejado es una buena aproximación a los datos reales medidos, y por tanto válidos como simulación de datos en esas condiciones sin nubes.

Para ello, se seleccionaron los espectros medidos en condiciones de nubosidad muy baja o nula, correspondientes al rango de 0 - 1 octas. Una vez cribados, se busca la comparación con los espectros simulados sin nubes pero con aerosol, de manera que se pueda cuantificar la precisión del modelo que se usa para cada una de las componentes directa y difusa (esta última fuera del estudio), así como para la radiación global.

Los parámetros calculados en esta comparación y la manera en la que se obtuvieron se pueden ver con detalle en los anexos de Parámetros estadísticos (A) y de Código (B), que detalla las líneas de código utilizadas para esta criba. Para cada componente de la radiación (global y directa) se representaron gráficamente los datos medidos y modelados para cada longitud de onda del espectro UV (280-400 nm) de manera que se pudiera tener un primer vistazo de la similitud ‘a ojo’ de los valores.

Se calcularon y representaron los parámetros del error medio, o MBE; el error cuadrático medio, o RMSE; y la desviación estándar (STD) para cada longitud de onda, tanto en porcentaje como su valor absoluto (refiriéndose absoluto a que se trata de un valor con unidades físicas en lugar relativas, no a que el valor sea positivo).

Por último, se calculó el coeficiente de determinación (r^2) también de manera espectral para cada longitud de onda, así como su valor ‘global’ tomando todos los datos de los que se dispone. Para certificar que los datos son de valores similares, además de tener una alta correlación, se calculó la pendiente y la ordenada del ajuste de mínimos cuadrados realizado, siendo más fiable el modelo cuanto más se aproximen estos valores a 1 y 0, respectivamente (caso en el que los valores serían exactamente los mismos).

Una vez comprobadas la validez y buena aproximación del modelo a la situación real, se calculó el CMF espectral en el intervalo de estudio, de acuerdo a la relación (6), el cual se representará en función del número de octas que hubiera en el momento de la medida.

NOTA: Para la obtención de los parámetros estadísticos en porcentaje se utilizaron dos métodos, dando uno de ellos lugar a complicaciones a la hora de representar gráficamente la desviación estándar, sacando por pantalla picos con valores altísimos en comparación con el resto (Fig. C.1, C.3). Esto se debe a la manera en la que se calcula, cogiendo las diferencias en porcentaje de cada par de datos (i.e. $100 \frac{UV_{mod} - UV_{med}}{UV_{med}}$, con UV_{med} la radiación medida bajo cielos despejados y UV_{mod} el valor simulado del modelo de cielo despejado) y a partir de ahí calculando el parámetro correspondiente en cada caso. Lo que provoca es que cuando se tienen valores muy próximos a 0, la diferencia en porcentaje pueda ser muy elevada entre dos valores (sobre todo cuanto más se aproximen a un 0/0, indeterminación que puede tener como límite cualquier valor) y eso hace que la media, sensible a valores extremos, tenga un valor muy elevado y se vean esos picos en la gráfica. Los picos de valores tan enormes (alcanzan órdenes de 10^8 %) hacen que la gráfica aporte poca información y el método sea, por tanto, poco útil.

Es por esto que el espectro con los valores de los parámetros estadísticos obtenidos de esta forma no se muestra en los resultados del informe, pero se puede consultar en el anexo C junto con el resto de resultados intermedios del estudio. En su lugar, se exponen los resultados obtenidos calculando estos parámetros como los valores absolutos en tanto por ciento, método que nos aporta unas gráficas mucho más claras.

3. Resultados

A continuación, se expondrán los principales resultados obtenidos, tanto a la hora de validar el modelo que tenemos como al calcular los parámetros característicos de cada factor atmosférico estudiado, para los dos tipos de radiación que se analizaron: radiación global y radiación directa.

Estos resultados vendrán expuestos en forma de datos y gráficas, y se analizarán y discutirán en el apartado 4. Discusión y Conclusiones.

3.1. Validación del modelo

En este primer apartado, se buscará certificar la buena aproximación de nuestro modelo de cielo despejado a los datos experimentales.

3.1.1. Radiación global

A partir de los datos que se poseen de radiación UV global medida y sus correspondientes simulaciones de cielo claro, se pueden obtener espectros como el que se muestra de ejemplo en la Figura 3.1. Para el análisis estadístico se calcularon los parámetros del error medio (MBE), error cuadrático medio (RMSE) y desviación estándar (STD) ‘absolutos’ (con unidades de irradiancia mW/m^2 , no se debe confundir con el MABE que sí trata con valores estrictamente positivos) obtenidos para las distintas longitudes de onda se muestran en la Figura 3.2(a).

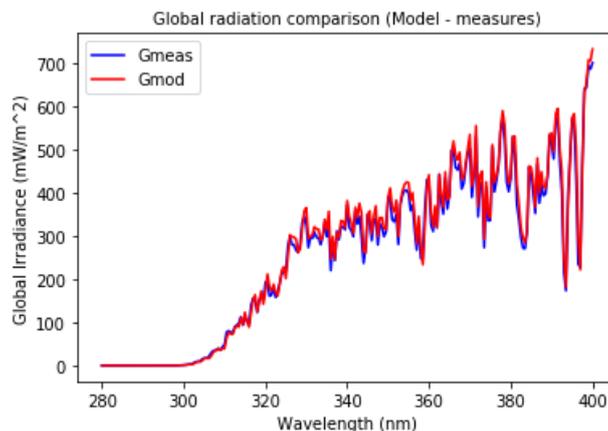
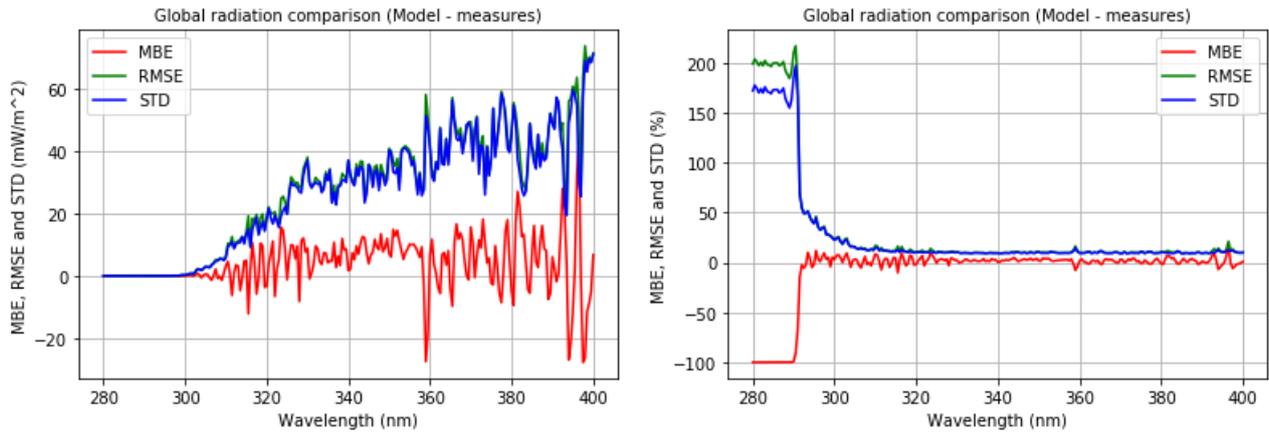


Figura 3.1: Datos de irradiancia medidos (azul) y modelados (rojo) para la radiación global el día 30 de octubre de 2008, a las 9:00 horas, con medida de 0 octas y un SZA de 66.021°

Estos mismos parámetros se obtuvieron también en su versión relativa (en tanto por ciento), con los dos métodos expuestos en el apartado anterior, donde la representación espectral resultante es más acertada en el primero de ellos, con los resultados que se muestran en la Figura 3.2(b). La otra representación se puede encontrar en la Figura C.1 del Anexo C, donde se aprecian los picos que aparecen en regiones donde el cálculo se aproxima al límite 0/0.



(a) Parámetros estadísticos en unidades de mW/m². (b) Parámetros estadísticos relativos (en %).

Figura 3.2: Representación espectral de los parámetros estadísticos absolutos y relativos de la comparativa modelo-medidas para la radiación global

Finalmente, se obtiene el coeficiente de determinación r^2 a lo largo de las longitudes de onda en las que estamos tratando (Figura C.2) y, para complementar esta representación, se calculan la pendiente y ordenada en el origen del ajuste lineal por mínimos cuadrados de la totalidad de los datos (valores medidos frente a valores modelados), independientemente de la longitud de onda en que fueran tomadas cada pareja.

Se obtiene un valor para la pendiente de la recta de 0'9766 y para la ordenada de 9'979. El coeficiente de determinación de todos estos datos juntos es de 0'9822.

3.3.2. Radiación directa (Beam)

A continuación, se realizará el mismo estudio para la componente directa de la radiación UV. Se presenta un ejemplo de espectros de medidas y simulaciones en la Figura (3.3):

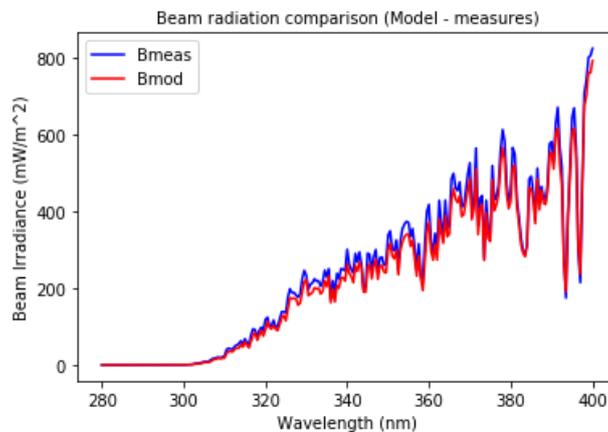
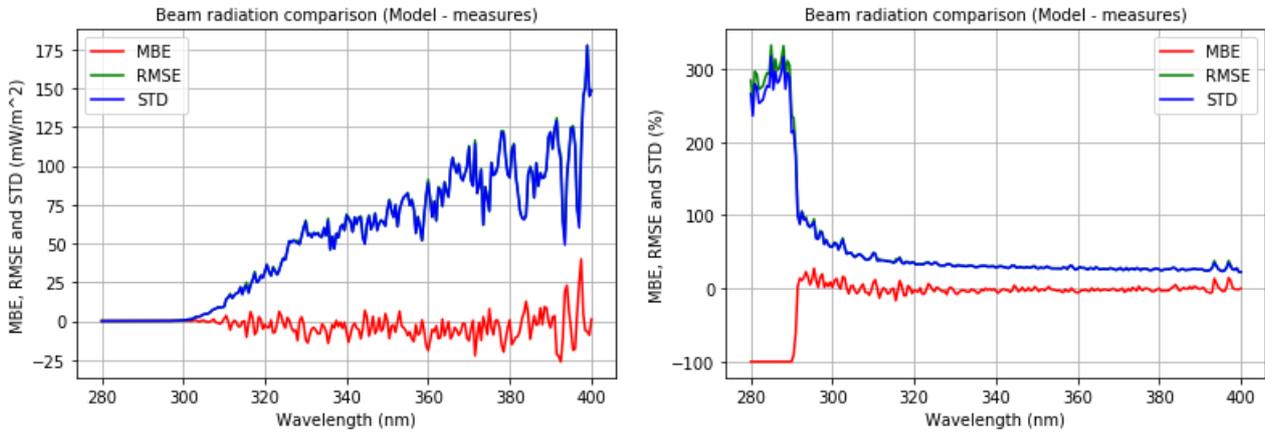


Figura 3.3: Datos de irradiancia medidos (azul) y modelados (rojo) para la radiación global el día 30 de octubre de 2008, a las 9:05 horas, con medida de 0 octas y un SZA de 65.288°

Utilizando los mismos cálculos que para el caso de la radiación global, se obtienen los siguientes resultados para los parámetros estadísticos absolutos (Figura 3.4(a)). Con los dos métodos del apartado anterior se obtiene su versión relativa en tanto por ciento (la representación espectral seguirá siendo más acertada en el primer caso, mostrada en la Figura 3.4(b)):



(a) Parámetros estadísticos en unidades de mW/m^2 .

(b) Parámetros estadísticos relativos (en %).

Figura 3.4: Representación espectral de los parámetros estadísticos absolutos y relativos de la comparativa modelo-medidas para la radiación directa

En la gráfica C.3 del anexo se pueden apreciar los picos que nos hacen despreciar el otro método de cálculo.

Finalmente, se obtiene el coeficiente de determinación r^2 a lo largo de las longitudes de onda tratadas (Anexo: Figura C.4) y, de nuevo, del ajuste de mínimos cuadrados del conjunto de valores de todas las longitudes de onda se obtienen un valor para la pendiente de la recta, en este caso de 0'8861; y para la ordenada, de 19'2180. El coeficiente de determinación de todos estos datos juntos es de 0'8923.

3.2. Dependencia con las nubes. CMF

En este apartado, se obtendrán distintos valores del CMF, relación (según (6)) entre la radiación medida bajo cielo de cualquier nubosidad frente a la que llegaría en condiciones de cielo despejado, valores que vendrán dados por nuestro modelo recientemente validados.

Al tratar con un cociente de irradiancias, se debe prestar especial cautela a las longitudes de onda más cortas, donde la irradiancia medida es muy pequeña y se pueden dar casos de valores muy dispares y elevados del CMF, cuando en realidad (como se explicó en la sección 1.4) este valor se espera que sea entre 0 y 1, o excepcionalmente, con valores ligeramente por encima de 1 debido al 'efecto realce'.

Los valores obtenidos se representarán espectralmente en función de la longitud de onda de la radiación y, adicionalmente, se verán clasificados según la nubosidad (en octas) presente en el momento de la medida.

3.2.1. Radiación global

La irradiancia medida empieza a tener valores no despreciables a partir de los 300-310 nm, en el caso de la radiación global, como se observa en la Figura 3.1. Tras representar el CMF en el rango de estudio (280-400 nm, Figura C.5), se despreciarán los datos de las longitudes más cortas (Figura C.6), de las cuales apenas llega irradiancia y en las que el cálculo del CMF no aporta resultados consistentes.

El CMF para las longitudes de onda restantes (300-400nm) se ve representado en la Figura 3.5, donde se han clasificado los diferentes niveles de octas posibles en cuatro descripciones de la nubosidad del cielo:

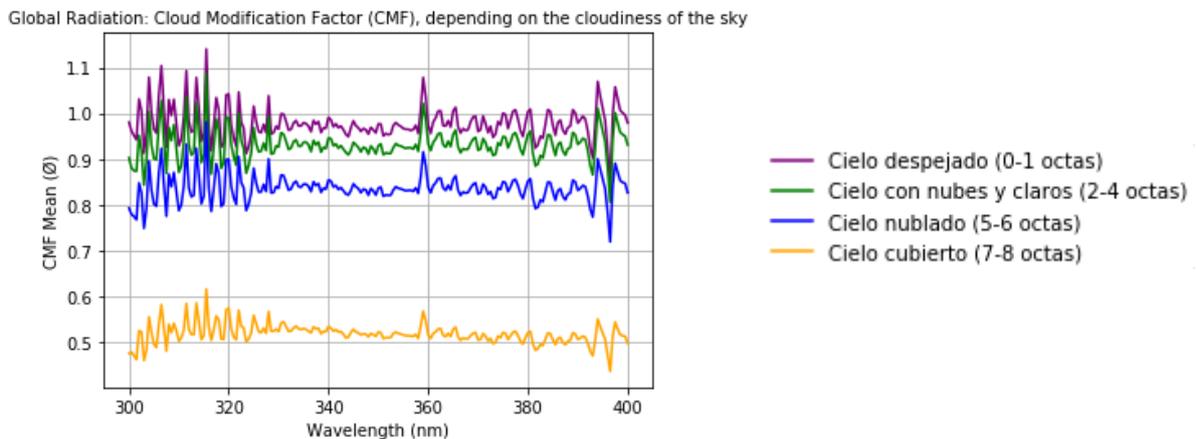


Figura 3.5: *CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación global*

A continuación, se muestra el valor medio del CMF en este intervalo, obtenido bajo las distintas cubiertas de cielo tomadas para la radiación global:

- Para cielos despejados (0-1 octas): 0.9756 (espectro morado)
- Para cielos con nubes y claros (2-4 octas): 0.9310 (espectro verde)
- Para cielos nublados (5-6 octas): 0.8361 (espectro azul)
- Para cielos cubiertos (7-8 octas): 0.5168 (espectro amarillo)

3.2.2. Radiación directa

En el caso de la componente directa, la irradiancia medida empieza a tener valores no despreciables a partir de los 310-320 nm, como se puede observar en la Figura 3.3. De nuevo, se representa el CMF en el rango de estudio (280-400 nm, Figura C.7) y se desprecian los datos de las longitudes más cortas (Figura C.8), de las cuales apenas llega irradiancia.

El CMF para las longitudes de onda restantes (310-400nm) se ve representado en la Figura 3.6, donde se han clasificado los diferentes niveles de octas posibles en cuatro descripciones de la nubosidad del cielo:

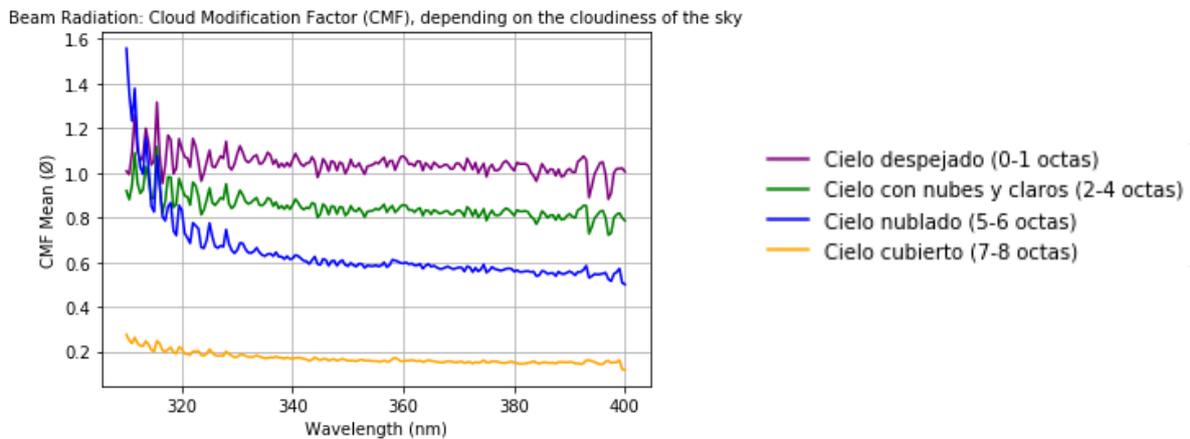


Figura 3.6: *CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación directa*

Por último, se calcula el valor medio del CMF en el intervalo 320-400nm (para evitar de esa manera el decrecimiento del CMF con la longitud de onda que observado hasta 320nm para cielos nublados), obtenido bajo distintas cubiertas de cielo para la radiación directa:

- Para cielos despejados (0-1 octas): 1.0345 (espectro morado)
- Para cielos con nubes y claros (2-4 octas): 0.8365 (espectro verde)
- Para cielos nublados (5-6 octas): 0.5992 (espectro azul)
- Para cielos cubiertos (7-8 octas): 0.1623 (espectro amarillo)

4. Discusión y conclusiones

En el siguiente sección, se analizarán y discutirán los principales resultados y se expondrán las conclusiones alcanzadas tras la realización del estudio:

Discusión de resultados

Una vez obtenidos los resultados expuestos en la sección anterior:

- Se observa gráficamente en los casos particulares de las Figuras 3.1 y 3.3 la aparentemente buena correlación entre los datos medidos y modelados en las distintas componentes de la radiación UV, en esta situación de cielos despejados o muy poco nublados. Dicha correlación se cuantifica al ajustar por mínimos cuadrados las medidas frente a los valores simulados, siendo mejor cuanto más se aproxime la pendiente del ajuste a 1 y la ordenada en el origen a 0.
 - En los dos casos estudiados, se observan valores de las pendientes próximos a 1, siendo más cercano el valor obtenido con los datos de radiación global (0'9766) que los de directa (0'8861). También para la radiación global se da el valor de la ordenada más próximo a 0 (9'979 mW/m²), comparado con las de directa (19'2180 mW/m²).
 - Los valores de las ordenadas son quizás un poco distantes del 0, especialmente en el caso de la radiación directa, que tiene una ordenada de unos 19 mW/m², cuando los datos medidos tomaban valores de hasta unos 700-800 mW/m², suponiendo un error del $\approx 2'5\%$. En el caso de la global, la ordenada de algo menos de 10 mW/m² es más despreciable frente a los datos usados, constituyendo un error del $\approx 1'5\%$.
 - Además de eso, el valor del coeficiente de determinación r^2 es cercano a 1 en ambos casos, aunque es, una vez más, mayor en la radiación global (0'9822, implicando muy alta correlación) que en la directa (0'8923, alta correlación).
- Las diferencias entre los valores que marcan una perfecta correlación ($r^2 = 1$) y los obtenidos dan cuenta de la incertidumbre en la simulación de los datos.
- El MBE toma valores absolutos entre -20 y +20 mW/m² en el caso de la radiación global, mientras que para la directa estos valores son aún menores. Como estos valores siempre están en torno a cero, se puede concluir que el modelo no sobreestima (MBE >0) ni infraestima (MBE <0) las medidas, con lo cual presenta una alta exactitud.
- Por su parte, la desviación estándar (STD), que da una idea de la incertidumbre del modelo, toma valores relativos de en torno al 10% para radiación global y de entre el 20 y el 30% para la directa.

- También se observa que los valores relativos del MBE y RSME, así como de la desviación estándar, alcanzan unos máximos muy por encima del resto de valores para longitudes de onda cortas (280-300nm), que se alcanzan cuando los valores absolutos se encuentran cerca del 0, ya que tienen una mayor sensibilidad a los cambios de valores y se puede incurrir en situaciones cercanas a un 0/0 para calcularse.
- Por último, cabe notar que como la irradiancia medida empieza a tener valores no despreciables a partir de los 300-310 nm, en el caso de la radiación global, y de unos 320 nm en el caso de la componente directa. Dicha irradiancia, en el intervalo UV, crece a medida que lo hace la longitud de onda (Figura 1.1), y así lo hacen también los parámetros MBE, RMSE y desviación estándar, además de decrecer ligeramente el coeficiente de correlación, r , debido a los datos cada vez más variantes que se tienen.

Una vez validado el modelo, y centrándonos en los valores de CMF obtenidos, se puede afirmar que:

- Se puede comparar la radiación directa que llega bajo cielos cubiertos (de 7 u 8 octas), que es aproximadamente un 16'23 % de la radiación que llegaría bajo un cielo despejado; con la radiación global en ese mismo caso, que es en torno a la mitad (51'68 %) de la que llegaría si no hubiera nubes. Esto significa que las nubes que cubren por completo el cielo han atenuado, de media, la llegada de radiación directa en un 83'77 %, por solo un 48'32 % de la radiación total.
 - Esto indica que, en presencia de muchas nubes, la radiación directa disminuye, pero la radiación difusa aumenta o al menos no disminuye tanto, lo que hace que la radiación global no disminuya tanto como la directa.
- Para cielos nublados (entre 5 y 6 octas), las nubes tienen un efecto mucho menor que para el caso anterior, reduciendo un 16'39 % la radiación global y un 40'08 % la directa; mientras que para cielos con nubes y claros (entre 2 y 4 octas), las nubes solo atenúan de media un 6'9 % de radiación total, por un 16'35 % de directa.
- Es interesante el caso de cielos despejados, donde el CMF resulta mayor para la componente directa que para la global, incluso tomando un valor medio mayor que 1. Se explica que estos valores no sean exactamente 1 cuando notamos que los datos del modelo utilizado, aunque precisos, no son completamente exactos, además de que en la categoría de *cielos despejados* se incluyen cielos de 0 octas pero también de 1 octa, con presencia de nubes (aunque sean muy pocas).
- Se descarta en el punto anterior que el valor ligeramente mayor que 1 obtenido para el CMF media de la radiación directa pueda ser debido al efecto realce, ya que ese 3'45 % adicional entra dentro de la incertidumbre del modelo utilizado. Además, de darse realmente un efecto realce, se apreciaría mejor en la global que en la radiación directa.

Conclusiones

Finalmente, tras completar el estudio y debatir los resultados del mismo, se alcanzan las siguientes conclusiones:

1. De acuerdo a los parámetros estadísticos obtenidos, las simulaciones son bastante aproximadas a las medidas experimentales, y por tanto válidas como modelo de cielo despejado para nuestros cálculos. En el caso de la radiación global pueden considerarse muy correlacionadas, ya que compensa en cierta manera las desviaciones de sus componentes, al ser su suma; perdiéndose una parte de esa correlación cuando se desdobra en ellas.
2. Se ha encontrado una tendencia decreciente del CMF con la longitud de onda. Esta dependencia es más notable en el caso de la radiación directa y para cielos más cubiertos de nubes que para la radiación global o aquellos cielos con menos nubes. Una posible explicación para esta disminución del CMF en cielos nublados para la radiación global se entendería a partir del scattering Rayleigh, que dispersa mucha más radiación cuando la longitud de onda es menor (ver (1)), redirigiendo a la superficie parte de la radiación dispersada por las nubes.
3. Se ha observado que el CMF claramente disminuye a medida que los cielos están más cubiertos por nubes, tanto para la radiación global como para la directa, dando cuenta de que las nubes tienen un efecto atenuante de la radiación UV.
4. La radiación directa será notablemente más sensible a la presencia de nubes, ya que una mayor cantidad de nubes implica un mayor número de gotas (o cristales de hielo) suspendidas en la atmósfera que pueden absorberla o dispersarla, evitando que la radiación directa alcance el suelo sin interactuar con una de estas gotas de agua (o cristales de hielo).
5. Cuantificando el efecto mitigante del punto anterior, se ha llegado a observar la extinción de cerca de la mitad de la radiación global para cielos cubiertos (de 7 u 8 octas), la mayor parte de la cual era radiación directa, que se redujo hasta en un 84 %.

Anexos

A. Parámetros estadísticos

A partir de N datos medidos x_i y otros N datos modelados y_i , se pueden obtener diversos índices estadísticos que los comparen y calculen la precisión con la que se correlacionan. Definiendo la distribución de las diferencias $\Delta_i = y_i - x_i$ y la media aritmética como

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i$$

se calculan los distintos parámetros.

La desviación estándar σ , o SD, informa sobre la dispersión de los valores en dicha distribución

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - M)^2}$$

representando el valor bajo el cual se hallan el 68 % de los datos (o el 95 % si tratamos con el doble de la SD) en una distribución normal.

El error medio (MBE, por sus siglas en inglés) es la media de la distribución de diferencias anterior, e indica si el modelo infra o sobrestima (según sea negativo o positivo, respectivamente) las medidas. Su versión en valor absoluto (MABE) cuantifica el valor promedio de las diferencias entre los valores medidos y modelados. Estos se calculan, tanto en su versión absoluta (en unidades de los datos que se tengan, aquí no se refiere al MABE) como en la relativa (en %), de la siguiente manera:

$$MBE = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta_i}{N}$$
$$MBE(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta_i}{x_i}$$

Equivalente para el MABE, tratando con sumandos en valor absoluto $|\Delta_i|$ o $|\frac{\Delta_i}{x_i}|$

Por otra parte el error cuadrático medio (RMSE) es comúnmente utilizado ya que es mucho más sensible a diferencias grandes entre modelos y medidas. Se calcula tal que:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\Delta_i^2}{N}}$$
$$RMSE(\%) = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta_i}{x_i}\right)^2}$$

Además, para cuantificar la correlación entre los datos medidos y los modelizados, se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson, r , o su versión cuadrática, el coeficiente de determinación r^2 . Estos toman valores entre -1 y 1 (entre 0 y 1 en el caso de r^2) siendo con $r^2 = 1$ la correlación máxima y nula en el caso que $r = 0$. La correlación entre dos variables no indica necesariamente causalidad ni identidad, puesto que para ello el ajuste lineal debe dar una recta de pendiente la unidad y ordenada en el origen nula. El coeficiente de correlación se calcula de la siguiente manera:

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}}$$

B. Código

Se utilizó el siguiente código en Python 3 para el cálculo de los parámetros estadísticos obtenidos para la validación del modelo:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.metrics import r2_score

NaN=np.nan #IMPORTANTE DEFINIR EL NaN

# De esta manera se calculan las longitudes de onda en vez de meterlas a mano
longi=range(280*2,400*2+1,1)
lon=np.double(longi)/2

namef='C:/Users/jartg/Documents/Prácticas de empresa/datosBenthamGranada/Gmeas.txt'
Gmeas = pd.read_csv(namef, sep="\t", header=None)
octas=Gmeas[:,6]
condicion=np.abs(octas)<2 #hay valores que al no haber medidas de nube el valor es -999, hay que descartar esos poniendo abs
Gmeas_cf=np.double(Gmeas[condicion,:]) #Condicion es un vector fila que da 1 si se cumple que octas<2, y 0 si no. Con esta
estructura se seleccionan las filas que condicion es =1

namef='C:/Users/jartg/Documents/Prácticas de empresa/datosBenthamGranada/Gmod.txt'
Gmod = pd.read_csv(namef, sep="\t", header=None)
Gmod_cf=np.double(Gmod[condicion,:]) #Es importante pasarlo a double

UVmed=Gmeas_cf[:,16:257]
UVmod=Gmod_cf[:,16:257]

# ESTO SE AÑADE PARA CATALOGAR COMO NOT A NUMBER AQUELLOS DATOS QUE SON MALOS CATALOGA-
DOS COMO -999
UVmed[UVmed<-99]=NaN
UVmod[UVmod<-99]=NaN

plt.figure(1)
plt.plot(lon, UVmed[0,:], color='blue') #dibuja el primer espectro de medidas
plt.plot(lon, UVmod[0,:], color='red') #dibuja el primer espectro de simulaciones
plt.title('Global radiation comparison (Model - measures)',fontsize=10)
plt.legend(['Gmeas', 'Gmod'])

N = UVmod.shape[0]
#N = UVmed.shape[0] también vale, hay el mismo número de datos
Nlon = UVmod.shape[1]
dif = UVmod - UVmed

difP = 100*(UVmod - UVmed)/UVmed # las diferencias en porcentaje
difP[UVmed==0]=NaN

suma = np.empty((Nlon))
MBE = np.empty((Nlon))
MBER = np.empty((Nlon))
RMSEPR = np.empty((Nlon))
STDPR = np.empty((Nlon))
MBEPR = np.empty((Nlon))
RMSEPR = np.empty((Nlon))
STDPR = np.empty((Nlon))
MBEPR2 = np.empty((Nlon))
RMSEPR2 = np.empty((Nlon))
STDPR2 = np.empty((Nlon))
r = np.empty((Nlon))

for i in range(Nlon):
    for j in range(N):
        suma[i] = suma[i] + dif[j,i]
        MBE[i] = suma[i]/float(N)
```

```

# UNA MANERA MAS RAPIDA DE CALCULAR LOS INDICES SIN HACER EL BUCLE en j
MBER[i]=np.nanmean(dif[:,i])
STDR[i]=np.nanstd(dif[:,i],ddof=1)
RMSEPR[i]=np.sqrt(np.nanmean(dif[:,i]**2))

# AHORA LOS ESTADISTICOS EN PORCENTAJE
MBEPR[i]=np.nanmean(difP[:,i])
STDPR[i]=np.nanstd(difP[:,i],ddof=1)
RMSEPR[i]=np.sqrt(np.nanmean(difP[:,i]**2))

# AHORA LOS ESTADISTICOS EN PORCENTAJE DE OTRA MANERA.
MBEPR2[i]=100*MBER[i]/np.nanmean(UVmed[:,i])
STDPR2[i]=100*STDR[i]/np.nanmean(UVmed[:,i])
RMSEPR2[i]=100*RMSEPR[i]/np.nanmean(UVmed[:,i])

#COEF PEARSON
prod = UVmed * UVmod
num = np.nanmean(prod[:,i]) - np.nanmean(UVmod[:,i]) * np.nanmean(UVmed[:,i]) #a partir de la fórmula dejándolo en función de las medias, las N se van
denom = np.sqrt(np.nanmean(UVmed[:,i]**2) - np.nanmean(UVmed[:,i])**2) * np.sqrt(np.nanmean(UVmod[:,i]**2) - np.nanmean(UVmod[:,i])**2)
r[i] = num / denom

print('El coeficiente r2 medio es:')
print(np.nanmean(r)**2)

plt.figure(2)
# plt.plot(lon, MBE[:,], color='green') #se representa la media MBE en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, MBER, color='red') #se representa la media MBE en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, RMSEPR, color='green') #se representa la desviación RMSE en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, STDR, color='blue') #se representa la desviación estandard en función de la longitud de onda
plt.legend(['MBE', 'RMSE', 'STD'])
plt.grid('on')
plt.title('Global radiation comparison (Model - measures)',fontsize=10)

plt.figure(3)
plt.plot(lon, MBEPR, color='red') #se representa la media MBE en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, RMSEPR, color='green') #se representa la desviación RMSE en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, STDPR, color='blue') #se representa la desviación estandard en función de la longitud de onda
plt.legend(['MBE', 'RMSE', 'STD'])
plt.grid('on')
plt.title('Global radiation comparison (Model - measures)',fontsize=10)

plt.figure(4)
plt.plot(lon, MBEPR2, color='red') #se representa la media MBE en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, RMSEPR2, color='green') #se representa la desviación RMSE en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, STDPR2, color='blue') #se representa la desviación estandard en función de la longitud de onda
plt.legend(['MBE', 'RMSE', 'STD'])
plt.grid('on')
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('MBE, RMSE and STD (%)')
plt.title('Global radiation comparison (Model - measures)',fontsize=10)

plt.figure(5)
plt.plot(lon, r**2, color='orange')
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('Pearson coefficient squared, r2')
plt.title('Global radiation comparison (Model - measures)',fontsize=10)
plt.grid('on')
plt.ylim(0,1)

#TRATANDO CON TODOS LOS DATOS JUNTOS
#plt.figure(6)
x=UVmed.flatten()
y=UVmod.flatten()
#plt.scatter(x,y)
x=x[ np.isnan(x)]
y=y[ np.isnan(y)]

model = np.polyfit(x,y,1)
model
print('La pendiente de la recta es: ')
print(model[0])

```

```
print('La ordenada en el origen es: ')
print(model[1])
print('El coeficiente de determinación es: ')
print(r2_score(x, y))

#OTRA MANERA CORRECTA PERO INNECESARIA SI SE HACE COMO ARRIBA
difq = dif * dif
s = np.empty((Nlon))
RMSE = np.empty((Nlon))
for i in range(Nlon):
    for j in range(N):
        s[i] = s[i] + difq[j,i]
    RMSE[i] = np.sqrt(s[i]/float(N))

# plt.figure(5)
# plt.plot(lon, RMSE[:,], color='orange') #se representa la desviación RMSE en función de la longitud de onda
```

NOTA: Este código fue el utilizado para obtener los parámetros correspondientes a la radiación UV global. Para su componente difusa solo es necesario cambiar la ruta de los archivos de donde se leen los datos para que funcione de la misma manera.

Para la obtención de los espectros del CMF respecto a la longitud de onda y su valor medio para cada tipo de cielo, se escribió e hizo uso de la siguiente parte de código:

```
CMFdes = np.empty((N,Nlon))
CMFdesmedio = np.empty((Nlon))

CMFdes[UVmod==0] = NaN #Para evitar divisiones por 0
CMFdes[:,:] = UVmed[:,:] / UVmod[:,:]
CMFdes[CMFdes==np.Infinity] = NaN #Quitamos los infinitos para poder hacer la media

for i in range(Nlon):
    CMFdesmedio[i]=np.nanmean(CMFdes[:,i])

plt.figure(2)
plt.plot(lon, CMFdesmedio, color='purple') #se representa la media del CMF en función de la longitud de onda
plt.legend(['CMF medio'])
plt.grid('on')
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('CMF Mean (Ø)')
plt.title('Global Radiation: Cloud Modification Factor (CMF), on a clear sky',fontsize=10)

#NUBES Y CLAROS
#Elegimos ahora solo los datos con octas entre 2 y 4, lo que representaría un cielo con nubes y claros (nyc)

condicion=1<np.abs(octas) #hay valores que al no haber medidas de nube el valor es -999, por eso hay que descartar esos poniendo
abs
cond2=np.abs(octas)<5
Gmeas_nyc=np.double(Gmeas[condicion][cond2][:]) #Condicion es un vector fila que da 1 si se cumple que octas<2, y 0 si no.
COn esta estructura se seleccionan las filas que condicion es =1
Gmod_nyc=np.double(Gmod[condicion][cond2][:])

UVmed=Gmeas_nyc[:,16:257]
UVmod=Gmod_nyc[:,16:257]

UVmed[UVmed<-.99]=NaN
UVmod[UVmod<-.99]=NaN

N = UVmod.shape[0]
#N = UVmed.shape[0] tammbién vale, hay el mismo número de datos
Nlon = UVmod.shape[1]

CMFnyc = np.empty((N,Nlon))
CMFnycmedio = np.empty((Nlon))

CMFnyc[UVmod==0] = NaN #Para evitar divisiones por 0
CMFnyc[:,:] = UVmed[:,:] / UVmod[:,:]
```

```
CMFnyc[CMFnyc==np.Infinity] = NaN #Quitamos los infinitos para poder hacer la media

for i in range(Nlon):
    CMFnycmedio[i]=np.nanmean(CMFnyc[:,i])

plt.figure(3)
plt.plot(lon, CMFnycmedio, color='green') #se representa la media del CMF en función de la longitud de onda
plt.legend(['CMF medio'])
plt.grid('on')
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('CMF Mean ( $\bar{\phi}$ )')
plt.title('Global Radiation: Cloud Modification Factor (CMF), on a scattered sky',fontsize=10)

#CIELO NUBLADO
condicion=4<np.abs(octas) #hay valores que al no haber medidas de nube el valor es -999, por eso hay que descartar esos poniendo
abs
cond2=np.abs(octas)<7
Gmeas_nub=np.double(Gmeas[condicion][cond2[:]]) #Condicion es un vector fila que da 1 si se cumple que octas<2, y 0 si no.
COon esta estructura se seleccionan las filas que condicion es =1
Gmod_nub=np.double(Gmod[condicion][cond2[:]])

UVmed=Gmeas_nub[:,16:257]
UVmod=Gmod_nub[:,16:257]

UVmed[UVmed<-99]=NaN
UVmod[UVmod<-99]=NaN

N = UVmod.shape[0]
#N = UVmed.shape[0] también vale, hay el mismo número de datos
Nlon = UVmod.shape[1]

CMFnub = np.empty((N,Nlon))
CMFnubmedio = np.empty((Nlon))

CMFnub[UVmod==0] = NaN #Para evitar divisiones por 0
CMFnub[:,:] = UVmed[:,:] / UVmod[:,:]
CMFnub[CMFnub==np.Infinity] = NaN #Quitamos los infinitos para poder hacer la media

for i in range(Nlon):
    CMFnubmedio[i]=np.nanmean(CMFnub[:,i])

plt.figure(4)
plt.plot(lon, CMFnubmedio, color='blue') #se representa la media del CMF en función de la longitud de onda
plt.legend(['CMF medio'])
plt.grid('on')
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('CMF Mean ( $\bar{\phi}$ )')
plt.title('Global Radiation: Cloud Modification Factor (CMF), on a cloudy sky',fontsize=10)

#CIELO CUBIERTO/MUY NUBLADO
condicion=6<np.abs(octas) #hay valores que al no haber medidas de nube el valor es -999, por eso hay que descartar esos poniendo
abs
cond2=np.abs(octas)<9
Gmeas_cub=np.double(Gmeas[condicion][cond2[:]]) #Condicion es un vector fila que da 1 si se cumple que octas<2, y 0 si no. Con
esta estructura se seleccionan las filas que condicion es =1
Gmod_cub=np.double(Gmod[condicion][cond2[:]])

UVmed=Gmeas_cub[:,16:257]
UVmod=Gmod_cub[:,16:257]

UVmed[UVmed<-99]=NaN
UVmod[UVmod<-99]=NaN

N = UVmod.shape[0]
#N = UVmed.shape[0] también vale, hay el mismo número de datos
Nlon = UVmod.shape[1]

CMFcub = np.empty((N,Nlon))
CMFcubmedio = np.empty((Nlon))

CMFcub[UVmod==0] = NaN #Para evitar divisiones por 0
CMFcub[:,:] = UVmed[:,:] / UVmod[:,:]
```

```
CMFsub[CMFsub==np.Infinity] = NaN #Quitamos los infinitos para poder hacer la media

for i in range(Nlon):
    CMFsubmedio[i]=np.nanmean(CMFsub[:,i])

plt.figure(5)
plt.plot(lon, CMFsubmedio, color='orange') #se representa la media del CMF en función de la longitud de onda
plt.legend(['CMF medio'])
plt.grid('on')
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('CMF Mean ( $\bar{\phi}$ )')
plt.title('Global Radiation: Cloud Modification Factor (CMF), on an overcast sky',fontsize=10)

#REPRESENTO TODOS
plt.figure(6)
plt.plot(lon, CMFmedio, color='red') #se representa la media del CMF en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, CMFdesmedio, color='purple') #se representa la media del CMF en un cielo despejado (0-1 octas) en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, CMFnycmedio, color='green') #se representa la media del CMF en un cielo con nubes y claros (2-4 octas) en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, CMFsubmedio, color='blue') #se representa la media del CMF en un cielo nublado (5-6 octas) en función de la longitud de onda
plt.plot(lon, CMFsubmedio, color='orange') #se representa la media del CMF en un cielo cubierto (7-8 octas) función de la longitud de onda
plt.legend(['CMF medio','Cielos despejados (0-1 octas)','Cielo con nubes y claros (2-4 octas)','Cielo nublado (5-6 octas)','Cielo cubierto (7-8 octas)'])
plt.grid('on')
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('CMF Mean ( $\bar{\phi}$ )')
plt.title('Global Radiation: Cloud Modification Factor (CMF), depending on the cloudiness of the sky',fontsize=10)

#ZOOM EN 280-300 nm
long=range(280*2,300*2+1,1)
zoom=np.double(long)/2

plt.figure(7)
plt.plot(zoom, CMFmedio[41], color='red') #se representa la media del CMF en función de la longitud de onda
plt.plot(zoom, CMFdesmedio[41], color='purple') #se representa la media del CMF en un cielo despejado (0-1 octas) en función de la longitud de onda
plt.plot(zoom, CMFnycmedio[41], color='green') #se representa la media del CMF en un cielo con nubes y claros (2-4 octas) en función de la longitud de onda
plt.plot(zoom, CMFsubmedio[41], color='blue') #se representa la media del CMF en un cielo nublado (5-6 octas) en función de la longitud de onda
plt.plot(zoom, CMFsubmedio[41], color='orange') #se representa la media del CMF en un cielo cubierto (7-8 octas) función de la longitud de onda
plt.legend(['CMF medio','Cielos despejados (0-1 octas)','Cielo con nubes y claros (2-4 octas)','Cielo nublado (5-6 octas)','Cielo cubierto (7-8 octas)'])
#plt.grid('on')
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('CMF Mean ( $\bar{\phi}$ )')
plt.title('Global Radiation: Cloud Modification Factor (CMF), depending on the cloudiness of the sky',fontsize=10)

#EL RESTO
long=range(300*2,400*2+1,1)
nozoom=np.double(long)/2
plt.figure(8)
#plt.plot(nozoom, CMFmedio[40:], color='red') #se representa la media del CMF en función de la longitud de onda
plt.plot(nozoom, CMFdesmedio[40:], color='purple') #se representa la media del CMF en un cielo despejado (0-1 octas) en función de la longitud de onda
plt.plot(nozoom, CMFnycmedio[40:], color='green') #se representa la media del CMF en un cielo con nubes y claros (2-4 octas) en función de la longitud de onda
plt.plot(nozoom, CMFsubmedio[40:], color='blue') #se representa la media del CMF en un cielo nublado (5-6 octas) en función de la longitud de onda
plt.plot(nozoom, CMFsubmedio[40:], color='orange') #se representa la media del CMF en un cielo cubierto (7-8 octas) función de la longitud de onda
#plt.legend(['CMF medio','Cielos despejados (0-1 octas)','Cielo con nubes y claros (2-4 octas)','Cielo nublado (5-6 octas)','Cielo cubierto (7-8 octas)'])
plt.grid('on')
plt.xlabel('Wavelength (nm)')
plt.ylabel('CMF Mean ( $\bar{\phi}$ )')
plt.title('Global Radiation: Cloud Modification Factor (CMF), depending on the cloudiness of the sky',fontsize=10)
```

```
print(np.nanmean(CMFdesmedio[80:]))  
print(np.nanmean(CMFnycmedio[80:]))  
print(np.nanmean(CMFnubmedio[80:]))  
print(np.nanmean(CMFcubmedio[80:]))
```

De nuevo, este código expulsa los datos de CMF para la radiación global, y de la misma manera que antes, cambiando la ruta de los archivos se puede obtener las medidas de directa.

C. Gráficas

En este anexo se incluirán todas las gráficas que, por ser parte de cálculos o resultados intermedios, incompletos, menos precisos, u otra causa; no se muestran pero se referencian en el correspondiente apartado de Resultados (3).

Validación del modelo

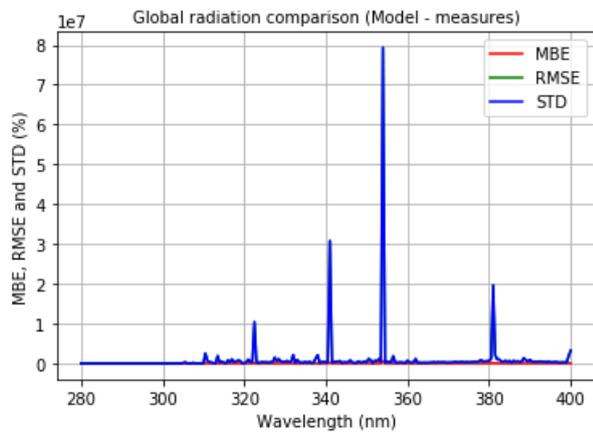


Figura C.1: *Parámetros estadísticos relativos (en %) para la radiación global. Otro método de cálculo.*

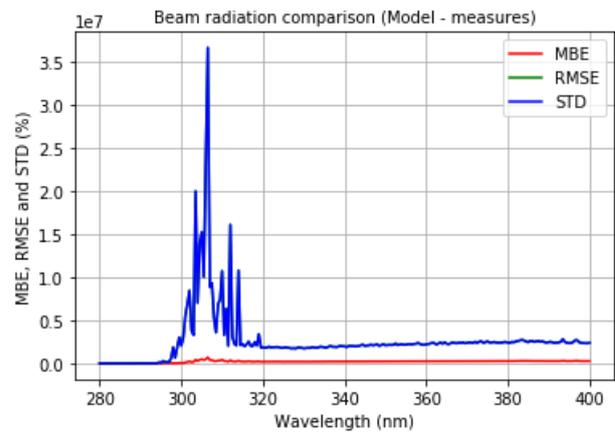


Figura C.3: *Parámetros estadísticos relativos (en %) para la radiación directa. Otro método de cálculo.*

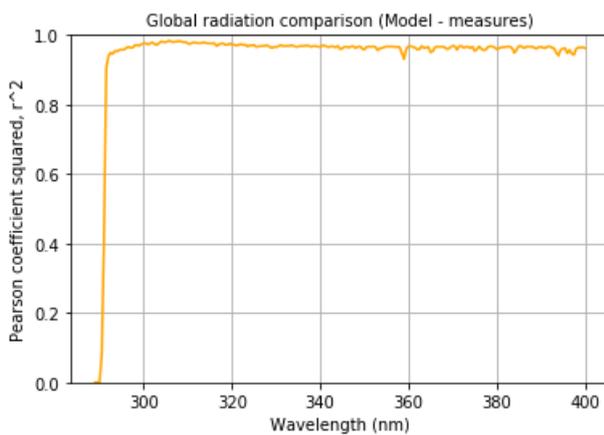


Figura C.2: *r^2 para cada longitud de onda de la radiación global*

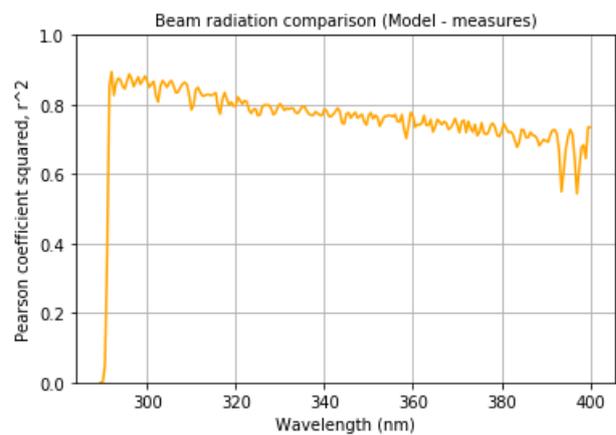


Figura C.4: *r^2 para cada longitud de onda de la radiación directa*

CMF

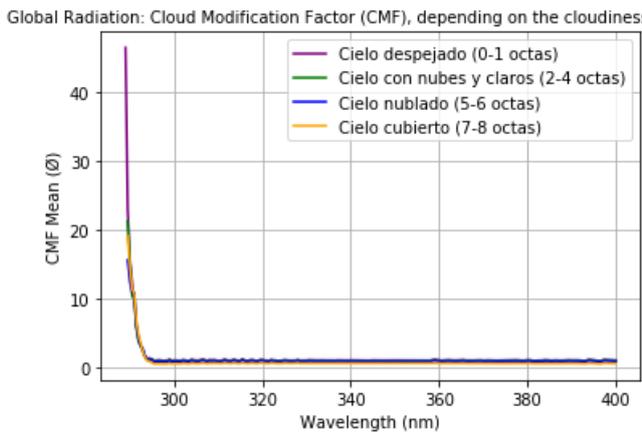


Figura C.5: CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación global (280-400nm)

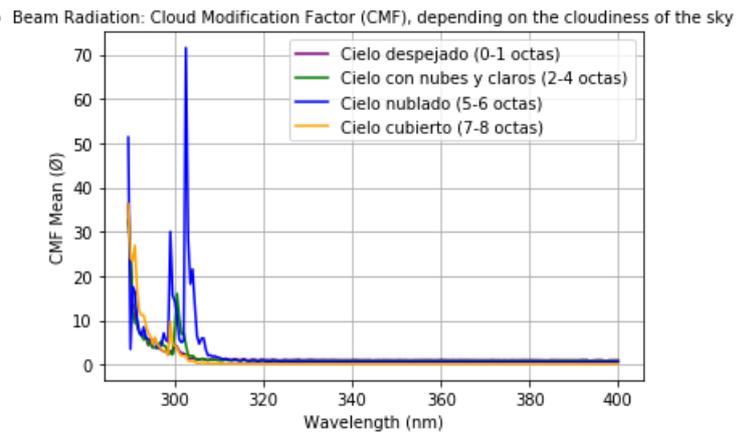


Figura C.7: CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación directa (280-400nm)

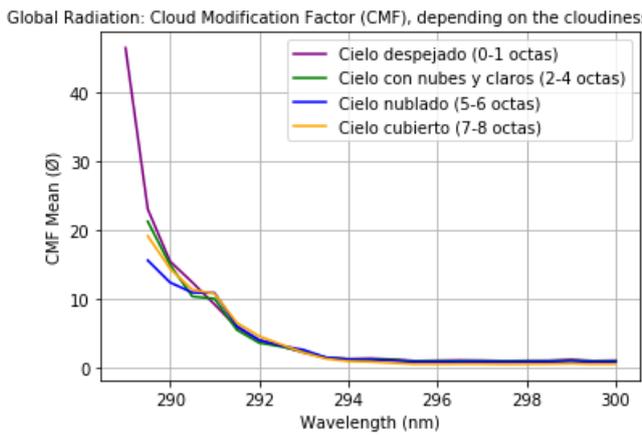


Figura C.6: CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación global: Datos despreciados (280-300nm)

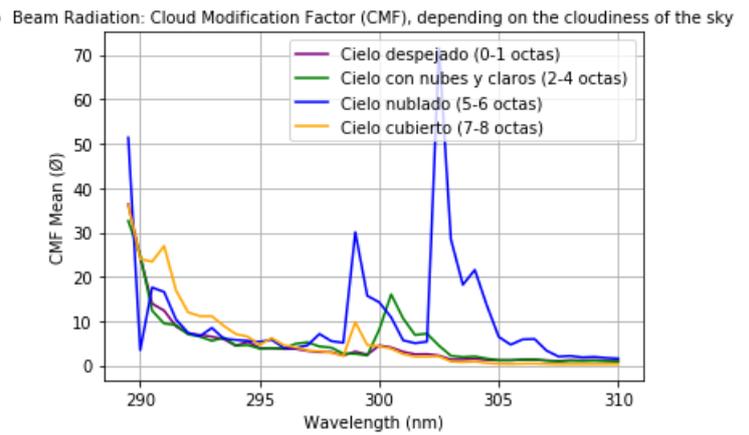


Figura C.8: CMF en función de la longitud de onda y la nubosidad del cielo para la radiación directa: Datos despreciados (280-310nm)

Referencias

- [1] C. Toledano. *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación “el arenosillo” de la red AERONET*. PhD thesis, UVa, 2005.
- [2] National Technology and LLC. for the U.S. Department of Energy Engineering Solutions of Sandia. *PV Performance Modeling Collaboration*. Accedido en 06-05-21 a <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/1-weather-design-inputs/sun-position/>, 2018.
- [3] D. Mateos. *Solar Irradiance and Actinic Flux in the UV Range: Advances in the Characterization of the Cloudy Scenario*. PhD thesis, UVa, 2012.
- [4] M. Iqbal. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, Nueva York, 1983.
- [5] R. Román. *Reconstrucción y análisis de la radiación ultravioleta eritemática en la Península Ibérica desde 1950*. PhD thesis, UVa, 2014.
- [6] Organización Mundial de la Salud. *Índice UV Solar Mundial. Guía práctica*. Accedido en 21-04-21 a <http://www.who.int/entity/uv/publications/en/uvispa.pdf>, 2003.
- [7] A. C. de la Casinière y V. E. Cachorro. *La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera*. Ciencias (Universidad de Valladolid), 2008.
- [8] B. L. Diffey. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, 28(1):4–13, septiembre 2002.
- [9] J. Reichrath y S. Reichrath. Hope and challenge: the importance of ultraviolet (UV) radiation for cutaneous vitamin D synthesis and skin cancer. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation Supplement*, 243:112–119, abril 2012.
- [10] B. L. Diffey. Solar ultraviolet radiation effects on biological system. *Physics in Medicine and Biology*, 36:299–328, 1991.
- [11] J. Krutmann. III. Immunology of UV-irradiated skin. *European Journal of Cancer*, 30(4):554–555, 1994.
- [12] P. A. Tipler y G. Mosca. *Física para la ciencia y la tecnología*, page 589. Worth Publishers, 1976.
- [13] F. Velázquez de Castro. *El ozono: ¿cuándo protege y cuándo destruye?* McGraw-Hill Interamericana de España, 2001.
- [14] F. Q. Zhao y H. Hiroyasu. The applications of laser rayleigh scattering to combustion diagnostics. *Progress in Energy and Combustion Science*, 19(6):447–485, 1993.
- [15] F. Robben. *Comparison of density and temperature measurement using Raman scattering and Rayleigh scattering*, pages 179–195. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1975.
- [16] M. Kerker. *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation*. Academic Press, 1969.

- [17] E. J. McCartney. *Optics of the Atmosphere (Scattering by Molecules and Particles)*. John Wiley & Sons, Nueva York, 1976.
- [18] J. Calbò, D. Pagès, and J.-A. González. Empirical Studies of Cloud Effects on UV Radiation: A review. *Reviews of Geophysics*, 43(2):1–28, 2005.
- [19] C. Fröhlich y J. London. *Revised instruction manual on radiation instruments and measurements*. WCRP publications series n^o 7. WMO/TD n^o 149, octubre 1986.
- [20] A. F. McKinlay y B. L. Diffey. *A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. Human exposure to UV radiation: risk and regulations.*, pages 83–87. Elsevier Science, 1987.
- [21] R. Román, D. Mateos, A. de Miguel, J. Bilbao, A. Pérez-Burgos, R. Rodrigo, and V.E. Cachorro. Atmospheric effects on the ultraviolet erythematous and total shortwave solar radiation in Valladolid, Spain. *Óptica Pura y Aplicada*, 45:17–21, enero 2012.
- [22] A. Ångström. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 16(1):64–75, 1964.
- [23] M. J. Marín, A. R. Esteve, F. Tena, M. P. Utrillas, and J. A. Martínez-Lozano. UVI dependence on ozone amount and turbidity in Valencia. *Óptica Pura y Aplicada*, 40(1):25–30, 2007.
- [24] J. G. Estupiñán, S. Raman, G. H. Crescenti, J. J. Streicher, and W. F. Barnard. Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *Journal of Geophysical Research*, 101:16807–16816, julio 1996.
- [25] J. S. Schafer, V. K. Saxena, B. N. Wenny, W. Barnard, and J. J. DeLuisi. Observed influences of clouds on ultraviolet-B radiation. *Geophysical Research Letters*, 23:2625–2628, septiembre 1996.
- [26] M. Antón, R. Román, A. Valenzuela, F. J. Olmo, and L. Alados-Arboledas. Direct-sun total ozone data from a spectroradiometer: methodology and comparison with satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6:637–647, 2013.
- [27] R. Román, M. Antón, A. Valenzuela, J. E. Gil, H. Lyamani, A. De Miguel, F. J. Olmo, J. Bilbao, and L. Alados-Arboledas. Evaluation of the desert dust effects on global, direct and diffuse spectral ultraviolet irradiance. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 65(1):19578, 2013.
- [28] A. Cazorla, F. J. Olmo, and L. Alados-Arboledas. Development of a sky imager for cloud cover assessment. *Journal of the Optical Society of America A*, 25(1):29–39, enero 2008.
- [29] AERONET (Aerosol Robotic Network): <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.
- [30] *Guía de usuario de LibRadtran* disponible en <http://www.libradtran.org>.