



Universidad de Jaén

Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Master

**EVALUACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE LA
RADIACIÓN SOLAR DEL MODELO DE
TRANSFERENCIA RADIATIVA LIBRADTRAN EN
CONDICIONES DE CIELO DESPEJADO Y CON LA
PRESENCIA DE NUBES TIPO CIRRO**

Alumno: Caio Araújo Damasceno

Tutor: Prof. D. David Pozo Vázquez

Dpto: Física

Septiembre, 2017

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Nubosidad	4
1.2 Energía Solar.....	7
1.3 Objetivos.....	10
1.4 Estructura del Trabajo.....	10
2. FUNDAMENTOS DE LA RADIACIÓN.....	12
2.1 Fundamentos de la Transferencia Radiativa	12
2.2 Fundamentos de la Radiación Solar.....	12
2.3 Absorción, Dispersión y Reflexión de la Radiación.....	14
2.4 La influencia de las Nubes en la Radiación	16
3. BASE DE DATOS DE LA UNIVERSIDAD DE JAÉN	18
3.1 Ceilómetro	18
3.2 Cámara nubes.....	20
3.3 Datos radiación	21
4. DESCRIPCIÓN DEL LIBRADTRAN	23
4.1 Descripción general del software.....	23
4.2 Parametrización del Modelo de Cielo Despejado	28
4.3 Parametrización de las Nubes Cirros.	30
5. METODOLOGIA	33
5.1 Generación de los INPUTS Cielo Despejado	33
5.2 Generación de los Archivos de Ice-Cloud Properties.....	34
5.3 Generación de los INPUTS para el Modelo con Nubes Cirros	35
5.4 Programa de Múltiples Simulaciones	37
5.5 Procesamiento de Datos.....	37
6. RESULTADOS	38
6.1 Cielo Despejado	39
6.1.1 Propuesta de mejoría de los resultados: Inserción de un “Aerosol very clear”... ..	43
6.2 Modelo con la presencia de nubes tipo Cirro.....	48
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	59
8. BIBLIOGRAFIA.....	62
INDICE DE FIGURAS	66
INDICE DE TABLAS.....	68

1. INTRODUCCIÓN

La Tierra recibe anualmente $1,5 \times 1.018 \text{ kWh/m}^2$ de energía solar, el que corresponde a cerca de 10.000 veces el consumo mundial de energía eléctrica en este período (Rüther, 2004). Ese hecho muestra que además de ser responsable por el mantenimiento de la vida en la Tierra, la irradiancia solar es una fuente energética abundante y tiene un enorme potencial de utilización en sistemas de captación y conversión de energía eléctrica. (Zomer, 2014)

Sin embargo, aunque en los últimos años ha habido un gran avance en la investigación y uso de la energía solar, su participación en el mix energético es todavía muy reducida si la comparamos con las energías fósiles. Esto ocurre por la gran variabilidad de la producción de este tipo de energía, asociada a cambios en la irradiancia solar. Esto hace que esta energía aún no sea fiable, como puedan serlo las energías fósiles.

La generación de electricidad a través de la energía solar es influenciada por diversos factores que pueden ser controlados o no por el hombre. Entre los factores controlables se tiene, por ejemplo, la ubicación geográfica, el posicionamiento geométrico y la limpieza de los módulos. Entre los factores no controlables se tiene las variaciones meteorológicas. Si bien la presencia de aerosoles puede modificar el recurso solar, el sombreado de los paneles por la presencia de nubosidad es el principal factor que hace variar la energía solar recibida en la superficie terrestre. En consecuencia, el estudio de la influencia de la nubosidad en la radiación solar, es de gran importancia en los estudios económicos para instalación de nuevas plantas, así como para integración de la producción de las plantas en el sistema eléctrico

En particular, la radiación solar sufre procesos de absorción y dispersión al cruzar la atmósfera, modificando la radiación que se recibe en la superficie respecto a la

extraterrestre. Estos fenómenos de absorción y dispersión varían en el espacio y en el tiempo, movidos por factores climáticos (por ejemplo, el ciclo solar) y meteorológicos (básicamente la presencia de nubes y de aerosoles).

El problema radica en que la variabilidad de generación de energía eléctrica en plantas solares de ambos casos está fuertemente condicionada por la nubosidad y en menor medida por los aerosoles. Esta variabilidad intrínseca al propio recurso solar, presenta retos relacionados con la operación de las centrales y con la integración de la producción en el sistema eléctrico.

Como consecuencia del gran avance de la energía solar en los últimos años, se ha tenido la necesidad de un mayor conocimiento acerca de la interacción de la radiación solar con la nubosidad. Este conocimiento es clave para aumentar la fiabilidad de la predicción de la radiación solar, mejorando en el funcionamiento y gestión de las plantas solares.

1.1 Nubosidad

La influencia de las nubes en la radiación solar es debida a la reflexión, absorción y dispersión de la radiación por las partículas de agua y hielo que las forman. La interacción depende de factores tales como el volumen, la forma, el espesor, la altura y la composición de las nubes. Por lo tanto, para estudiar la interacción, es necesario disponer de dichos parámetros.

A pesar de que las nubes solo representan una pequeña fracción del total de agua existente en la atmósfera, tienen un fuerte impacto sobre el balance energético de la tierra. Así, son uno de los principales moduladores del efecto invernadero. Además, las distintas tipologías de nubes tienen su origen en muy distintos procesos dinámicos y termodinámicos en la atmósfera. En consecuencia, la observación de las propiedades de

las nubes, así como su variabilidad espacial y temporal es esencial para el estudio del cambio climático y la meteorología en general (Boers et al., 2010).

Así, la comunidad científica lleva décadas observando y recopilando datos sobre nubosidad. Hasta hace unos años, este tipo de estudios estaban sobre todo motivados por la seguridad aeronáutica y el estudio del balance energético de la Tierra. En la actualidad, se están ampliando para otros fines, como las aplicaciones en energías renovables.

Las nubes son uno de los principales fenómenos meteorológicos relacionados con el ciclo hidrológico y, afectan el balance de energía en ambas escalas locales y globales a través de la interacción con la radiación solar y terrestre. Además, las nubes afectan nuestra vida cotidiana, por ejemplo, mediante la modificación de la cantidad de radiación ultravioleta (UV) que alcanza la superficie de la tierra (Long et al., 2006).

Tradicionalmente la cobertura y la clasificación de nubes se ha realizado según criterio de los técnicos de observación meteorológica: una tarea subjetiva y cara. En los últimos años, gracias al avance en las técnicas para el tratamiento automático de los datos, este proceso de detección y clasificación de las nubes está siendo mecanizado y optimizado.

Los instrumentos de medición terrestre para la detección y clasificación de nubes se pueden clasificar en tres grupos (Tapakis, 2012):

1. Medidores de irradiancia difusa y directa y radiómetros que miden la radiación electromagnética en un rango (banda) de frecuencias concretas. Normalmente, el rango elegido es el espectro visible e infrarrojo próximo.
2. Cámaras de cielo (también conocidas como cámaras de nube) que toman fotografías del cielo en el espectro visible, infrarrojo o ultravioleta.

3. Instrumentos activos que miden la retro-dispersión de los pulsos emitidos por el propio instrumento (principalmente Lidares y ceilómetros). Este tipo de instrumentos permite, por ejemplo, conocer la altura y el grosor de las nubes.

En particular, en los últimos años se ha generalizado el uso de cámaras de nubes, o cámaras de cielo. Estas cámaras realizan fotografías digitales de la bóveda celeste. La información recogida por los distintos canales se puede usar para detectar automáticamente la cobertura nubosa e incluso el tipo de nube (Heinle, 2010).

También se ha generalizado el uso de medidas de satélite para estimar la cobertura nubosa. La instrumentación terrestre presenta varias ventajas respecto a la instrumentación por satélite, debido a que mide con mayor exactitud el estado del cielo en el punto de interés. Los satélites, sin embargo, son capaces de tomar datos para regiones muy extensas, pero con una resolución espacial más baja. En la Figura 1 se representa los diferentes tipos de nubes con sus formas geométricas comunes y sus respectivas alturas con relación a la superficie terrestre.

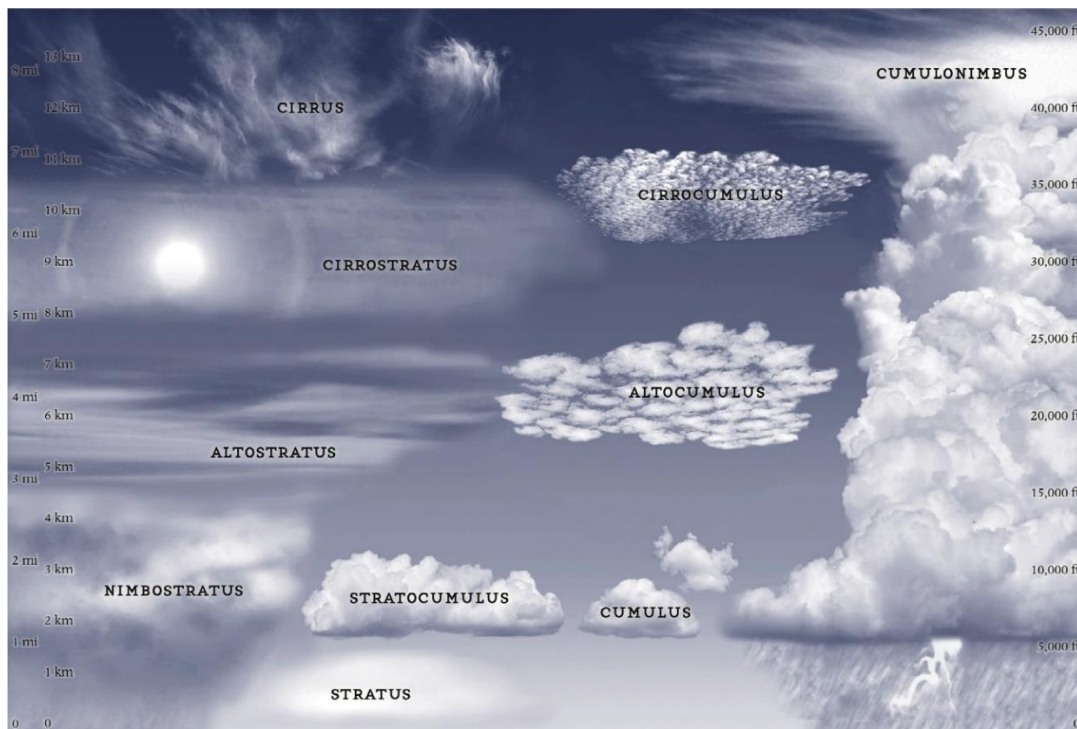


Figura 1. Tipos más comunes de Nubes

En ese trabajo se hará un estudio de la interacción de la radiación solar con la nube tipo cirro que son las nubes más altas, con altura promedio entre 9 y 11 km pero que pueden ser encontradas de 5 a 13 km con un espesor entre 0,1 y 3 km.

Como se puede ver en la Figura anterior, estas son nubes separadas en forma de filamentos blancos y delicados, sin sombras. Las nubes cirro pueden tener las más variadas formas, como mechones aislados, líneas estrechas en el cielo azul, en forma de plumas, líneas curvadas que termina en mechones y en general tienen una apariencia fibrosa semejante a cabellos.

1.2 Energía Solar

La energía solar, junto con la eólica, es la energía renovable más extendida y de más rápido crecimiento en el mundo. Este desarrollo ha venido también condicionado por las iniciativas europeas que fomentan el uso de consumo energético de origen renovable, especialmente de la energía solar, y que obligan a un importante aumento de la producción de energía de origen solar en Europa en las próximas décadas (Directivas Europeas 2009/28/CE y 2009/29/CE). Aun así, su participación en el mix eléctrico es aún muy limitada, por los motivos antes mencionados. Así, hoy en día hay una investigación intensa para reducir los costes y aumentar la eficiencia de las distintas tecnologías de aprovechamiento de la energía solar.

Hay muchas ventajas derivadas del estudio de la influencia de las nubes en la radiación solar. En la fase de proyecto de las plantas solares, por ejemplo, permite un mejor dimensionamiento y correcta estimación de la generación de la planta. En la fase de explotación de la planta, permite un mejor mantenimiento, evitando cargas innecesarias en los sistemas, disminuyendo el coste de mantenimiento y alargando la vida útil de la planta solar. Finalmente, permiten una adecuada integración de la producción de la planta en el sistema eléctrico.

La energía solar llega a la superficie terrestre en forma de tres componentes de la radiación:

- DNI (*Direct Normal Irradiance*, Irradiancia Normal Directa): radiación que atraviesa la atmósfera sin sufrir alteración y se recibe en la superficie perpendicular a la dirección de los rayos solares. Se toma un ángulo de abertura de 0.5° (anchura angular del sol vista desde la tierra). Esta radiación es usada por las centrales solares de concentración, tanto térmicas como de concentración fotovoltaica

- DHI (*Difuse Horizontal Irradiance*, Irradiancia Horizontal Difusa): radiación que se recibe en una superficie horizontal no procedente directamente del sol, sino que es dispersada por la atmósfera y finalmente se recibe en la superficie terrestre.

- GHI (*Global Horizontal Irradiance*, Irradiancia Horizontal Global): es la radiación global recibida en una superficie horizontal. Es la suma de las otras dos componentes proyectadas sobre una superficie horizontal (siendo el ángulo cenital solar). Esta radiación es usada por las centrales solares fotovoltaicas.

Hay dos tipos de sistemas de generación de electricidad por energía solar: las centrales de energía solar de concentración y las plantas fotovoltaicas. Esas últimas transforman directamente la GHI en electricidad y las centrales de energía solar de concentración utilizan para su funcionamiento sólo la DNI, puesto que aprovechan las trayectorias de radiación para que se concentre a través de los espejos.

1.3 Estudio de la interacción de la radiación con las nubes.

El estudio de la interacción de la radiación con las nubes se puede llevar a cabo con diferentes herramientas y metodologías, dependiendo del grado de aproximación deseado.

En primer lugar, se pueden utilizar modelos numéricos de predicción meteorológica (MNPM). A partir de la información de cobertura nubosa proporcionada

por estos modelos, se puede estimar la GHI. Sin embargo, la fiabilidad de estas estimaciones no es muy alta (Pincus et al., 2011; Arbizu-barrena et al., 2015). A diferencia de otras variables, la estimación de la nubosidad, y en consecuencia de la GHI, por los MNPM no ha mejorado mucho en las últimas décadas (Haiden et al., 2015; Mittermaier 2012). La naturaleza especial de las nubes (muy variables en el espacio y el tiempo) y el complejo proceso implicado en la generación de los diferentes tipos de nubes, hace que hoy en día la nubosidad sea uno de los parámetros meteorológicos más difíciles de evaluar y pronosticar por los MNPM (Haiden et al., 2015).

Otra forma de estimación de la nubosidad, y con ello la radiación solar, es el empleo de imágenes de satélite. Los satélites geoestacionarios (con alta resolución espacial y temporal) nos permiten obtener la información requerida de las nubes, por lo que las imágenes de satélite son una base adecuada para las estimaciones de la radiación solar. Actualmente el algoritmo más extendido es el HELIOSAT (Rigollier et al., 2004). Este algoritmo calcula el porcentaje de cielo cubierto con nubes y computan la parte proporcional de radiación de cielo despejado que llegaría a la superficie terrestre. De esta forma, y utilizando la estimación de nubosidad, se pueden obtener estimaciones de la radiación solar en superficie y, finalmente, de la producción de las plantas solares (Lorenz et al., 2004). Sin embargo, la fiabilidad de las estimaciones de la nubosidad y radiación en base a imágenes de satélite está lejos de la necesaria (Linares-Rodriguez et al. 2013). La razón es que, hoy en día, en las predicciones de radiación con satélite se tratan por igual todos los tipos de nubes, a pesar de que la interacción con la radiación solar con las nubes depende fuertemente del tipo de la tipología de las mismas. La mejora de las estimaciones y predicciones puede llevarse a cabo mediante una mejor caracterización de las nubes, que permita utilizar códigos de transferencia radiactiva para una estimación más precisa de la radiación.

1.4 Objetivos

A pesar del interés por el software de cálculo de transferencia radiativa libRadtran, hasta la fecha, sin embargo, son pocas las evaluaciones llevadas a cabo de este producto, y menos aún en la Península Ibérica.

El objetivo del trabajo planteado en esta tesina es evaluar las estimaciones de las irradiancias solares estimadas por libRadtran en condiciones de cielo despejado y con la presencia de nubes tipo cirro. Las nubes cirros son las más frecuentes en el cielo y suelen ocupar áreas muy extensas, de ahí la importancia del estudio de su influencia en el recurso solar.

En concreto, se evaluará la fiabilidad de las estimaciones de GHI, DNI y DHI para:

- Cielo despejado
- Nubes tipo Cirro.

La evaluación se llevará a cabo con una base de datos de medidas de la estación meteorológica de la Universidad de Jaén. La estación dispone de sensores de radiación para la medida de las tres componentes de la radiación (GHI, DNI y DHI). Así como de una cámara de nubes y un ceilómetro que permite realizar mediciones del tipo de nube, su altura y espesor.

1.5 Estructura del Trabajo

Este trabajo está dividido en siete capítulos y la sección de bibliografía que

En el capítulo 2 se abordan los fundamentos de la radiación solar y de la función de transferencia radiativa. Se describen aspectos como la absorción, dispersión y reflexión, de la radiación solar en la atmósfera.

En el capítulo 3 se presenta la base de datos de la estación meteorológica de la Universidad de Jaén usada en el presente trabajo. En el capítulo 4 se describe en

profundidad el libRadtran. Se presenta una descripción general del software, describiendo como se representa y se trata en este software el cielo despejado y las nubes tipo cirro.

En el Capítulo 5 se presenta la metodología utilizada: la generación de los inputs de cielo despejado, los archivos de parametrización de las nubes, la generación de los inputs para el modelo con presencia de nubes, además del desarrollo del programa de múltiples simulaciones y procesamiento de datos.

En el Capítulo 6 se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones propuestas en el software libRadtran, para el caso de cielo despejado y con nubes tipo cirro.

Finalmente, en el capítulo 7 se abordan las conclusiones del trabajo, con las impresiones finales y comentarios, además de juzgar los objetivos propuestos y exponer posibles trabajos futuros que pueden ser desarrollados como continuidad de esa investigación.

2. FUNDAMENTOS DE LA RADIACIÓN

2.1 Fundamentos de la Transferencia Radiativa

Resolver la Ecuación de la Transferencia Radiativa (ETR) es un problema complejo y particular. Hay diversos métodos de resolución para diferentes aplicaciones (Mayer et al, 2015). No es el objetivo de ese trabajo los detalles de esa resolución, sino su aplicación práctica.

La para un medio macroscópicamente isotrópico es definida según la ecuación 1 (Emde et al, 2016):

$$\frac{\partial I}{\beta \partial s} = -I + J \quad (1)$$

Donde J es la función de la fuente:

$$J = \frac{\omega_0}{4\pi} \int P(\Omega, \Omega') I(\Omega') d\Omega' + (1 - \omega_0) B_e(T) \quad (2)$$

El $I = (I, Q, U, V)$ es el vector Stokes en (x, y, z) , β es el coeficiente de extinción, ω_0 el albedo de dispersión, $P(\Omega, \Omega')$ la matriz de dispersión, y $B_e(T) = (B(T), 0, 0, 0)$ el vector de emisión que incluye la función de Planck $B(T)$. Para la mayoría de las aplicaciones en la atmosfera terrestre, la emisión térmica puede ser desconsiderada para longitudes de onda menores que $3 \mu m$, y en ese caso el vector Stokes en la ecuación 1 y 2 sustituido por la radiancia L , la matriz de fase se queda la función escalar $p(\Omega, \Omega')$ y el vector de emisión es solamente la función de Planck $B(T)$ (Emde et al, 2016).

2.2 Fundamentos de la Radiación Solar

En la década de 70, se determinó la Constante Solar S , que es la energía solar total que incide en el topo de la atmosfera terrestre usando radiómetros a bordo de muchos satélites en todo el mundo. De esas medidas se obtuvo el valor $1366 \pm 3 \text{ Wm}^{-2}$ (Castelli, 2015).

El espectro solar es la distribución de la radiación como función de la longitud de onda. La suma de todas las irradiancias individuales de cada longitud de onda es la constante solar que es aproximadamente igual a la energía emitida por un cuerpo negro en 5782K. En la Figura 2, se puede observar es espectro extraterrestre estándar superpuesto a energía emisión de un cuerpo negro a 5782K (Castelli, 2015).

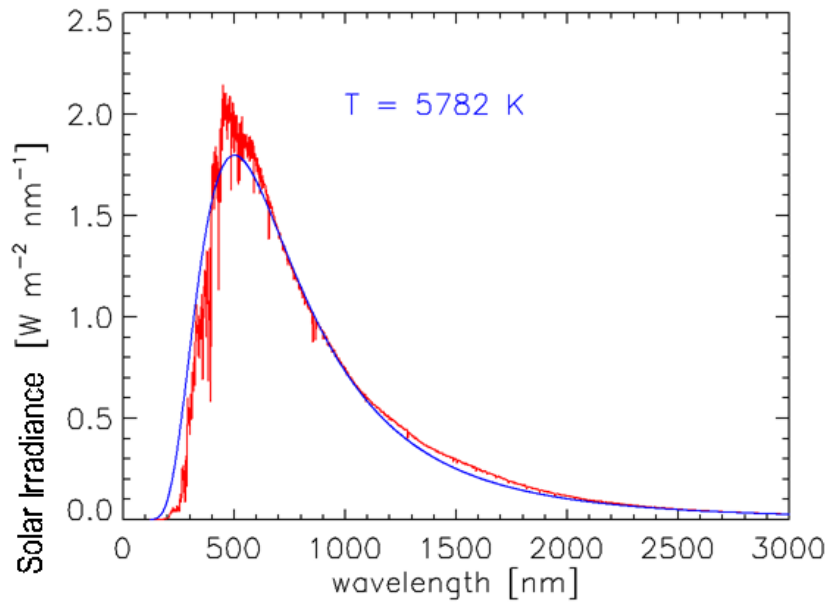


Figura 2. Espectro Extraterrestre y Emisión de un Cuerpo Negro en 5782 K

Esa constante solar es definida para la distancia media d_m entre el sol y la tierra, sin embargo, la irradiancia en el topo de la atmosfera, considerando una superficie horizontal, depende de la distancia sol-tierra real d_r que varía de acuerdo con la órbita elíptica que hace la tierra alrededor del sol y del ángulo cenital θ , el complementario de la altura solar que mide la altura del sol respecto a un plano horizontal con el observador. Por lo tanto, la irradiancia en una superficie horizontal en el topo de la atmosfera F_h es:

$$F_h = F \cos \theta = S \left(\frac{d_m}{d_r} \right) \cos \theta \quad (3)$$

Donde F es la irradiancia en un plano normal al rayo solar y θ el ángulo acimutal que es calculado para una superficie horizontal según la ecuación (Myer, 2013):

$$\theta = \cos^{-1}(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \quad (4)$$

Donde δ es el ángulo de declinación debido a inclinación de 23.5 en el axis rotacional de la tierra y depende del día del año; φ es la latitud y ω es la hora angular.

2.3 Absorción, Dispersión y Reflexión de la Radiación.

La radiación solar que incide en el tope de la atmosfera no es igual a la que llega a la superficie terrestre pues parte de ella es absorbida, dispersada y reflejada por los gases atmosféricos, aerosoles y nubes y la superficie de la tierra. La ETR antes presentada permite el análisis de la interacción de la radiación solar incidente en el tope de la atmósfera con los componentes de la misma, permitiendo calcular la radiación incidente en superficie. La absorción es la conversión de radiación en otra forma de energía, como el calor, y generalmente es debida a las moléculas atmosféricas y aerosoles. Dependiendo de la longitud de onda, la radiación es absorbida por algún tipo de gas, por ejemplo, la radiación ultravioleta en el intervalo 200 – 300 nm es absorbida principalmente por el ozono O₃ en la estratosfera.

La dispersión atmosférica, que depende de las diferentes partículas y sus tamaños, cambia la dirección de propagación de la radiación. Generalmente es un proceso elástico, o sea, la radiación dispersada tiene la misma frecuencia del incidente. Sin embargo, otra parte es dispersado de forma inelástica y pierde energía en las transiciones electrónicas, llamado de *Raman scattering*. Para partículas esféricas, la dispersión es llamada de *Rayleigh scattering*. Ese último modelo es muy importante pues diferentes partículas con formas geométricas distintas pueden ser aproximadas a partículas esféricas con radio efectivo que tienen las mismas propiedades de dispersión (Castelli, 2015).

La absorción y la dispersión son frecuentemente asociadas, pues ambos procesos remueven energía de la radiación incidente, y esa atenuación es llamada de extinción. En

muchos modelos atmosféricos es definido el coeficiente de extinción β , generalmente en cm^{-1} , que determina la cantidad de energía perdida por absorción y dispersión.

La Figura 3 abajo muestra el espectro solar en el topo de la atmosfera y en la superficie para un ángulo cenital de 60° en condiciones de cielo despejado (Liou, 2002).

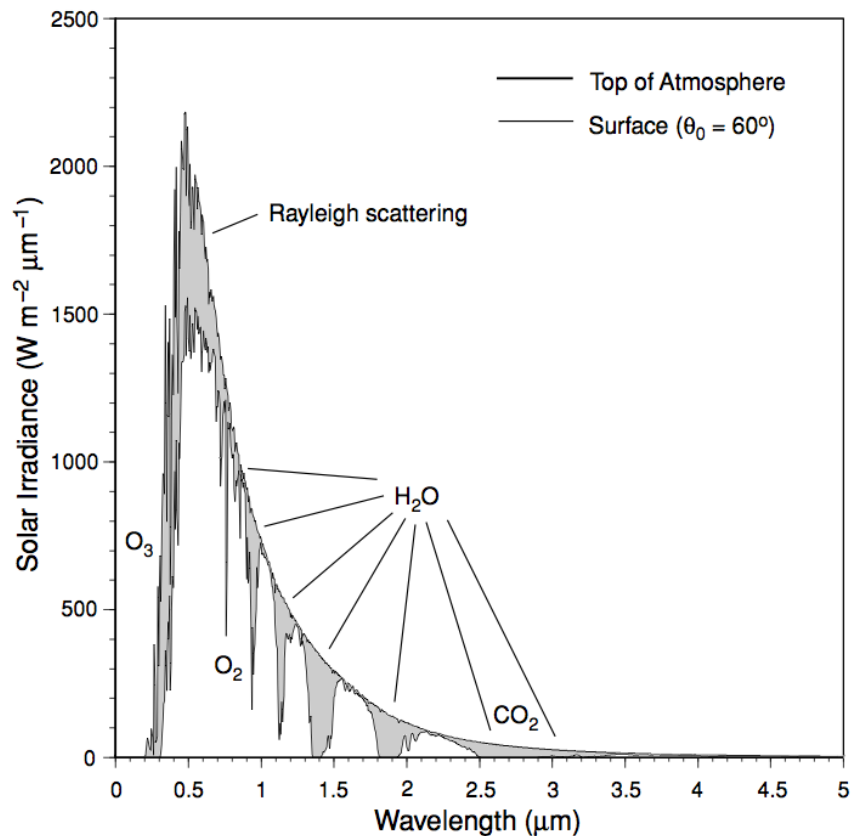


Figura 3. Espectro Solar en el topo de la Atmosfera y en la Superficie.

Hay varios estudios y modelos de parametrización de la absorción y dispersión de las moléculas. En su estudio, Gasteiger et al., (2014) muestran el modelo *reptran* de banda de parametrización. Este modelo usa el promedio ponderado de algunas longitudes de ondas representativas del espectro solar para ese cálculo.

El albedo es definido como la proporción de la radiación reflejada entre la radiación incidente y el principal factor que define ese valor es el tipo de la superficie. Generalmente ese valor es asumido 0.2, pero puede tener valor por encima de 0.9 en

superficies cubiertas de nieve o hielo (Myer, 2013). Para ese trabajo se consideró el albedo medio 0.3 definido en el Atlas de Radiación Solar en España (Avila et al, 2012).

2.4 La influencia de las Nubes en la Radiación

No todas las nubes tienen el mismo efecto sobre irradiancia. Hay diferentes tipos de nubes con diferentes dimensiones, composición (desde gotas de agua líquida a cristales de hielo), y densidades de partículas. Esto hace que la opacidad de las nubes, es decir, la cantidad de radiación que dispersan y absorben, varía enormemente de unos tipos de nubes a otras. Además del tipo de nubes, también el porcentaje de nubes que cubren el cielo juega un papel importante. Durante las condiciones de cielo totalmente nublado solo se tiene radiación difusa, debido a la dispersión de la irradiancia solar desde la base de las nubes. También la localización de la nube en el cielo en relación a la posición del sol es de vital importancia, sobre toda para la radiación DNI.

Por lo tanto, algunos parámetros son importantes para definición de la influencia de las nubes en la radiación incidente en la superficie terrestre. Por ejemplo, su estado termodinámico (nube líquida, de hielo y mezcladas), la altura de su base (CBH, Cloud Base Height,), la altura de su tope (CTH, Cloud Top Height) su espesor geométrico (CD, Cloud Depth), la cantidad de agua líquida contenida LWC (*Liquid Water Content*), la cantidad de hielo contenida IWC (*Ice Water Content*) y el radio efectivo de las partículas.

Las nubes de partículas líquidas tienen las gotas de agua con el radio efectivo entre 5 y 50 μm , dependiendo del tipo de nube. Sin embargo, los valores más usuales están entre 5 y 15 μm , nubes de estado líquido con partículas de radio efectivo mayor que 15 μm son raras. La cantidad de agua líquida LWC está entre 0,01 – 1,0 g/m^3 con valores típicos de 0,1 g/m^3 . Esos valores no son constantes y varían a lo largo de la nube y son

mayores acerca del topo, aunque los valores estándar simplifican muchas soluciones y son muy efectivos (Kokhanovsky, 2006).

Las nubes cirro, analizadas en este trabajo, consisten principalmente en partículas de hielo. Las observaciones aéreas de la composición de las nubes cirros indican que el contenido de hielo en estas nubes está en el rango 0,001 - 0,1 g/m³, siendo los valores de 0,01 - 0,1 gm⁻³ típicos (Kokhanovsky, 2006). Los tamaños de las partículas varían de 50 a 100 µm y las formas de los cristales más usuales son columnas, *bullets*, *bullet-rosettes*, platos y las formas agregadas con varios tipos. Los movimientos verticales del aire en las nubes cirros son típicamente 0.1 - 0.2 ms⁻¹ (Kokhanovsky, 2006).

La interacción de la radiación con la nubes puede estudiarse resolviendo la ETR, aunque para ello normalmente hay que asumir un cierto número de hipótesis. En el modelo de parametrización de las nubes cirros propuesto por Fu (1996), por ejemplo, el coeficiente de extinción β que indica la parte de la irradiancia perdida es calculada en función de la cantidad de hielo contenida IWC, de la densidad del hielo ρ_h 0.9167 g/cm³ del diámetro efectivo D_{ef} del cristal de hielo por la ecuación:

$$\beta = \frac{4\sqrt{3}}{3\rho_h} \frac{IWC}{D_{ef}} \quad (5)$$

3. BASE DE DATOS DE LA UNIVERSIDAD DE JAÉN

Las medidas de nubosidad utilizadas en la presente tesina fueron adquiridas con un ceilómetro Jenoptik CHM 15k–Nimbus y una cámara de cielo Yankee TSI-880 que se encuentran instalados (Figura 4) en una azotea de un edificio de la Universidad de Jaén, en las coordenadas 37.7877°N y 3.7782°W y a una altura de 454 metros sobre el nivel del mar.



Figura 4. Estación meteorológica de la Universidad de Jaén. En la imagen: ceilómetro CHM 15k - Nimbus (izquierda) y cámara de nubes TSI-880 (derecha).

3.1 Ceilómetro

El ceilómetro Jenoptik CHM 15k–Nimbus utiliza una longitud de onda 1064 nm y proporciona observaciones sobre los perfiles de las nubes, incluyendo parámetros como CBH, CTH y CD antes definidos. Es capaz de proporcionar una descripción exacta de la ubicación de sus límites verticales, puede detectar la altura de hasta 3 capas de nubes y tiene una resolución temporal de varias muestras por minuto. Su resolución espacial es de 0,45 mrad y su rango de detección vertical se encuentra entre 5 m y 15 km. Este ceilómetro en particular es uno de los muy pocos capaces de detectar las nubes por encima de 7,5 km (Martucci et al, 2010, Boers et al., 2010) y tiene mejor resolución en el límite superior de la nube que otros instrumentos similares (Martucci et al., 2010). En las Figuras 5 y 6. Se representa el proceso que sigue el ceilómetro para detectar la altura de la nube

y su espesor. Desde el instrumento se envía hacia la atmósfera una serie de fotones, estos rebotan sobre las nubes y vuelven al sensor. La señal de vuelta es procesada para determinar los parámetros de las nubes.

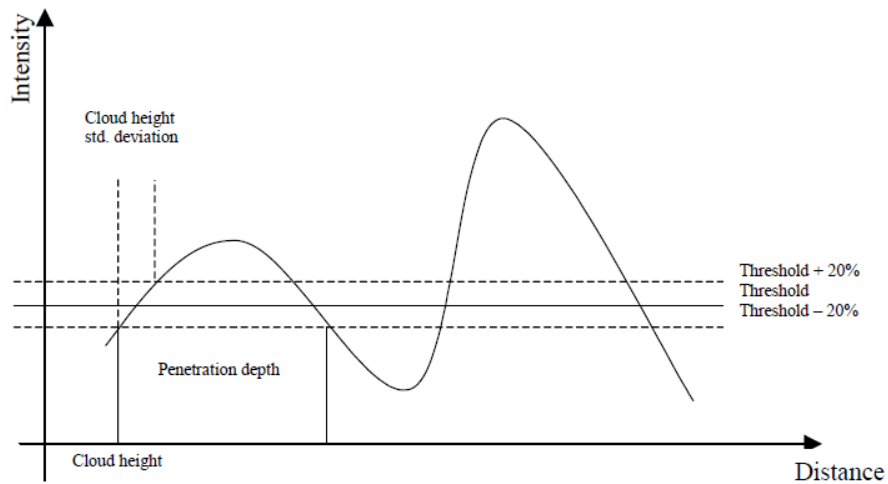


Figura 5. Esquema del método de operación del ceilómetro.

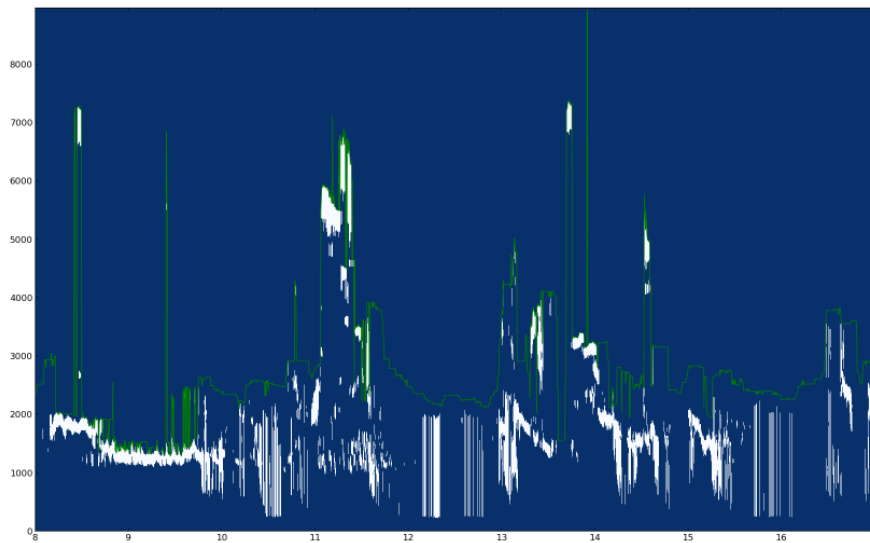


Figura 6. Salida típica del ceilómetro para un día particular.

En el eje vertical se representa la altura en metros sobre el suelo. En el eje horizontal se representa el tiempo, con una resolución de una muestra cada 15 segundos. El instrumento mide las variables de un solo punto de la atmósfera y con esta resolución temporal, la línea verde representa el promedio temporal de altura cada 5 minutos.

Los ceilómetros en general tienen un inconveniente, y es que cuando detecta una atmósfera con partículas de alta densidad cerca del instrumento, considera que está lloviendo. Aunque dentro de nuestro periodo de estudio no se ha dado esta anomalía.

3.2 Cámara nubes

La cámara de cielo YESDAS TSI-880 dispone de un dispositivo CCD con tres canales y una resolución de 480x640 píxeles, situado encima de una cúpula semiesférica de espejo en el cual se refleja el cielo. Para que el sol no produzca una saturación en la imagen, la cámara tiene una banda que cubre el punto exacto donde se sitúa el sol. La cámara TSI-880 ha sido diseñada para aplicaciones meteorológicas y se ha demostrado que es precisa a la hora de medir la cobertura y la presencia de nubes (Long et al., 2006; Kreuter et al., 2009).

En la Figura 7, aparecen 4 imágenes realizadas con la cámara de nubes en 4 situaciones en las que se dieron diferentes tipos de nubes. En la A son nubes Cirrostratos, en la B son Altocúmulos, en la C son Cumulonimbos y en la D Cúmulos.



Figura 7. Fotos realizadas con la cámara de nubes TSI-880 situada en la Universidad de Jaén.

A partir de los datos proporcionados por el ceilómetro y la cámara de nubes, miembros del equipo MATRAS de la Universidad de Jaén han llevado a cabo una clasificación supervisada de la tipología de nubes (Laka- Iñurrategi, 2013; Arbizu-Barrena 2013). En particular, se llevó a cabo una clasificación del tipo de cielo en 11 diferentes categorías: cielo despejado, cirros, cirrostratos, cirrocúmulos, altoestratos, altocúmulos, nimbostratos, estratos, estratocúmulos, cumulonimbos y cúmulos.

3.3 Datos radiación

Para medir la radiación DNI, la Universidad de Jaén cuenta con un pirheliómetro de la marca Delta-Ohmn Lp Pyrhe 16. También dispone de dos piranómetros de la misma casa que proporcionan las medidas de la GHI y DHI. Todos los instrumentos están montados sobre un seguidor solar de la marca EKO modelo Sun Tracker STR 22G (Figura 8 y 9).



Figura 8. Pirheliómetro de la marca Delta-Ohmn Lp Pyrhe 16 montado sobre un seguidor solar de la marca EKO modelo Sun Tracker STR 22G.

Estos instrumentos proporcionan la medidas de la DNI, GHI y DHI a un intervalo de muestreo de 30 segundos,. Según el World Meteorological Organization (WMO)⁷ estos instrumentos están clasificados como “Good Quality” y presenta un Bias cercano al -0,3% y una desviación estándar del 0,5% para el caso de la DNI



Figura 9. Estación meteorológica de la Universidad de Jaén.

4. DESCRIPCIÓN DEL LIBRADTRAN

4.1 Descripción general del software

En este trabajo se ha utilizado el software libRadtran que es un conjunto de herramientas para el modelado de la radiación solar y térmica en la atmósfera terrestre e incluye varios métodos para resolver la ETR (Mayer et al, 2015).

Su principal herramienta es el programa *uvspec* que se puede utilizar para calcular radiaciones, irradiancias y flujos energéticos en parte del espectro solar y terrestre. El diseño de *uvspec* permite resolver problemas sencillos usando valores por defecto y la base de datos del programa, por lo que es adecuado para fines educativos. Al mismo tiempo, la flexibilidad en cómo y cuáles parámetros pueden ser definidos lo vuelve en una herramienta potente y versátil para investigaciones (Mayer et al, 2015).

La atmósfera es descrita e incorporada en libRadtran a través de sus principales componentes: agua, aerosoles, caracterización de las nubes, dispersión de Rayleigh y absorción por las moléculas. El modelo es muy flexible ya que permite al usuario especificar valores estándar para las propiedades atmosféricas desconocidas. El usuario puede proporcionar perfiles de propiedades micro física u ópticas. El modelo de transferencia radiativa *uvspec* tiene básicamente tres partes (Castelli, 2015):

1. Un módulo atmosférico para conversión de información atmosférica, en propiedades ópticas, como los perfiles de gases y aerosoles, agua precipitable, espesor de la columna de ozono, presión de superficie, perfil de temperatura.
2. El *solver* de la ecuación de transferencia radiativa, que explota el método de la ordenada discreta de cálculo de la transferencia radiativa, irradiancias y flujos energéticos para las propiedades ópticas anteriormente definidas;
3. Una unidad de procesamiento posterior que elabora modelo de salida según las necesidades del usuario.

El programa uvspec es llamado por la línea de comando:

uvspec < input file > output file

donde el input_file es un archivo ASCII de forma libre que contiene opciones y parámetros definidos por el usuario.

Una descripción completa de todos los parámetros puede ser encontrada en el “*libRadtran user’s guide*” (Mayer et al, 2015). En la Figura 10 se puede ver la estructura del programa:

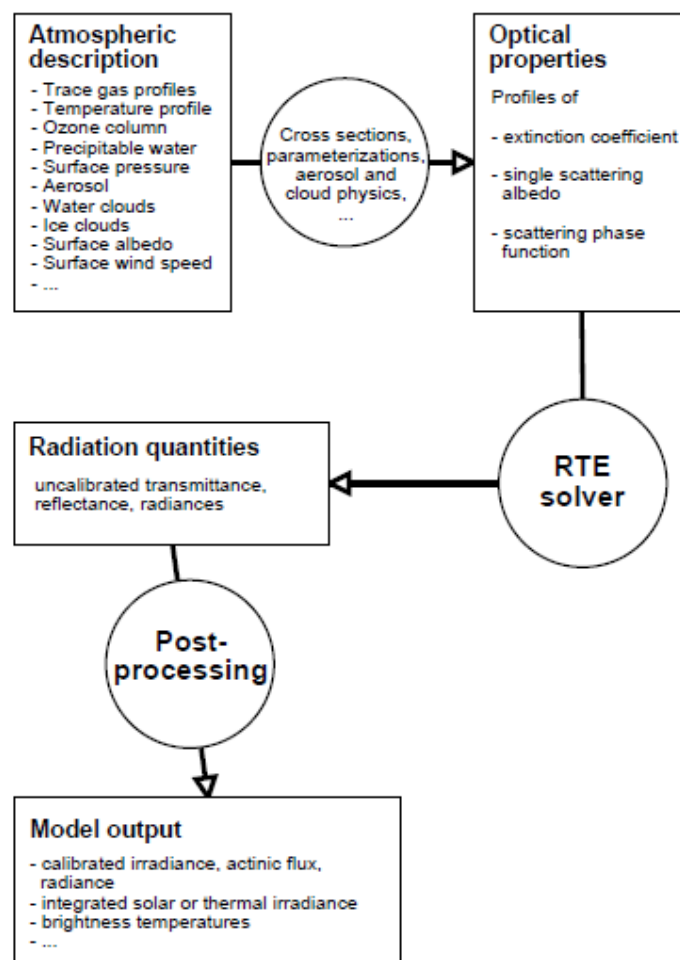


Figura 10. Estructura del Modelo uvspec

El *uvspec* incluye también diferentes métodos de cálculo para la ecuación de transferencia radiativa, dando al usuario la posibilidad de utilizar el más adecuado para la aplicación específica. En ese trabajo se utilizó el modelo estándar DISORT de ordenadas discretas para el cálculo de la transferencia radiativa.

Inicialmente el programa trabajaba con el espectro de irradiancia ultravioleta y luz visible. Sin embargo, con su desarrollo a lo largo del tiempo, su rango de aplicación fue extendido para todo el espectro solar visible y térmico.

Hay cinco maneras posibles para definición de la resolución espectral con la parametrización de la absorción molecular (Mayer et al, 2015):

1. *Spectrally resolved calculation* son aplicables en la parte ultravioleta del espectro visible, donde la absorción de gases ocurre generalmente en amplias bandas. La irradiancia extraterrestre, altamente variable con longitud de onda, es considerada en alta resolución e interpolada a la resolución moderada que se utiliza para calcular la transmisión atmosférica (0,5 nm por debajo de 350 nm y 1 nm por arriba de 350 nm). Finalmente, los dos espectros se multiplican;
2. *Line-by-line calculation*. El método de cálculo de línea por línea es la modalidad más precisa y requiere mucho tiempo. Puede ser utilizado en líneas estrechas de los espectros de absorción moleculares en la región infrarroja;
3. *Correlated-k method*. El método de correlación-k se basa en agrupar los coeficientes de absorción gaseosa k. Puesto que estos coeficientes asumen el mismo valor varias veces sobre un intervalo espectral, los cálculos se realizan una sola vez para un valor dado de k, así se reduce el tiempo de computación. Las longitudes de onda son agrupadas en bandas de parametrización y la salida *output* es integrado en cada banda;
4. *Representative Wavelength Approach*. También llamado de REPTRAN y definido en Buehler et al. (2010) and Gasteiger et al. (2014)., ese es el modelo de aproximación espectral estándar usado por *uvspec* y usado en ese trabajo. En ese método se hace la suma ponderada en la banda de longitud de onda seleccionada calculando en algunas longitudes de onda representativas.

5. *Pseudo-spectral method*. El método pseudo-espectral ha sido incorporado por el modelo de transferencia radiativa SBDART (Ricchiazzi et al., 1998). Permite el cálculo de la radiación a cualquier longitud de onda, pero la absorción de los gases es parametrizada con una resolución limitada.

En cuanto a su capacidad para representar nubes, el software libRadtran ofrece diversas variables y modelos de parametrización para simular los diferentes tipos de nubes. Todas las opciones para definir las propiedades de las nubes de contenido líquido empiezan con *wc_* mientras de las nubes de hielo comienzan con *ic_*.

La manera más sencilla para definir las propiedades microscópica de una nube líquida es específica: un archivo *wc_file* que define la altitud de la camada de nube (km), la cantidad de agua líquida contenida en la nube LWC (g/m^3) y el radio efectivo R_{eff} (μm) de la gota para cada camada de nube. Al combinar con el modelo de cielo despejado, se construye el input necesario para la simulación del modelo con nubes líquidas.

Para conversión de esos parámetros microscópicos en las respectivas propiedades ópticas (coeficiente de extinción, albedo de dispersión y parámetros de asimetría), el libRadtran incluye tres tipos de parametrización disponibles que están resumidas en la Tabla 1 (Emde et al, 2016). El más utilizado es el estándar *hu* definido en Hu y Stamnes (1993).

La manera sencilla de definición de las propiedades para nubes de hielo es prácticamente igual a de las nubes líquidas, pero en vez del LWC se define la cantidad de hielo contenido en la nube IWC (g/m^3). Para conversión de los parámetros microscópicos en propiedades ópticas geométricas se usa otros modelos de parametrización que están resumidos en la Tabla 2 (Emde et al, 2016). El tipo de parametrización más utilizado es el estándar *Fu* definido en Fu (1996) y Fu (1998)

Tabla 1. Parametrizaciones de Nubes Liquidas en libRadtran

Nombre	Descripción	Aplicación	Referencias
Hu	Configuración Estándar. Parametrización Simple, usa la función de fase Henyey-Greenstein para aproximar la función de fase Mie.	Irradiancia; Flujos de Calentamiento	Hu y Stamnes (1993)
echam4	Parametrización de dos bandas muy sencilla del modelo climático ECHAM4	Comparación de irradiancias con los resultados ECHAM4	Roegner et al (1996)
Mie	Propiedades ópticas calculadas usando la teoría de Mie que incluye todas las matrices de fase.	Radiaciones Polarizadas	Generado usando Mie Code por Wiscombe (1980)

Tabla 2. Parametrizaciones de Nubes de Hielo en libRadtran

Nombre	Descripción	Aplicación	Referencias
Fu	Configuración Estándar. Parametrización Simple, usa la función de fase Henyey-Greenstein	Irradiancia; Flujos de Calentamiento	Fu (1996); Fu et al (1998)
echam4	Parametrización de dos bandas muy sencilla del modelo climático ECHAM4	Comparación de irradiancias con los resultados ECHAM4	Roegner et al (1996)
Key	Parametrización usando usa la función de fase doble Henyey-Greenstein, cubre las longitudes de onda entre 0.2 y 5 μm . Disponible para varias formas de cristales.	Irradiancia; Flujos de Calentamiento	Key et al. (2002), Yang et al. (2005)
baum	Propiedades ópticas para aglomerados incluyendo la función de fase para una real mezcla de formas de cristales. Cubre las longitudes de ondas entre 0.4 y 2.2 μm y de 3.1 a 100 μm .	Radiancias	Baum et al. (2005a, b)
baum_v36	Propiedades ópticas para aglomerados incluyendo matrices de fase para tres modelos microscópicos: mistura de formas general, columnas sólidas y agregados espesos. Todos los modelos incluyen variedades de partículas espesas. Cubre las longitudes de ondas entre 0.2 y 99 μm	Radiancias polarizadas	Heymsfield et al. (2013); Yang et al. (2013); Baum et al. (2014)
hey	Propiedades ópticas para aglomerados incluyendo matrices de fase basadas en cálculos de dispersiones únicas para cristales lisos. Cubre las longitudes de ondas entre 0.2 y 5 μm , incluye 6 formas de cristal y la mezcla de formas.	Radiancias polarizadas	Propiedades de dispersión por Hong Gang usando el código de Yang et al. (2013).
yang2013	Propiedades ópticas para aglomerados incluyendo matrices de para 9 formas de cristales y tres niveles de aspereza. Cubre las longitudes de ondas entre 0.2 y 99 μm .	Radiancias polarizadas	Yang et al. (2013).

4.2 Parametrización del Modelo de Cielo Despejado

Un modelo de cielo despejado trata de estimar la radiación solar que se recibiría en la superficie terrestre sin la presencia de nubes. En ese trabajo, hemos evaluado el programa libRadtran como modelo de cielo despejado. En particular, se ha evaluado la bondad de este modelo para estimar la radiación incidente de cielo despejado sobre la estación meteorológica de la Universidad de Jaén, donde se tiene las medidas de radiación usadas como verdad de tierra. Para el modelo, fueran definidos los parámetros de *input* en esa respectiva orden:

- *number_of_streams*: ese parámetro define el número de arroyos usados para el cálculo de la ecuación de transferencia radioactiva. Se usan 6, la cantidad por defecto para cálculo de flujos.
- *output_user*: ese parámetro define la forma de salida de acuerdo con la aplicación. En ese trabajo se definió en orden el *sza* (ángulo cenital solar), *lambda* (longitud de onda), *edir* (irradiancia horizontal directa) y *edn* (irradiancia difusa descendente).
- *day_of_year*: es definido por el día juliano del año para corregir la radiación calculada con la correcta distancia Sol-Tierra. Ese parámetro varía a cada simulación.
- *sza*: Ese parámetro define el ángulo solar cenital que es el complementario de la altura solar que mide la altura del Sol respecto a un plano horizontal con el observador. Ese ángulo depende del día juliano y de la hora, es calculado según la ecuación (4) y varía con cada simulación.
- *atmosphere_file*: Ese parámetro elige un perfil de composición atmosférica. El modelo usado en ese trabajo es el “midlatitud_summer” de Anderson et al. (1986) que es definido por varias líneas de altura, presión

y temperatura, seguidos de los principales componentes con sus respectivas concentraciones. En la Figura 11 se puede observar una parte del estándar utilizado.

# AFGL atmospheric constituent profile. midlatitude summer. (AFGL-TR-86-0110)									
#	z(km)	p(mb)	T(K)	air(cm-3)	o3(cm-3)	o2(cm-3)	h2o(cm-3)	co2(cm-3)	no2(cm-3)
	120.000	0.00002	380.000	4.326673E+11	2.165000E+02	3.139250E+10	8.660000E+04	1.515500E+07	6.538300E+01
	115.000	0.00004	316.800	8.139105E+11	4.072500E+03	7.656301E+10	1.954800E+05	3.258000E+07	1.262475E+02
	110.000	0.00006	262.400	1.686511E+12	8.440001E+04	2.025600E+11	4.726400E+05	1.012800E+08	2.683920E+02
	105.000	0.00012	222.200	3.813762E+12	7.632000E+05	5.342400E+11	1.297440E+06	4.197600E+08	6.258240E+02
	100.000	0.00026	190.500	9.809267E+12	3.926400E+06	1.570560E+12	3.926400E+06	1.914120E+09	1.668720E+03
	95.000	0.00062	178.300	2.538870E+13	1.778700E+07	4.573800E+12	1.372140E+07	6.860700E+09	4.472160E+03
	90.000	0.00164	165.000	7.198993E+13	5.403000E+07	1.368760E+13	6.123400E+07	2.233240E+10	1.318332E+04
	85.000	0.00448	165.100	1.965363E+14	1.121190E+08	3.934000E+13	2.616110E+08	6.294400E+10	3.776640E+04

Figura 11. Modelo Atmosférico midlatitud_summer.

- *source solar*: En ese comando se define el espectro extraterrestre. El espectro utilizado “NewGuey2003” es uno de los más amplio y está definido por Gueymard et al. (2003). En ese archivo, en la primera columna se tiene la longitud de onda en nm y, en la segunda columna, su respectiva Irradiancia en mW, de tal manera que la suma de todas las irradiancias es la constata solar 1366.1 W/m².
- *mol_abs_param*: esa opción define la parametrización de la absorción por las moléculas. Como visto anteriormente en la definición de la resolución espectral, se usa el método REPTRAN de parametrización.
- *quiet*: ese parámetro es definido para ahorrar tiempo de procesamiento pues los mensajes informativos y cálculos intermediarios son silenciados.
- *wavelength (wavelength lambda_min lambda_max)*: Ese parámetro define la banda de longitudes de onda. En ese caso se ha definido la banda de operación del pirheliómetro entre 305 y 2800 nm.
- *albedo*: Ese parámetro define la máxima reflectancia de la radiación por la atmósfera Para ese trabajo se consideró el albedo medio 0.3 definido en el Atlas de Radiación Solar en España (AVILA et al, 2012).

- *rte_solver*: en ese parámetro se define el tipo de *solver* para el cálculo de la transferencia radiativa. Se usó en ese trabajo el estándar DISORT (DIScrete ORdinate Radiative Transfer Solvers), el método de cálculo por ordenadas discretas en geometría 1-D desarrollado por Stamnes et al. (1988, 2000) que según Mayer et al (2015) es el más versátil, bien testado y más usado calculador de transferencia radiativa en 1D de ese planeta.

4.3 Parametrización de las Nubes Cirros.

Para la simulación de las nubes cirros, además de la parametrización del modelo de cielo despejado, un archivo *ic_file* es creado para cada simulación independiente y se define también el parámetro *ic_properties*. Para el modelo, fueron definidos los parámetros de *input* en ese respectivo orden:

- *number_of_streams*: Se usa 6, la cantidad por defecto para cálculo de flujos.
- *output_user*: ese parámetro define la forma de salida de acuerdo con la aplicación. En ese trabajo se definió en orden el *sza* (ángulo cenital solar), *lambda* (longitud de onda), *edir* (irradiancia horizontal directa) y *edn* (irradiancia difusa descendente).
- *ic_file*: en ese parámetro se define el camino del archivo que define las características de las nubes cirros obtenidas de la base de datos de la Universidad de Jaén. La altitud inicial de la camada de nube (km) es especificada con el valor de CBH y con el valor CTH se define la altitud final. Se define también la cantidad de hielo contenido en la nube IWC (g/m^3) y el radio efectivo R_{eff} (μm) de la partícula para camada de nube. En ese trabajo se ha hecho algunas pruebas con la combinación de valores

promedios IWC y R_{eff} definidos en (KOKHANOVSKY 2006) y (HOUZE 2013).

- *ic_properties*: se define el modelo de parametrización para conversión de los parámetros microscópicos en propiedades ópticas geométricas. Se usa el estándar Fu. Además, se añade un argumento opcional *interpolate* para interpolar las propiedades ópticas geométricas de la nube a lo largo de las longitudes de ondas.
- *day_of_year*: es definido por el día juliano del año para corregir la radiación calculada con la correcta distancia Sol-Tierra. Ese parámetro varía a cada simulación.
- *sza*: Ese parámetro define el ángulo solar cenital que es el complementario de la altura solar que mide la altura del sol respecto a un plano horizontal con el observador. Ese ángulo depende del día juliano y de la hora, es calculado según la ecuación (4) y varía a cada simulación.
- *atmosphere_file*: Ese parámetro elige un perfil de composición atmosférica. El modelo usado en ese trabajo es el “midlatitude_summer” de Anderson et al. (1986) que se define por varias líneas de altura, presión y temperatura, seguidos de los principales componentes con sus respectivas concentraciones.
- *source solar*: En ese comando se define el espectro extraterrestre. El espectro utilizado “NewGuey2003” es uno de los más amplios y está definido por Gueymard (2003). En ese archivo, en la primera columna se tiene la longitud de onda en nm y, en la segunda columna, su respectiva Irradiancia en mW, de tal manera que la suma de todas las irradiancias es la constante solar 1366.1 W/m^2 .

- *mol_abs_param*: esa opción define la parametrización de la absorción por las moléculas. Como visto anteriormente en la definición de la resolución espectral, se usa el método REPTRAN de parametrización.
- *quiet*: ese parámetro es definido para ahorrar tiempo de procesamiento pues los mensajes informativos y cálculos intermediarios son silenciados.
- *wavelength* (*wavelength lambda_min lambda_max*): Ese parámetro define la banda de longitudes de onda. En ese caso se ha definido la banda de operación del pirheliómetro entre 305 y 2800 nm.
- *albedo*: Ese parámetro define la máxima reflectancia de la radiación por la atmósfera. Para ese trabajo se consideró el albedo medio 0.3 definido en el Atlas de Radiación Solar en España (Avila et al, 2012).
- *rte_solver*: en ese parámetro se define el tipo de *solver* para el cálculo de la transferencia radiativa. Se usó en ese trabajo el estándar DISORT (DIScrete ORdinate Radiative Transfer Solvers).

5. METODOLOGIA

La evaluación se ha llevado a cabo sobre un total de 972 muestras (periodos de 5 minutos), correspondientes a sendas imágenes tomadas por la cámara de nubes. En estos periodos se obtuvieron también los valores de radiación GHI, DHI y DNI, así como los valores de CBH and CTH derivados del ceilómetro. Las muestras corresponden a 42 días del periodo comprendido entre el 20/09/2013 y el 01/11/2013. Estos días fueron escogidos de forma que abarcaran diversas situaciones meteorológicas.

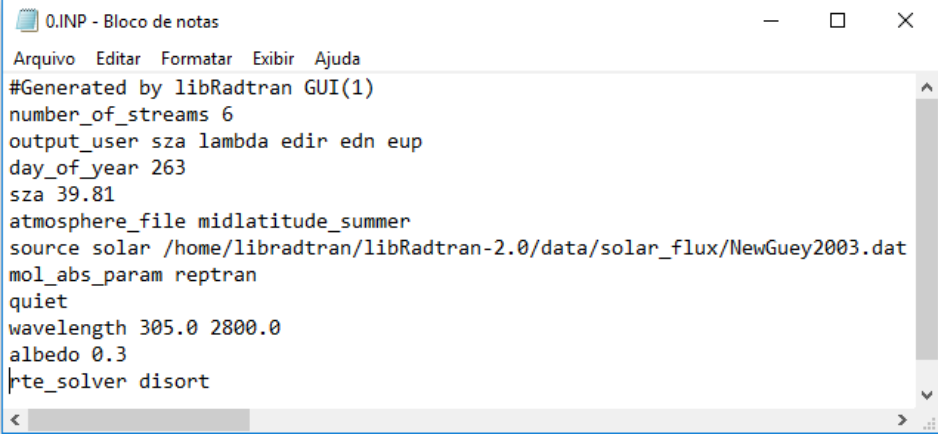
Primero se llevó a cabo un procesado de todos los datos disponibles, con la eliminación de los que no interesan. Se obtuvieron 77 muestras de condiciones de cielo despejado y 177 muestras clasificadas con la presencia de nubes tipo cirro. A partir de esos datos se generaron los inputs y archivos para las simulaciones en el libRadtran.

5.1 Generación de los INPUTS Cielo Despejado

Se ha desarrollado el siguiente programa en C para generar los 77 inputs referentes a los datos de cielo despejado.

```
[*] generadordeinputs.c
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <stdio.h>
4  #include <string.h>
5
6  int main()
7  {
8      FILE *fp;
9      int DIM = 77;
10     float matriz[77][3] = { {1,263,39.81}, {2,263,39.39}, {3,263,38.99}, {4,263,38.63}, {5,263,38.
11     int linha, coluna;
12     char txt[5] = ".INP";
13     char snun[2];
14     int i;
15     char filename[70];
16
17     for(i = 0; i <= DIM; i++){
18         sprintf(filename, "%i", i);
19         strcat (filename,txt);
20         fp = fopen (filename, "w");
21         fprintf (fp, "#Generated by libRadtran GUI(1)");
22         fprintf (fp, "\n\n");
23         fprintf (fp, "number_of_streams 6 \n");
24         fprintf (fp, "output_user sza lambda edir edn eup \n");
25         fprintf (fp, "mol_modify o3 300.0 du \n");
26         linha=i;
27         fprintf (fp, "day_of_year %.0f", matriz[linha][1]);
28         fprintf (fp, "\n");
29         fprintf (fp, "sza %.2f", matriz[linha][2]);
30         fprintf (fp, "\n");
31         printf("%.2f ", matriz[linha][1]);
32         printf("%.2f ", matriz[linha][2]);
33         printf("\n");
34         fprintf (fp, "atmosphere_file midlatitude_summer");
35         fprintf (fp, "\n");
36         fprintf (fp, "source solar /home/libradtran/libRadtran-2.0/data/solar_flux/NewGuey2003.dat");
37         fprintf (fp, "\n");
38         fprintf (fp, "mol_abs_param sbdart");
39         fprintf (fp, "\n");
40         fprintf (fp, "quiet");
41         fprintf (fp, "\n");
42         fprintf (fp, "wavelength 305.0 2800.0");
43         fprintf (fp, "\n");
44         fprintf (fp, "albedo 0.3");
45         fprintf (fp, "\n");
46         fprintf (fp, "rte_solver disort");
47         fprintf (fp, "\n");
48         fclose (fp);
49     }
50     return 0;
51 }
```

Se generó previamente, con el *Microsoft Excel*, una matriz de tres columnas con los datos que varían: el número de la simulación (entre 1 y 77), el día del año y el ángulo cenital. Los datos definidos en la sección 4.2 *Parametrización del Modelo de Cielo Despejado* se insertó y en el final, el programa genera 77 archivos inputs con extensión .INP. La Figura 12 siguiente enseña un ejemplo de archivo generado.



```

0.INP - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
#Generated by libRadtran GUI(1)
number_of_streams 6
output_user sza lambda edir edn eup
day_of_year 263
sza 39.81
atmosphere_file midlatitude_summer
source solar /home/libradtran/libRadtran-2.0/data/solar_flux/NewGuey2003.dat
mol_abs_param reptran
quiet
wavelength 305.0 2800.0
albedo 0.3
rte_solver disort

```

Figura 12. Ejemplo de archivo input generado para el modelo de Cielo Despejado

5.2 Generación de los Archivos de *Ice-Cloud Properties*

Antes de generar los inputs para las nubes cirros, se desarrolló el siguiente programa en C para crear los archivos *ic_file* necesarios para las 177 nubes detectadas:

```

[*] IC_FILE_GEN.c
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <string.h>
4  #include <math.h>
5
6  int main()
7  {
8      FILE *fp;
9      int DIM = 177;
10     float matriz[177][3] = { {0.09.021,10.402},{1.08.992,10.516},{2.09.166,10.618},{3.09.287,10.618} };
11     int linha, coluna;
12     char txt[5] = ".DAT";
13     char snum[2];
14     int i;
15     char filename[70];
16     float LWC;
17     int Re;
18     LWC = 0.001;
19     Re = 25;
20
21     for(i = 0 ; i <= DIM ; i++){
22         sprintf(filename, "IC%i", i);
23         strcat (filename,txt);
24         fp = fopen (filename, "w");
25
26         fprintf (fp, "#          z          IWC          R_eff");
27         fprintf (fp, "\n");
28         fprintf (fp, "#          (km) (g/m^3) (um)");
29         fprintf (fp, "\n");
30         //fprintf (fp, "          11.000  0.000  0  ");
31         //fprintf (fp, "          09.636  0.005  25  ");
32
33         linha=i;
34         fprintf (fp, "          %.3f  0.000  0  ",matriz[linha][2]);
35         fprintf (fp, "\n");
36         fprintf (fp, "          %.3f  %0.3f  %d  ", matriz[linha][1],LWC,Re);
37         fprintf (fp, "\n");
38
39         printf("%.2f ", matriz[linha][1]);
40         printf("%.2f ", matriz[linha][2]);
41         printf("\n");
42
43         fclose (fp);
44     }
45
46     return 0;
47 }

```

Se generó previamente, con el *Microsoft Excel*, una matriz de tres columnas con los datos que varían para cada nube: el número de la simulación (entre 1 y 177), la altitud inicial y la altitud final. En ese trabajo se han hecho 4 pruebas con la combinación de valores promedios de IWC y Reff como se planteó anteriormente. Los valores de las distintas pruebas, que de aquí en adelante nombraremos como Cirros 1, 2, 3 y 4, están en la Tabla 3:

Tabla 3. Parametrizaciones de Nubes Cirros en libRadtran

Prueba	IWC (g/m ³)	Reff (μm)
Cirros1	0,01	25
Cirros2	0,001	25
Cirros3	0,01	32.5
Cirros4	0,001	32.5

Al final, el programa genera 177 archivos inputs con extensión .DAT para cada una de las pruebas. La Figura 13 siguiente enseña un ejemplo de archivo generado para la Cirros4

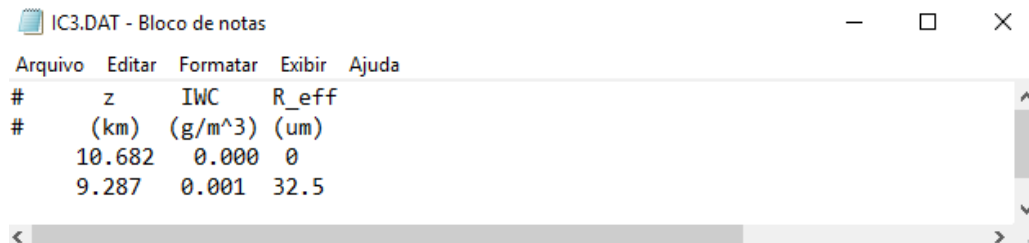


Figura 13. Ejemplo de archivo .DAT generado para caracterización de las nubes cirros.

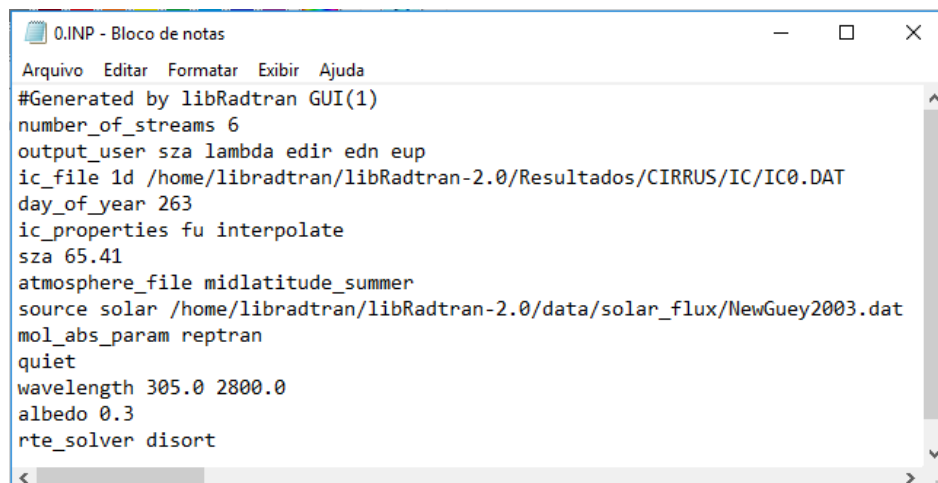
5.3 Generación de los INPUTS para el Modelo con Nubes Cirros

De forma similar al procedimiento seguido con las muestras de cielo despejado, se ha desarrollado el siguiente programa en C para generar los 177 inputs referentes a los datos del modelo para las muestras de nubes cirros.

También, se generó previamente, con el *Microsoft Excel*, una matriz de tres columnas con los datos que varían: el número de la simulación (entre 0 y 176), el día del año y el ángulo cenital. Los datos definidos en la sección 4.3 *Parametrización de las*

Nubes Cirros fueron insertados y en el final, el programa genera 177 inputs con extensión .INP para cada una de las pruebas. La Figura 14 enseña un ejemplo de archivo generado.

```
[*] generadorinputsnubes.c
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <stdio.h>
4  #include <string.h>
5
6  int main()
7  {
8      FILE *fp;
9      int DIM = 177;
10     float matriz[177][3] = { {0,263,65.41}, {1,263,64.47}, {2,263,63.55}, {3,263,62.62}, {4,263,61.69}, {5,263,60.76}, {6,263,59.83}, {7,263,58.90}, {8,263,57.97}, {9,263,57.04}, {10,263,56.11}, {11,263,55.18}, {12,263,54.25}, {13,263,53.32}, {14,263,52.39}, {15,263,51.46}, {16,263,50.53}, {17,263,49.60}, {18,263,48.67}, {19,263,47.74}, {20,263,46.81}, {21,263,45.88}, {22,263,44.95}, {23,263,44.02}, {24,263,43.09}, {25,263,42.16}, {26,263,41.23}, {27,263,40.30}, {28,263,39.37}, {29,263,38.44}, {30,263,37.51}, {31,263,36.58}, {32,263,35.65}, {33,263,34.72}, {34,263,33.79}, {35,263,32.86}, {36,263,31.93}, {37,263,31.00}, {38,263,30.07}, {39,263,29.14}, {40,263,28.21}, {41,263,27.28}, {42,263,26.35}, {43,263,25.42}, {44,263,24.49}, {45,263,23.56}, {46,263,22.63}, {47,263,21.70}, {48,263,20.77}, {49,263,19.84}, {50,263,18.91}, {51,263,17.98}, {52,263,17.05}, {53,263,16.12}, {54,263,15.19}, {55,263,14.26}, {56,263,13.33}, {57,263,12.40}, {58,263,11.47}, {59,263,10.54}, {60,263,9.61}, {61,263,8.68}, {62,263,7.75}, {63,263,6.82}, {64,263,5.89}, {65,263,4.96}, {66,263,4.03}, {67,263,3.10}, {68,263,2.17}, {69,263,1.24}, {70,263,0.31}, {71,263,0.31}, {72,263,0.31}, {73,263,0.31}, {74,263,0.31}, {75,263,0.31}, {76,263,0.31}, {77,263,0.31}, {78,263,0.31}, {79,263,0.31}, {80,263,0.31}, {81,263,0.31}, {82,263,0.31}, {83,263,0.31}, {84,263,0.31}, {85,263,0.31}, {86,263,0.31}, {87,263,0.31}, {88,263,0.31}, {89,263,0.31}, {90,263,0.31}, {91,263,0.31}, {92,263,0.31}, {93,263,0.31}, {94,263,0.31}, {95,263,0.31}, {96,263,0.31}, {97,263,0.31}, {98,263,0.31}, {99,263,0.31}, {100,263,0.31}, {101,263,0.31}, {102,263,0.31}, {103,263,0.31}, {104,263,0.31}, {105,263,0.31}, {106,263,0.31}, {107,263,0.31}, {108,263,0.31}, {109,263,0.31}, {110,263,0.31}, {111,263,0.31}, {112,263,0.31}, {113,263,0.31}, {114,263,0.31}, {115,263,0.31}, {116,263,0.31}, {117,263,0.31}, {118,263,0.31}, {119,263,0.31}, {120,263,0.31}, {121,263,0.31}, {122,263,0.31}, {123,263,0.31}, {124,263,0.31}, {125,263,0.31}, {126,263,0.31}, {127,263,0.31}, {128,263,0.31}, {129,263,0.31}, {130,263,0.31}, {131,263,0.31}, {132,263,0.31}, {133,263,0.31}, {134,263,0.31}, {135,263,0.31}, {136,263,0.31}, {137,263,0.31}, {138,263,0.31}, {139,263,0.31}, {140,263,0.31}, {141,263,0.31}, {142,263,0.31}, {143,263,0.31}, {144,263,0.31}, {145,263,0.31}, {146,263,0.31}, {147,263,0.31}, {148,263,0.31}, {149,263,0.31}, {150,263,0.31}, {151,263,0.31}, {152,263,0.31}, {153,263,0.31}, {154,263,0.31}, {155,263,0.31}, {156,263,0.31}, {157,263,0.31}, {158,263,0.31}, {159,263,0.31}, {160,263,0.31}, {161,263,0.31}, {162,263,0.31}, {163,263,0.31}, {164,263,0.31}, {165,263,0.31}, {166,263,0.31}, {167,263,0.31}, {168,263,0.31}, {169,263,0.31}, {170,263,0.31}, {171,263,0.31}, {172,263,0.31}, {173,263,0.31}, {174,263,0.31}, {175,263,0.31}, {176,263,0.31}, {177,263,0.31} };
11     int linha, coluna;
12     char txt[5] = ".INP";
13     char snum[2];
14     int i;
15     char filename[70];
16
17     for(i = 0 ; i <= DIM ; i++){
18         sprintf(filename, "%i", i);
19         strcat (filename,txt);
20         fp = fopen (filename, "w");
21         fprintf (fp, "#Generated by libRadtran GUI(1)");
22         fprintf (fp, "\n\n");
23         fprintf (fp, "number_of_streams 6 \n");
24         fprintf (fp, "output_user sza lambda edir edn eup \n");
25         fprintf (fp, "ic_file 1d /home/libradtran/libRadtran-2.0/Resultados/CIRRUS/IC/IC%d.DAT", i);
26         fprintf (fp, "\n");
27         linha=i;
28         fprintf (fp, "day_of_year %.0f", matriz[linha][1]);
29         fprintf (fp, "\n");
30         fprintf (fp, "ic_properties fu interpolate");
31         fprintf (fp, "\n");
32         fprintf (fp, "sza %.2f", matriz[linha][2]);
33         fprintf (fp, "\n");
34         printf("%.2f ", matriz[linha][1]);
35         printf("%.2f ", matriz[linha][2]);
36         printf("\n");
37         fprintf (fp, "atmosphere_file midlatitude_summer");
38         fprintf (fp, "\n");
39         fprintf (fp, "source solar /home/libradtran/libRadtran-2.0/data/solar_flux/NewGuey2003.dat");
40         //fprintf (fp, "2.0/data/solar_flux/NewGuey2003.dat");
41         fprintf (fp, "\n");
42         fprintf (fp, "mol_abs_param reptran");
43         fprintf (fp, "\n");
44         fprintf (fp, "quiet");
45         fprintf (fp, "\n");
46         fprintf (fp, "wavelength 305.0 2800.0");
47         fprintf (fp, "\n");
48         fprintf (fp, "albedo 0.3");
49         fprintf (fp, "\n");
50         fprintf (fp, "rte_solver disort");
51         fprintf (fp, "\n");
52         fclose (fp);
53     }
54     return 0;
55 }
```



```
0.INP - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
#Generated by libRadtran GUI(1)
number_of_streams 6
output_user sza lambda edir edn eup
ic_file 1d /home/libradtran/libRadtran-2.0/Resultados/CIRRUS/IC/IC0.DAT
day_of_year 263
ic_properties fu interpolate
sza 65.41
atmosphere_file midlatitude_summer
source solar /home/libradtran/libRadtran-2.0/data/solar_flux/NewGuey2003.dat
mol_abs_param reptran
quiet
wavelength 305.0 2800.0
albedo 0.3
rte_solver disort
```

Figura 14. Ejemplo de archivo input generado para el modelo de Cielo Despejado

5.4 Programa de Múltiples Simulaciones

El libRadtran funciona ejecutando una simulación por vez. Con el objetivo de optimizar el trabajo y el tiempo, se ha desarrollado un programa en C que ejecuta el programa uvspec para el cálculo de la transferencia radiativa cuantas veces el usuario necesite, asignando los respectivos inputs y generando los correspondientes outputs.

```
[*] EXEC.c
1  #include<stdio.h>
2  #include<stdlib.h>
3  int main(){
4      system("../bin/uvspec < 0.INP > 0.txt");
5      system("../bin/uvspec < 1.INP > 1.txt");
6      system("../bin/uvspec < 2.INP > 2.txt");
7      //rellena hasta el numero n...
8      system("../bin/uvspec < n.INP > n.txt");
9      printf("FIM"); return 0;
10 }
```

5.5 Procesamiento de Datos

Para cada simulación es generado un archivo .txt con los parámetros elegidos en el *output_user*: *sza* (ángulo cenital solar), *lambda* (longitud de onda), *edir* (irradiancia horizontal directa) y *edn* (irradiancia difusa descendente). El valor total de las irradiancias se obtuvo a través de la integral de todas las radiaciones a lo largo de las longitudes de onda. La irradiancia global directa (GHI) se obtuvo con la suma de la irradiancia horizontal directa y la irradiancia difusa descendente. Por fin, la irradiancia normal directa (DNI) es la irradiancia horizontal directa (*edir*) entre el coseno del ángulo cenital (*sza*).

Para cada simulación esos valores fueran calculados y comparados con los valores reales de radiación GHI, DNI y DHI medidos

6. RESULTADOS

Esta sección muestra los resultados de la evaluación del software LibRadtran en condiciones de cielo despejado y con nubes tipo cirro. La evaluación se llevó a cabo comparando las estimaciones del modelo con las medidas de las irradiancias obtenidas en la estación meteorológica de la Universidad de Jaén. La evaluación se ha llevado a cabo usando los siguientes indicadores estadísticos:

- Error Relativo (*Relative Error* RE): indica la desviación porcentual de los valores individuales de cada simulación relativos a los medidos experimentalmente.

$$RE = \frac{|x_i - y_i|}{y_i} \quad (6)$$

- Coeficiente de Correlación (r): la correlación mide la dependencia de una variable con respecto a otra variable independiente y es calculada por la ecuación:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i * \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \quad (7)$$

- Error Medio Absoluto (*mean absolute error* MAE): es un indicador de la desviación media entre los valores absolutos simulados y medidos.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (8)$$

- Error Medio Absoluto Normalizado (*normalized mean absolute error* nMAE): es un indicador de la desviación entre los valores simulados y medidos normalizados con relación a los valores medidos.

$$nMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{\sum_{i=1}^n (y_i)} \quad (9)$$

- Raíz del Error Cuadrático Medio (*root mean square error* RMSE): el RMSE es un buen indicador porque se analiza la varianza y el sesgo de los resultados al calcular la raíz del promedio de los errores al cuadrado por la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

- Raíz del Error Cuadrático Medio Relativa (*relative root mean square error* rRMSE): enseña la raíz del error cuadrático medio relativa al promedio de los valores medidos:

$$rRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}}{\bar{y}}$$

Donde n es el número de entradas, x hace referencia a los valores simulados e y a los valores medidos experimentalmente.

6.1 Cielo Despejado

La Figura 15 muestra la comparación entre la GHI, DNI y DHI simuladas usando el software libRadtran y los valores correspondientes medidos en la estación meteorología de la Universidad de Jaén.

Como se ha comentado anteriormente, la evaluación de cielo despejado se ha llevado a cabo sobre 77 muestras de un total de 972. La Tabla 4 muestra los indicadores estadísticos de esas medidas.

Tabla 4. Indicadores Estadísticos Para Cielo Despejado

Indicadores	GHI	DNI	DHI
Correlación r (%)	98.33%	73.69%	56.86%
MAE (W/m ²)	36.95	151.72	42.24
nMAE (%)	6.33%	20.48%	36.14%
RMSE (W/m ²)	48.05	165.01	62.57
rRMSE (%)	8.23%	22.27%	53.52%

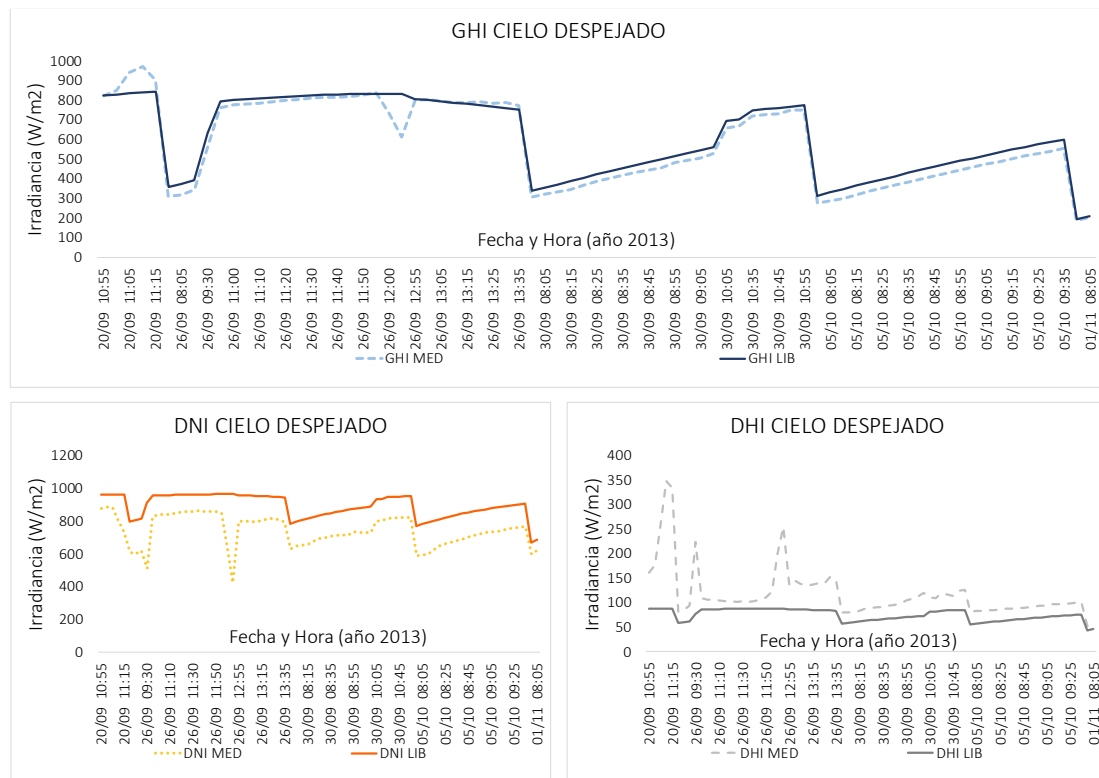


Figura 15. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para Cielo Despejado

Se observa en los gráficos que los valores de la GHI simulados se asemejan fuertemente con los valores medidos, con algunos picos de errores. Eso se comprueba con los indicadores que muestran una correlación de 98,33%, nMAE de 6,33% y rRMSE de 9.06%. La DNI simulada presenta valores generalmente mayores que los medidos, sin embargo, se acercan en la tendencia e inclinación de las líneas, con una correlación de 73,69%. En contrapartida, los valores de la DHI simulada presentan los valores generalmente menores que los medidos y con una mayor diferencia de tendencia e inclinación verificadas por una correlación de 56,86%.

Para mejorar los resultados, se analizaron los resultados individuales que presentaron mayores errores. Para eso, fueron definidos los umbrales de errores RE de 20% para GHI, 50% para DNI y 50% para DHI.

Como se puede observar en la Figura 16, algunas de las medidas que fueron clasificadas erróneamente como cielo despejado en realidad presentaban nubes. A partir de este análisis, un total de 6 muestras fueron descartadas.

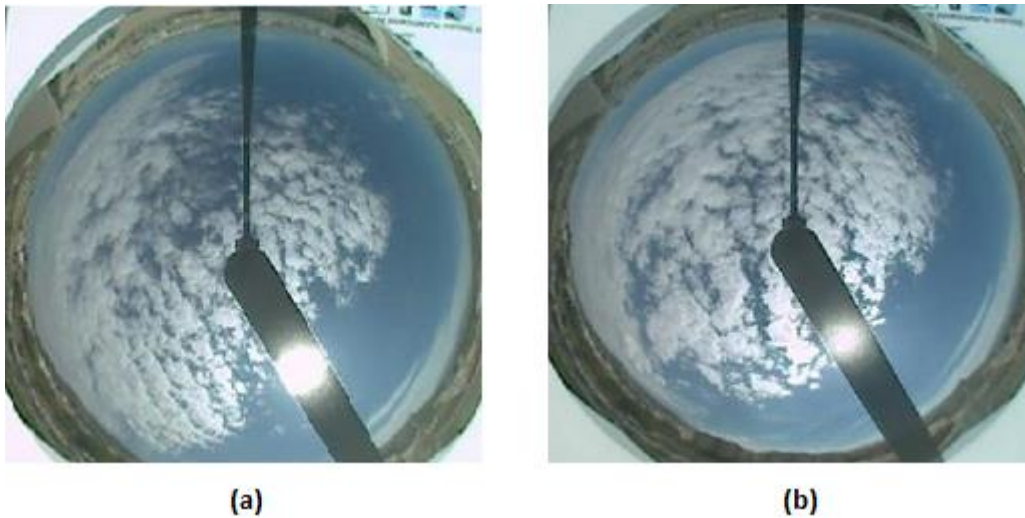


Figura 16. Ejemplo de la camera de Nubes de las medidas de mayores errores. (a) 29/09/2013 11:10 y (b) 20/09/2013 11:15

La Figura 17 muestra los nuevos resultados después del filtrado de los valores más discrepantes, la Tabla 5, los nuevos indicadores estadísticos y la Figura 18 la evolución de esos indicadores con el filtro.

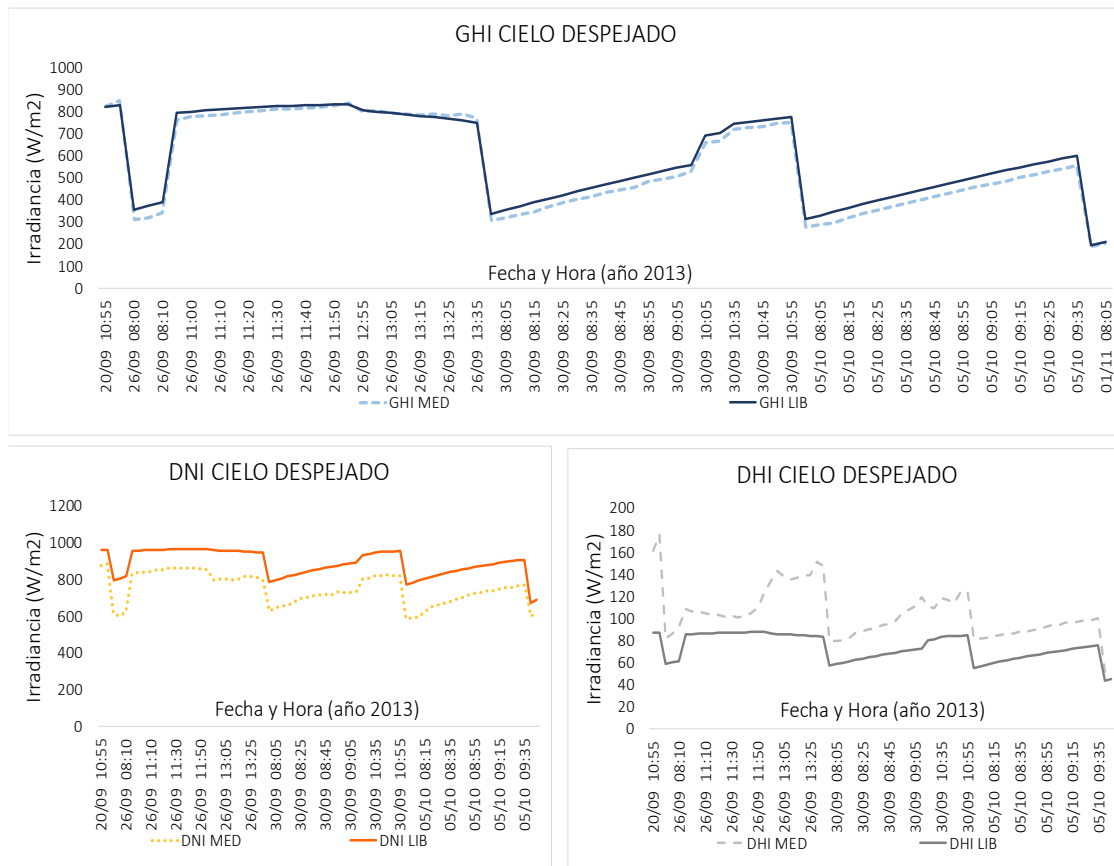


Figura 17. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para Cielo Despejado Post-Processing

Tabla 5. Indicadores Estadísticos Para Cielo Despejado Post Processing

Indicadores	GHI	DNI	DHI
Correlación r (%)	99.70%	95.28%	79.35%
MAE (W/m2)	30.29	139.97	30.27
nMAE (%)	5.35%	18.73%	29.11%
RMSE (W/m2)	33.75	142.71	33.86
rRMSE (%)	5.96%	19.09%	32.57%

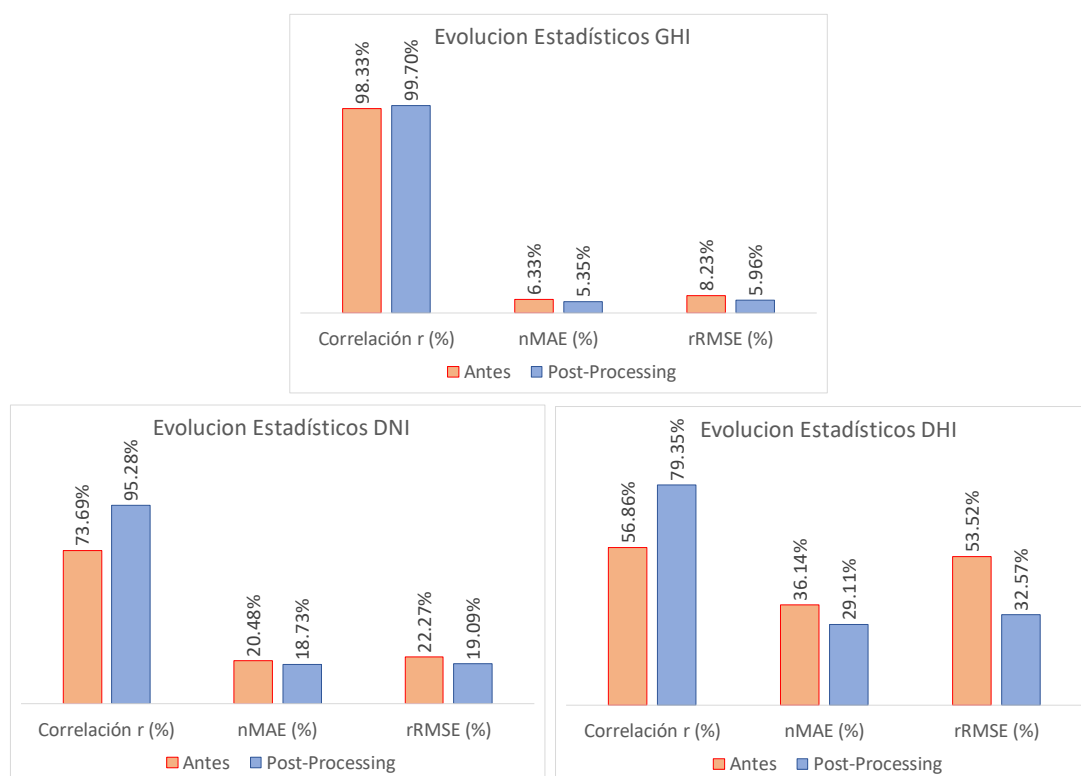


Figura 18. Evolución de los indicadores estadísticos post-processing

Se puede ver la mejora considerable de los resultados, con el incremento de la correlación y disminución de todos los errores. La Figura 17 claramente muestra que los resultados de la simulación se asemejan más de los medidos, con una correlación de 99,70% de la GHI, los errores nMAE y rRMSE son más bajos, un 5,35% y un 5.96% respectivamente. Sin embargo, los resultados de la DNI y DHI, aunque tenga una buena correlación, presentan valores de nMAE y rRMSE todavía considerablemente elevados.

La Figura 19 siguiente muestra la distribución porcentual de las medidas con relación a los errores RE.

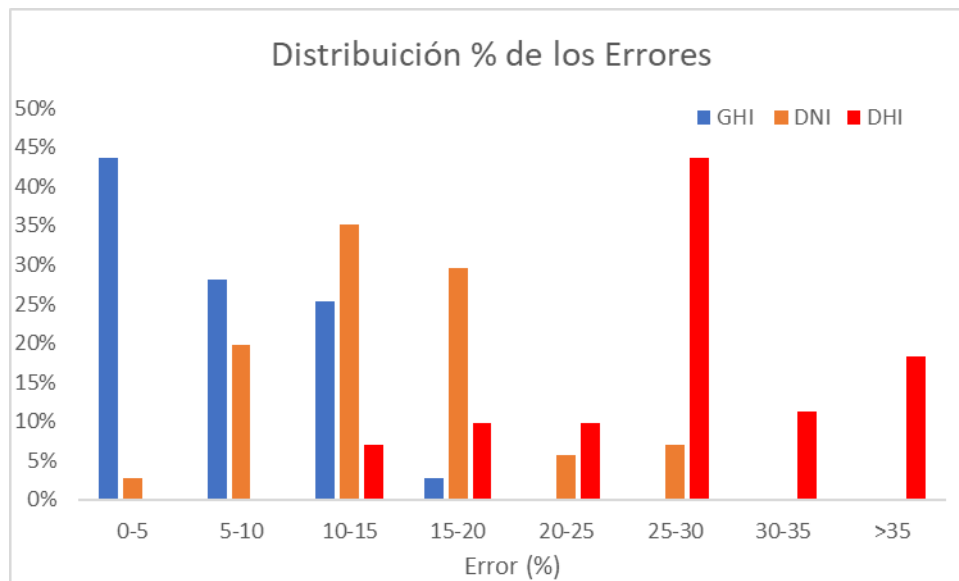


Figura 19. Distribución porcentual de las medidas de acuerdo con los errores RE

De hecho, solamente 3% de las simulaciones presentaron errores RE mayores que 15% de la GHI. Sin embargo, 13% presentaron RE mayores que 20% de la DNI y 75% presentaron RE mayores que 25% de la DHI.

Se puede percibir al analizar la Figura 17 que los valores de la DNI simulados están por encima de los valores medidos, mientras los valores de la DHI teóricos están por debajo de los reales. Esta claramente indica que la cantidad de aerosoles que considera el modelo de cielo despejado en el LibRadtran es demasiado pequeña. Por lo tanto, se ha hecho otra propuesta de mejoría de los resultados con el incremento del coeficiente de extinción β que supuestamente disminuirá la DNI e incrementará la DHI manteniendo casi que constante la GHI.

6.1.1 Propuesta de mejoría de los resultados: Inserción de un “Aerosol very clear”.

Para modificar el coeficiente de extinción atmosférico β en LibRadtran, se puede cambiar los parámetros de absorción molecular y, consecuentemente, de profundidad óptica. La absorción molecular es calculada a partir de las concentraciones atmosféricas de los gases definidas en el fichero *midlatitud_summer* en el campo *atmosphere_file* y

tiene valores diferentes para cada longitud de onda, por lo tanto, es una tarea compleja de ser manoseada.

Una manera sencilla de cambiar la profundidad óptica, o sea, los coeficientes de absorción y dispersión atmosféricos, es a través de la inserción de aerosoles, aunque no haya confirmación de su presencia en los días y horas clasificadas como cielo despejado. En condiciones de ausencia de nubes, el aerosol es el principal factor que influye en la irradiancia y puede atenuar hasta 70% de la irradiancia normal directa incidente.

Como la DNI simulada presenta un rRMSE de 21,79% por encima de los valores medidos y la DHI 32,57% por debajo, fue propuesto en ese trabajo la inserción de un aerosol muy limpio que incrementase de forma suave la profundidad óptica atmosférica y así transformase parte de la DNI en DHI manteniendo el valor del GHI, que ya presenta buenos resultados.

Para definición de un aerosol “*very-clear*”, se utilizó el aerosol estándar del software libRadtran definido en Shettle (1989) con la mitad de su profundidad óptica. Las propiedades estándar son de un modelo aerosol limpio de áreas rurales con poca polución ubicados a 2 km del suelo, en condiciones atmosféricas primavera-verano y visibilidad de 50km. La profundidad óptica fue escalada en 50% del valor estándar a través de la propiedad *aerosol_modify tau scale*.

Nuevos Inputs fueron regenerados usando los mismos pasos de la sección 5.1 *Generación de los INPUTS Cielo Despejado* con la inserción de dos líneas que definen las propiedades del aerosol y los otros procedimientos metodológicos permanecieron los mismo para cielo despejado. La Figura 20 muestra un ejemplo del nuevo archivo de input generado:

```

0.INP - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
#Generated by libRadtran GUI(1)
number_of_streams 6
output_user sza lambda edir edn eup
day_of_year 263
sza 39.81
aerosol_modify tau scale 0.50
atmosphere_file midlatitude_summersource solar /home/libradtran/li
mol_abs_param reptran
quiet
wavelength 305.0 2800.0
albedo 0.3
aerosol_default
rte_solver disort

```

Figura 20. Ejemplo de archivo input generado para el modelo de Cielo Despejado con Aerosol

Los nuevos resultados de las irradiancias simuladas comparadas con las medidas en la estación meteorológica se representan en la Figura 21 siguiente.

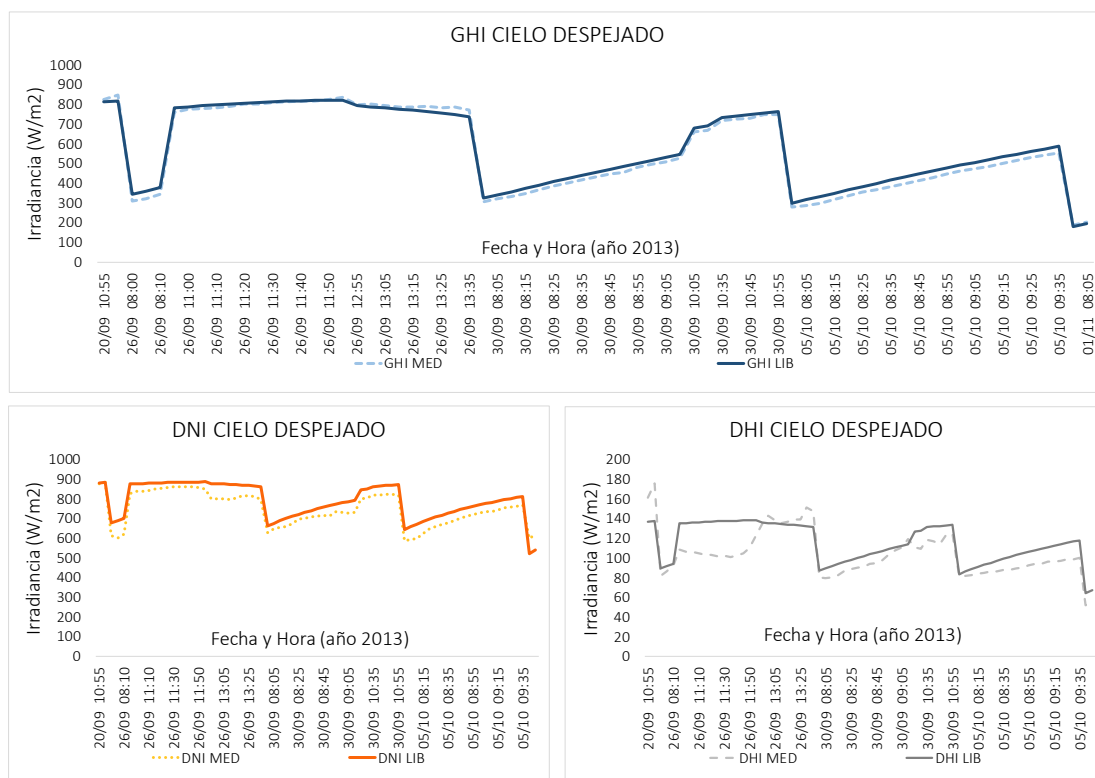


Figura 21. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para Cielo Despejado con Aerosol

La Tabla 6 muestra los nuevos indicadores estadísticos obtenidos con la propuesta de mejora.

Tabla 6. Indicadores Estadísticos Para Cielo Despejado con Aerosol Very Clear

Indicadores	GHI	DNI	DHI
Correlación r (%)	99.71%	95.40%	79.40%
MAE (W/m2)	21.82	46.12	14.53
nMAE (%)	3.85%	6.17%	13.97%
RMSE (W/m2)	24.08	49.32	17.68
rRMSE (%)	4.25%	6.60%	17.01%

Las gráficas de la Figura 22 muestran la evolución de los indicadores estadísticos cuando se aplican los cambios en la profundidad óptica atmosférica.

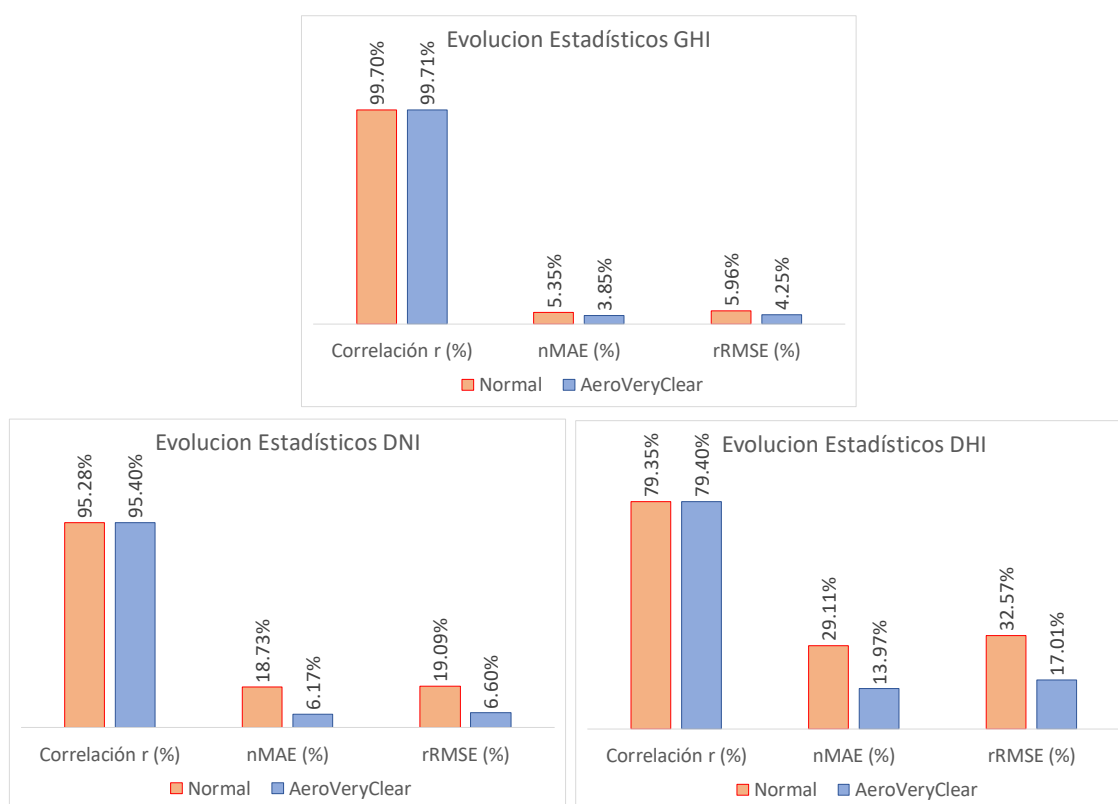


Figura 22. Evolución de los indicadores estadísticos con la inserción del Aerosol Very Clear

Ante los nuevos resultados, se observa una mejora considerable de la estimación de la irradiancia, tal como se pretendía. Se nota un suave incremento de la correlación y una excelente disminución de los errores entre las irradiancias simuladas y medidas. Las curvas de la Figura 21 son ahora más parecidas, lo que indica un buen resultado. Los errores de la DNI pasaron de 18,73% a apenas 6,17% (nMAE) y de 19,09% a 6.60%

(rRMSE). Igual para los valores de la DHI, el nMAE pasó de 29,11% a 13,9% y del rRMSE de 32,5% a 17,01%.

La Figura 23 siguiente muestra la evolución de la distribución porcentual de las medidas con relación a los errores RE.

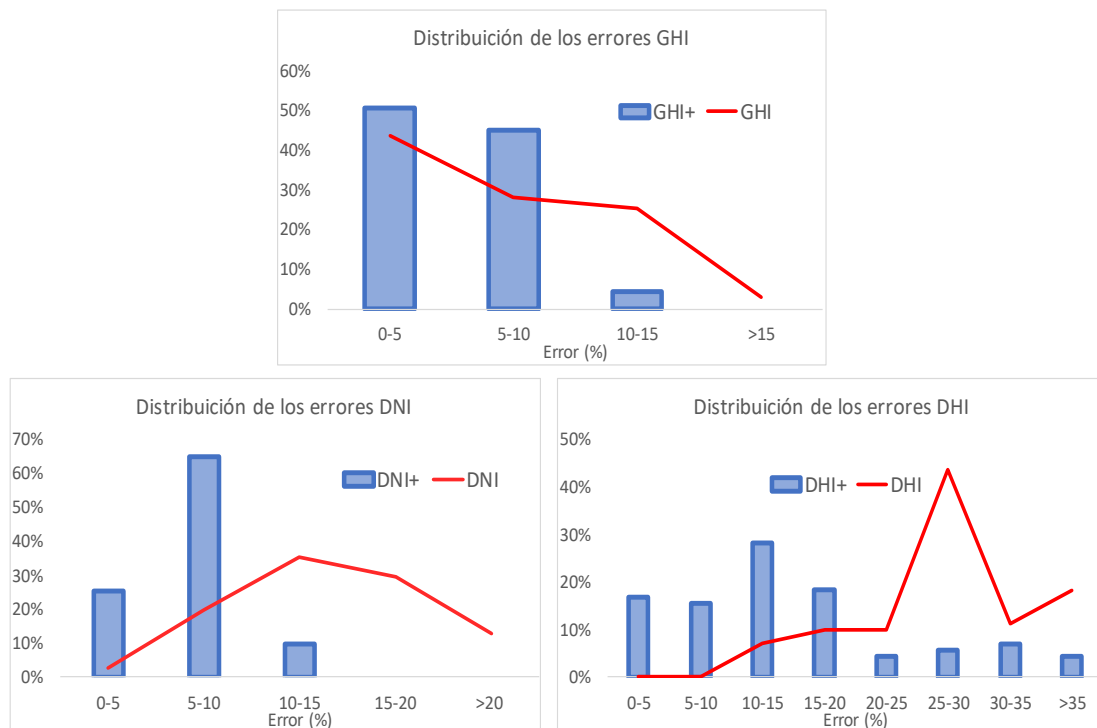


Figura 23. Evolución de la distribución porcentual de las mediciones de acuerdo con los errores RE. Las columnas azules representadas por la señal + representan la nueva distribución considerando el incremento de la absorción y dispersión atmosférica comparado con la situación anterior representada por la línea roja.

Tal como se observan, todas las simulaciones de la GHI presentaron RE menores que 15%, con 96% de las simulaciones con RE menores que 10%. Se nota la excelente evolución de simulaciones de la DNI que antes tenía 43% de los resultados con RE mayores que 15% y ahora todas están abajo, con 90% de los resultados con RE menores de 10%. La evolución también es clara para los resultados de la DHI. Las simulaciones de la DNI que antes solo 7% presentaban RE menores que 15%, con la nueva situación 60% de los resultados presentan RE menores que eso.

6.2 Modelo con la presencia de nubes tipo Cirro

Como se ha planteado anteriormente, la estimación de la radiación en casos con nubes es compleja pues dependen de muchos parámetros como la cantidad de nubes, la altura, su espesor, la concentración de agua o hielo, además de los parámetros microscópicos que determinan las propiedades ópticas geométricas como el tipo y tamaño de partículas o cristales.

Para simulación con LibRadtran de las irradiancias con la presencia de nubes tipo cirro, se usaron los valores CBH y CTH medidas con el ceilómetro y se ha supuesto cuatro configuraciones de IWC y Reff de las partículas en acuerdo con la *Tabla 3 Parametrizaciones de Nubes Cirros en libRadtran* en metodología propuesta sección de *5.2 Generación de los Archivos de Ice-Cloud Properties*.

De la misma forma que en el caso de cielo despejado, se ha hecho también el análisis con la presencia del aerosol *very clear* para simular las condiciones intrínsecas óptimas de absorción y dispersión atmosférica. La evaluación se ha llevado a cabo sobre conjunto de 177 muestras, del total de 972. Veinte y cuatro de estas muestras, que mostraron valores de RE en la estimación de la GHI mayores de 50%, fueron descartados del análisis.

La Tabla 7 siguiente muestra los indicadores estadísticos para el caso en que no se considera la presencia del aerosol y la Tabla 8 muestra los resultados considerando las condiciones ópticas atmosféricas similares a presencia del aerosol *very clear*.

Las Figuras 24 y 25 muestran las gráficas boxplot para los errores absolutos de la GHI, DNI y DHI en las condiciones sin y con aerosol *very clear*, respectivamente.

Tabla 7. Indicadores estadísticos para presencia de nubes tipo cirro

Indicadores	Cirros 1			Cirros 2			Cirros 3			Cirros 4		
	GHI	DNI	DHI	GHI	DNI	DHI	GHI	DNI	DHI	GHI	DNI	DHI
Correlación r (%)	93.66%	57.88%	78.43%	93.17%	59.63%	80.49%	93.65%	60.58%	79.51%	93.13%	57.69%	80.28%
MAE (W/m2)	46.72	277.79	175.62	58.22	190.93	50.62	47.06	219.54	147.55	58.95	209.71	59.88
nMAE (%)	8.65%	46.20%	101.78%	10.78%	31.75%	29.34%	8.71%	36.51%	85.51%	10.91%	34.88%	34.70%
RMSE (W/m2)	60.78	316.06	197.35	79.44	239.53	64.49	62.31	257.71	167.65	80.40	258.25	74.49
rRMSE (%)	11.25%	52.56%	114.37%	14.71%	39.84%	37.38%	11.94%	42.86%	97.16%	14.88%	42.95%	43.17%

Tabla 8. Indicadores estadísticos para presencia de nubes tipo cirro con la presencia del Aerosol Very Clear

Indicadores	Cirros 1			Cirros 2			Cirros 3			Cirros 4		
	GHI	DNI	DHI	GHI	DNI	DHI	GHI	DNI	DHI	GHI	DNI	DHI
Correlación r (%)	93.32%	59.17%	80.13%	93.32%	56.46%	78.55%	93.69%	60.39%	79.00%	93.29%	54.37%	77.55%
MAE (W/m2)	57.50	188.88	50.34	52.44	138.50	35.01	46.83	254.02	159.08	52.87	149.20	39.15
nMAE (%)	10.62%	31.26%	29.29%	9.69%	22.92%	20.37%	8.65%	42.04%	92.57%	9.77%	24.69%	22.78%
RMSE (W/m2)	78.53	236.85	64.26	72.10	182.02	44.18	60.99	290.02	177.72	72.89	194.89	49.56
RMSE (%)	14.51%	39.19%	37.39%	13.32%	30.12%	25.71%	11.82%	47.99%	103.42%	13.46%	32.25%	28.84%

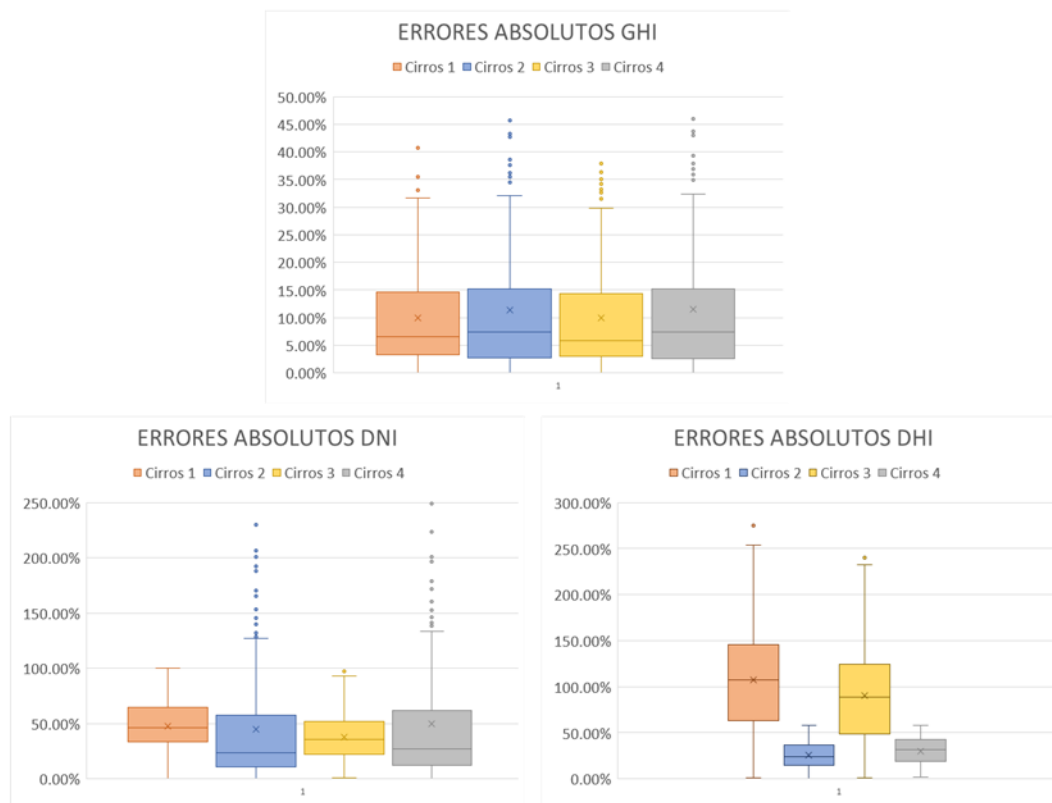


Figura 24.Boxplot de los errores absolutos con la presencia de nubes cirros.



Figura 25.Boxplot de los errores absolutos con la presencia de nubes cirros y aerosol very clear.

En el marco de los resultados obtenidos, se puede observar que la correlación sufre pequeños cambios con la alteración de las propiedades ópticas atmosféricas al insertar el aerosol y los errores, en general, disminuyen. Las gráficas boxplot en el segundo caso muestran menores errores. En relación a las configuraciones de las propiedades ópticas de las nubes, se observa que la configuración Cirros 2 (IWC de 0,001 g/m³ y Reff 25 µm) presenta los mejores resultados, con la correlación de 93,32% de la GHI, 56,46% de la DNI y 78,55% de la DHI y los menores valores de rRMSE, 13,32%, 30,12% y 25,71%, respectivamente.

Se puede observar los mejores resultados de la configuración Cirros 2 también en las gráficas de distribución de las simulaciones de acuerdo con los errores RE, tanto para el caso sin aerosol (Figura 26) como en el caso en que si se considera aerosol (Figura 27)

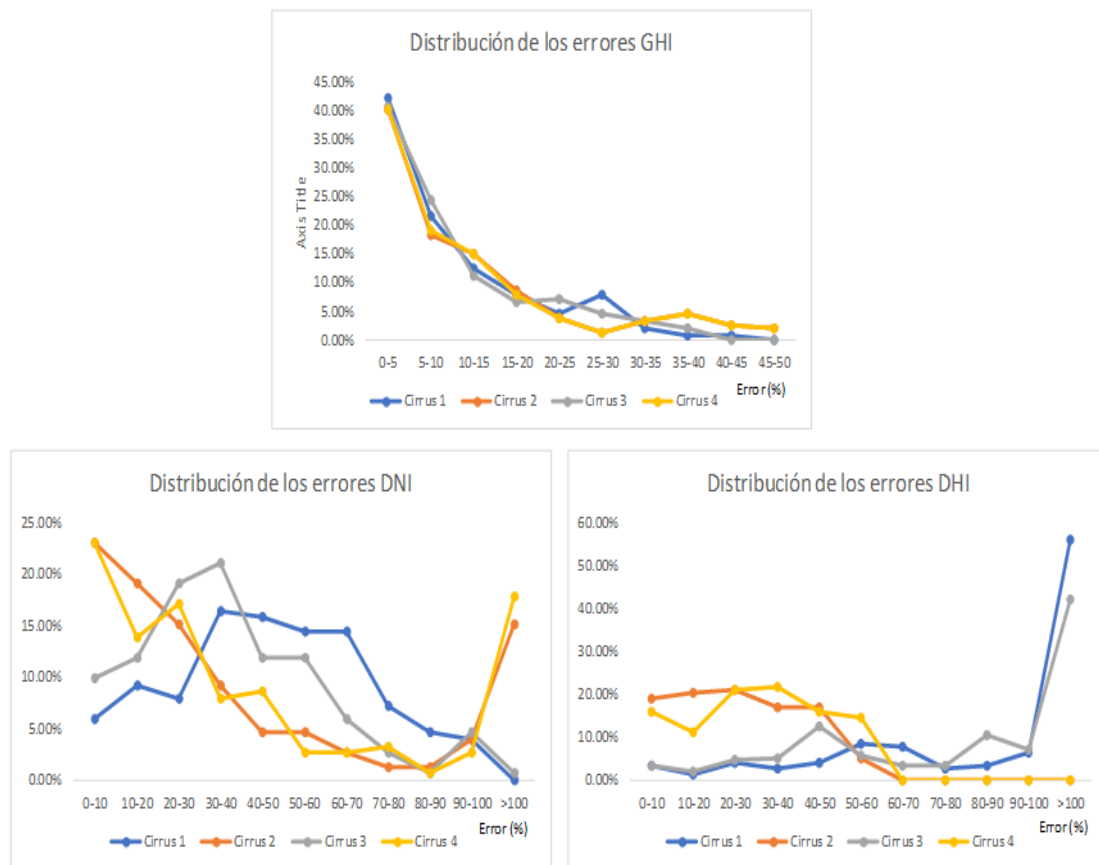


Figura 26. Distribución porcentual de las simulaciones con nubes cirros en función de los valores de RE



Figura 27. Distribución porcentual de las simulaciones con nubes cirros en función de los valores de RE (Aerosol Very Clear).

Para los errores RE de la GHI, los cuatro tipos de configuraciones no muestran mucha diferencia, generalmente el 75% de las mediciones presentan RE menores que 15% en ambos casos con aerosol o sin él. Para la DNI, la parametrización cirros 2 sin aerosol presenta 42,11% de las mediciones con RE menores que 20%. Al considerarse el aerosol, el número de estimaciones que presentan RE menores que 20% incrementa para 61,18%, contra 15.13%, 21.71% y 36.84% para cirros 1, 3 y 4 sin aerosol y 42.11%, 15.79% y 59.21% con aerosol, respectivamente.

Para la DHI, 60,53% de las mediciones (sin aerosol) en la parametrización cirros 2 presentan RE menores que 30%. Para el caso con aerosol 69,74% de las medidas presentan RE menores que ese umbral, contra 8.55%, 9.87% y 48.03% para cirros 1, 3 y 4 sin aerosol y 60.53%, 9.87% y 65.13% con aerosol, respectivamente.

La Figura 28 presenta las irradiancias simuladas y medidas para el caso de la configuración cirros 2 considerando las propiedades ópticas atmosféricas al inserir el aerosol very clear.

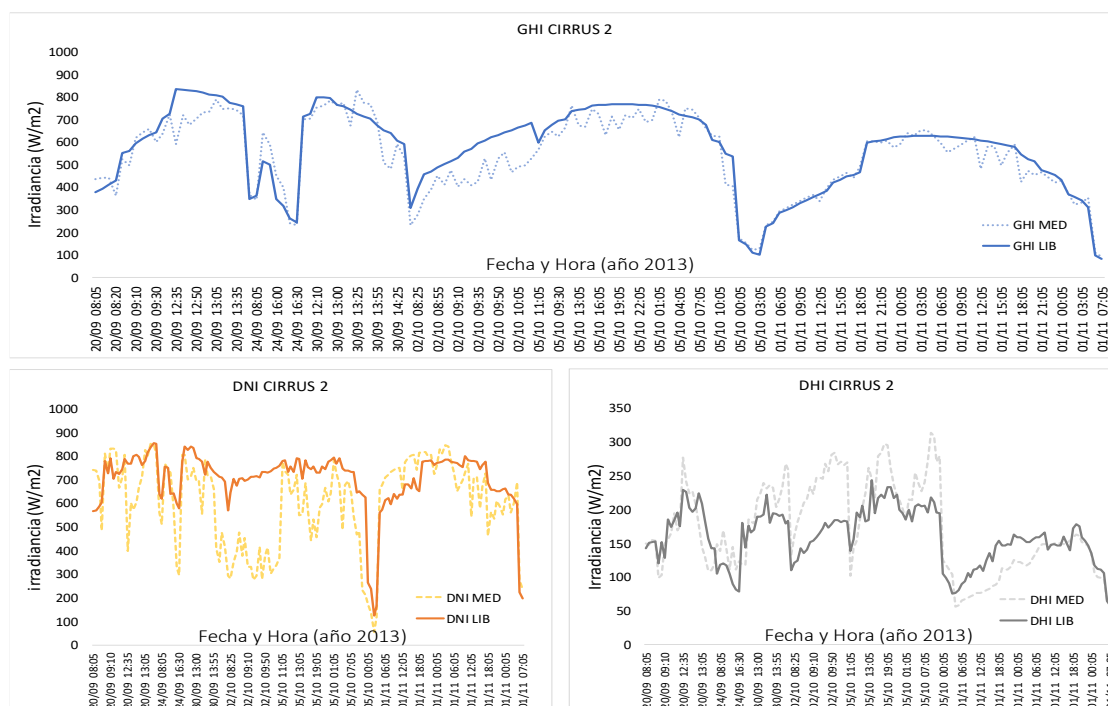


Figura 28. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para la Cirros 2 con Aerosol

La Figura 29 siguiente muestra la evolución de la distribución porcentual de las mediciones en la configuración cirros 2 con relación a los errores RE con la inserción del aerosol para simular las propiedades ópticas óptimas.

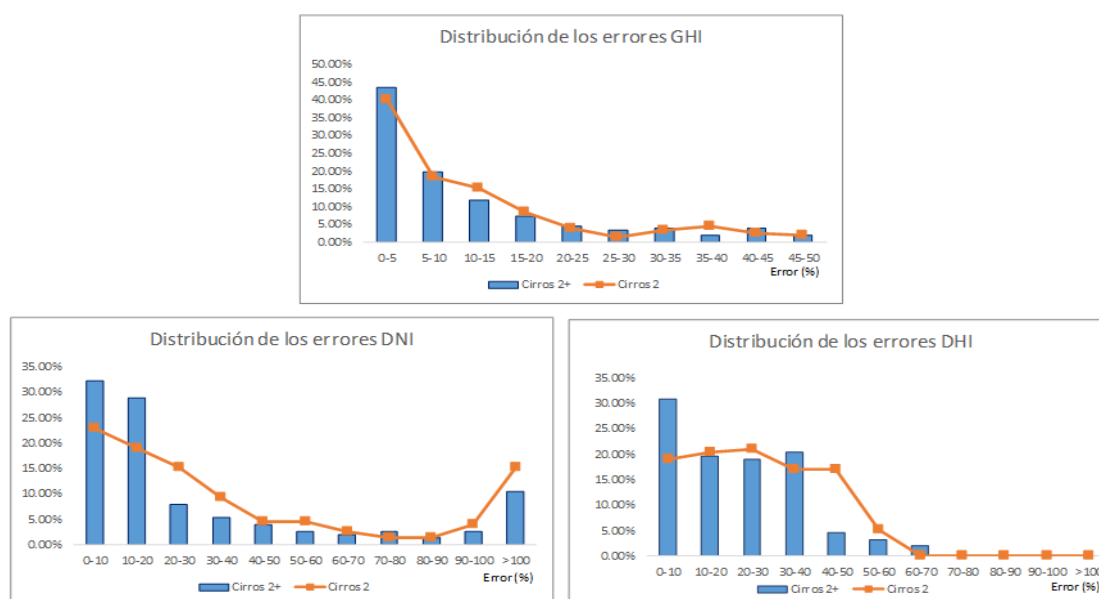


Figura 29. Evolución de la distribución porcentual de las simulaciones de acuerdo con los errores RE. Las columnas azules representadas por la señal + representan la distribución considerando el aerosol mientras la línea naranja representa la situación sin aerosol.

Aunque sea posible elegir un solo tipo de configuración de nubes para representar la nube cirros, los resultados serían mejores si previamente se supiera el espesor óptico de la nube o sus propiedades microscópicas exactas. Por ejemplo, para el día 2 de octubre de 2013, a las 9:35 h, la configuración elegida cirros 2 presenta un rRMSE 40.32% de la GHI, 144.89% de la DNI y 29.90% de la DHI, mientras la configuración de la Cirros 3, que generalmente presenta malos resultados para las otras simulaciones, presenta mejores resultados con errores de 30.15% de la GHI, solamente 0.12% de la DNI y 54.73% de la DHI. Además, existen infinitas otras combinaciones de parámetros que podrían caracterizar ese tipo de nube.

A partir de las cuatro configuraciones consideradas, se ha hecho un análisis de los resultados con la mejor parametrización para cada simulación individualmente, considerando la menor suma de los errores RE de las tres irradiancias de cada caso. La Figura 30 siguiente muestra la distribución de las mediciones de acuerdo con la configuración óptima.

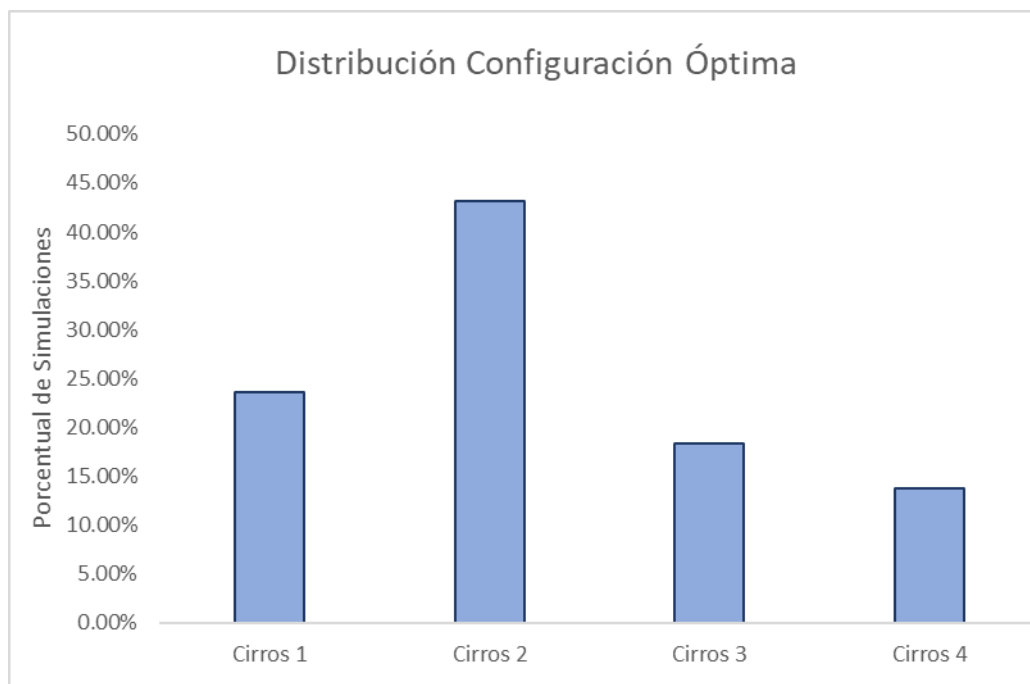


Figura 30. Distribución de las simulaciones con nubes cirros de acuerdo con la configuración óptima.

Es evidente que, como anteriormente supuesto, la configuración cirros 2 presenta mayor cantidad de simulaciones en condiciones óptimas con 43,14%, seguida por los cirros 1, 3 y 4, con 23.53%, 18.30% y 13.73% del total, respectivamente.

La Figura 31 muestra los resultados las irradiancias simuladas en condiciones de parametrización optima de las nubes y la Tabla 9 los indicadores estadísticos para ese caso. En la Figura 32 se puede observar la evolución de esos indicadores cuando comparado con la configuración cirros 2.

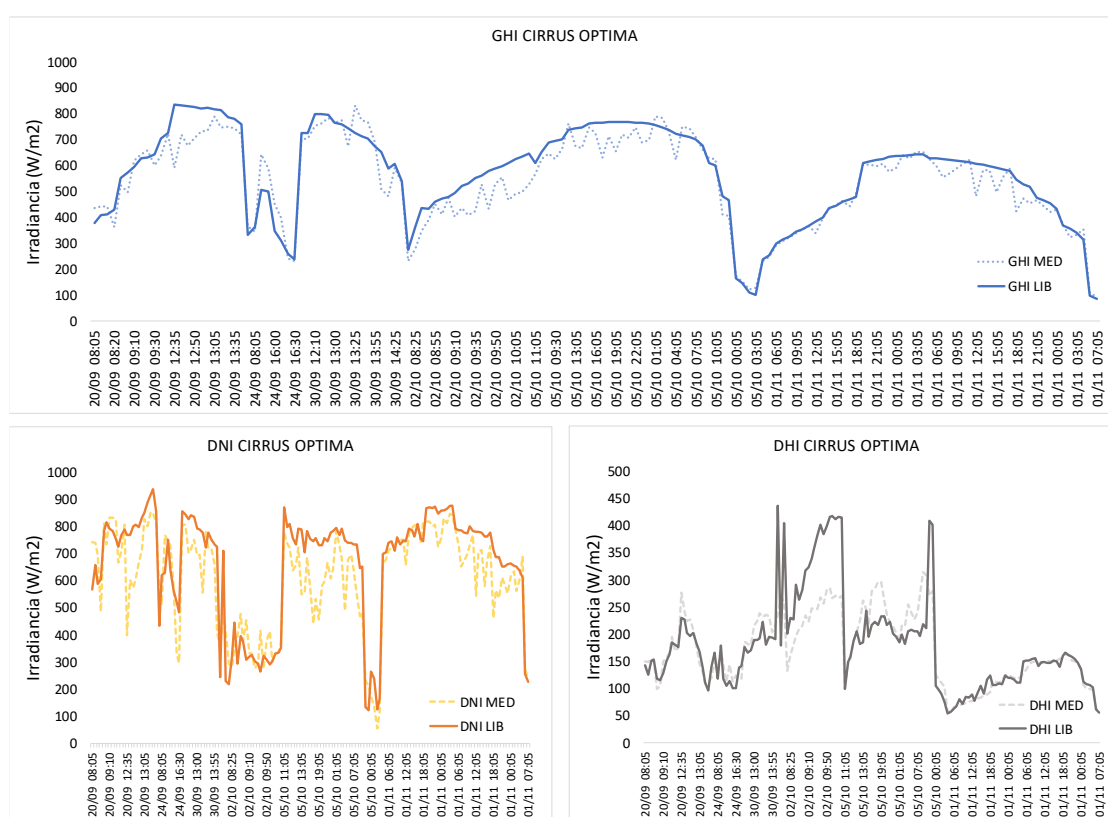


Figura 31. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para la Parametrización Óptima.

Tabla 9. Indicadores estadísticos para presencia de nubes tipo cirro en la configuración optima

Indicadores	Configuración Optima		
	GHI	DNI	DHI
Correlación r (%)	99.49%	65.85%	81.34%
MAE (W/m2)	46.71	90.74	32.18
nMAE (%)	8.63%	15.02%	18.73%
RMSE (W/m2)	63.46	115.51	52.96
rRMSE (%)	11.72%	19.11%	24.82%

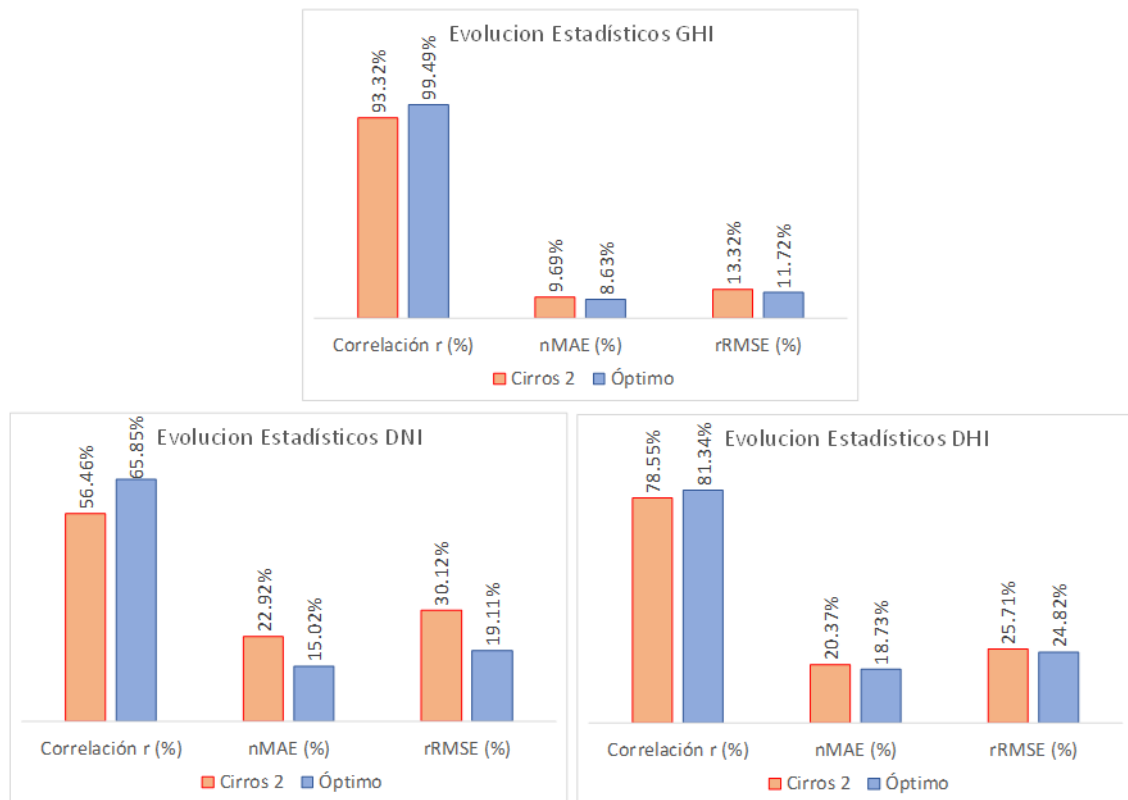


Figura 32. Evolución de los indicadores estadísticos con la utilización de las configuraciones óptimas

Se observa en la Figura 31 graficas de las irradiancias simuladas más suaves y más cercanas de los valores medidos, que se compadece con un incremento considerable de la correlación y disminución de los errores que se puede ver en la Figura 32.

Finalmente, se ha evaluado el efecto de atenuación de las nubes en la irradiancia solar. Para ello, se ha comparado el promedio horario de las irradiancias para el caso del cielo despejado con mejoría de las propiedades ópticas con el valor correspondiente con nubes considerando la configuración constante cirros 2 y considerando la configuración óptima. Como los días están comprendidos en un periodo de 2 meses, para este análisis se ha considerado poco relevante el papel de la declinación. El análisis se ha realizado en función de la hora solar.

En la Figura 33 se puede observar la atenuación porcentual de las nubes tipo cirro sobre la radiación comparado.



Figura 33. Interacción de la Radiación en presencia de nubes tipo Cirro

La influencia de las nubes en la radiación solar es debido a la reflexión, absorción y dispersión de la radiación por partículas de las nubes generalmente agrupados y definidos por el coeficiente de extinción atmosférico. Se observa el incremento del coeficiente de extinción atmosférico, con la disminución de la GHI y de la DNI e incremento de la DHI para todas las horas de presencia analizadas.

El impacto de esas nubes en el balance radioactivo es muy complejo porque las nubes cirros contienen casi que exclusivamente cristales de hielo no esféricos de diferentes formas y que se agrupan de diferentes maneras. Para los datos analizados, la mayor atenuación sobre la GHI se observa a las 11:00 H., con una disminución real medida de 19,40%. Lo mismo ocurre para los modelos simulados, con la reducción de 15,77% para la configuración constante cirros 2 y 14,93% para la parametrización óptima.

La mayor atenuación de la DNI con las nubes se ha ocurrido a las 10:00 H., con su disminución real medida de 28,28%. Lo mismo ocurre para el modelo simulado con la nube en parametrización óptima, con una reducción de 27,50%. Para la configuración constante cirros 2, la mayor interacción medida se ha sido de -13,14% a las 11:00 H.

Las mayores influencias medidas sobre la DHI se observan a las s 9:00, 10:00 y 11:00 H, con incremento de 65% de su valor en condiciones de cielo despejado. Para esas horas el modelo de configuración constante cirros 2 presentó un aumento de cerca de 35% mientras la parametrización optima es más variable, con un incremento de más de 90% en las dos primeras horas y 16 % en la última.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha llevado a cabo una evaluación del código libRadtran en el sur de la Península Ibérica. El libRadtran es un software de cálculo de transferencia radiativa de gran interés, al poder ofrecer estimaciones muy precisas y rápidas de la atenuación de la radiación solar visible y térmica en la atmósfera terrestre. En concreto, en este trabajo se ha utilizado el modelo estándar DISORT, dentro de libRadtran, de ordenadas discretas para el cálculo de la transferencia radiativa que se mostró muy efectivo.

Ese trabajo logró resultados satisfactorios, lográndose los objetivos planteados. En particular, se evaluaron las estimaciones de las irradiancias GHI, DNI y DHI para las condiciones atmosféricas de 1) cielo despejado y 2) con la presencia de nubes tipo cirro. Se analizó también la atenuación de la radiación solar con estas nubes. Todo el estudio se llevó a cabo utilizando datos medidos en la estación meteorológica de la Universidad de Jaén.

Como cabía esperar por ser más sencillo, el modelo de cielo despejado ha presentado mejores resultados, con las correlaciones para la GHI, DNI y DHI de 99,70%, 95,28% y 79,35% y las raíces de los errores medio cuadrado relativos de 5,96%, 19,09% y 32,57%, respectivamente. Con la propuesta de inserción de un aerosol muy limpio para mejoría de las propiedades ópticas atmosféricas, los resultados mejoraron notablemente, con una correlación de 99,71%, 95,40% y 79,40% y rRMSE de 4,25%, 6,60% y 17,01% para GHI, DNI y DHI, respectivamente.

Las estimaciones de la irradiancia con la presencia de nubes cirros presentó también resultados satisfactorios, aunque el caso modelo de cielo despejado presentó errores de estimación más pequeños. Esto se debe a la dificultad para representar adecuadamente las nubes tipo cirro. Existen muchas propiedades físicas asociadas a estas nubes (CBH, CTH,

CD, diferentes concentraciones de cristales de hielo, el tipo y tamaño de las partículas) y que son necesaria para conocer su interacción con la radiación. Sin embargo, no se dispone de medidas de todas ellas. En consecuencia, hay que realizar hipótesis de algunas de estas propiedades, llevando a errores de estimación.

En este trabajo se han asumido cuatro diferentes configuraciones de propiedades de estas nubes. Entre todas las simulaciones, 43,14% presentaron mejores resultados con la configuración cirros 2, considerando la menor suma de errores RE de las tres irradiancias para cada estimación individualmente.

Utilizando la configuración optima, que considera la mejor parametrización para cada caso individualmente, se obtuvieron mejores resultados, tal como el menor rRMSE para GHI de 11,72%.

La atenuación típica de la radiación con la presencia de nubes depende de la hora de incidencia. La hora de mayor atenuación medida de la GHI ha sido 11h con la disminución de 19,40% y se ha logrado con el modelo de configuración óptimo una atenuación típica de 14,93% para esa hora.

Las estimaciones para la GHI en todos los estudios (cielo despejado, cielo con nubes y atenuación) presentaran los menores errores. Por lo tanto, los resultados aquí obtenidos son mejores aplicados a las plantas fotovoltaicas que transforman directamente la GHI en electricidad, comparada que las centrales de energía solar de concentración que utilizan para su funcionamiento solo la DNI.

Ese trabajo pretende ser útil en aplicaciones de predicción de la radiación solar a corto plazo para condiciones de cielo despejado y con la presencia de nubes tipos cirros. La predicción de radiación es importante en la gestión de las plantas generadoras de

electricidad, así como para la integración de la energía que producen en la red Finalmente, se espera en un futuro mejorar y avanzar en las técnicas de predicción de la radiación asociando ese trabajo con las informaciones en tiempo real de las condiciones meteorológicas procedentes de satélites. Además, se pretende continuar la investigación para otros tipos de nubes de forma que podría mejorar su aplicabilidad práctica.

8. BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, G., Clough, S., Kneizys, F., Chetwynd, J., and Shettle. E.: *AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km)*, Tech.Rep. AFGL-TR-86-0110, Air Force Geophys. Lab., Hanscom Air Force Base, Bedford, Mass., 1986.

ARBIZU-BARRENA, C., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., and Tovar-Pescador J.: *Macroscopic cloud properties in the WRF NWP model: An assessment using sky camera and ceilometer data*, J. Geophys. Res. Atmos., 120, doi:10.1002/2015JD023502, 2015.

ARBIZU-BARRENA, C.: *Evaluación De La Estimación De La Nubosidad Del Modelo Meteorológico WRF, En el contexto de la energía solar*, Universidad de Granada, Máster GEOMET, 2013.

AVILA, J., Martín, J., Alonso, C., Escuin, M., Cadalso, J., Bartolomé, M.: *Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT*. Agencia Estatal de Meteorología, España, 2012.

BAUM, B. A., Yang, P., Heymsfield, A. J., Bansemer, A., Merrelli, A., Schmitt, C., and Wang, C.: *Ice cloud bulk singlescattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm* , J. Quant. Spectrosc. Ra., 146, 123– 139, doi:10.1016/j.jqsrt.2014.02.029, 2014.

BAUM, B., Heymsfield, A., Yang, P., and Bedka, S.: *Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part 1: Microphysical data and models*, J. Appl. Meteorol., 44, 1885–1895, 2005a.

BAUM, B., Yang, P., Heymsfield, A., Platnick, S., King, M., Hu, Y.-X., and Bedka, S.: *Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part 2: Narrowband models*, J. Appl. Meteorol., 44, 1896–1911, 2005b.

BOERS, R., M. J. de Haij, W. M. F. Wauben, H. K. Baltink, L. H. van Uft, M. Savenije, and C. N.: *Optimized fractional cloudiness determination from five groundbased remote sensing techniques*, J. Geophys. Res., 115, D24116, doi:10.1029/2010JD014661, 2010.

BUEHLER, S. A., John, V. O., Kottayil, A., Milz, M., and Eriksson, P.: *Efficient radiative transfer simulations for a broadband infrared radiometer - combining a weighted mean of representative frequencies approach with frequency selection by simulated annealing*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 111, 602–615, 2010.

CASTELLI, Mariapina.: *Assessing solar radiation components over the alpine region: Advanced modeling techniques for environmental and technological applications*. Doctor Thesis, University of Toronto, Toronto, 2015.

EMDE, C. Buras, R., Kylling, A., Gasteiger, J., Hamann, U., Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., Bugliaro, L.: *The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1)*, Geoscientific Model Development, 2016.

FU, Q.: *An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models*, J. Climate, 9, 2058–2082, 1996.

FUF, Q., Yang, P., and Sun, W. B.: *An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds for climate models*, J. Climate, 11, 2223–2237, 1998.

GASTEIGER, J., Emde, C., Mayer, B., Buras, R., Buehler, S. A, Lemke, O.: *Representative wavelengths absorption parameterization applied to satellite channels and spectral bands*, Geoscientific Model Development, 2016.

GASTEIGER, J., Emde, C., Mayer, B., Buras, R., Buehler, S., and Lemke, O.: *Representative wavelengths absorption parameterization applied to satellite channels and spectral bands*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 148, 99–115, doi:10.1016/j.jqsrt.2014.06.024, 2014.

GUEYMARD, C.: *The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models*, Solar energy, 76,423–453, 2003.

HAIDEN, T., Forbes, M., and Bozzo, A.: *The skill of the ECMWF cloudiness forecasts*, ECMWF Newsletter, 143, 14-19, 2015.

HEINLE, A. *Automatic cloud classification of whole sky images*. Atmospheric Measurement Techniques 3, 557-567, 2010.

HEYMSFIELD, A. J., Schmitt, C., and Bansemer, A.: *Ice cloud particle size distributions and pressure dependent terminal velocities from in situ observations at temperatures from 0 to 86 C*, J. Atmos. Sci., 70, 4123–4154, 2013.

HOUZE JR, Robert A.: *Cloud Dynamics*, Academic Press, London, 2013.

HU, Y. X. and Stamnes, K.: *An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models*, J. of Climate, 6, 728–742, 1993.

KOKHANOVSKY, A. *Cloud Optics*, Atmospheric And Oceanographic Sciences Library, Vol 34, Springer, Bremer, 2006.

KREUTER, A., Zangerl, M., Schwarzmann, M., and Blumthaler, M., *All-sky imaging: a simple, versatile system for atmospheric research*, Appl. Opt. 48, 1091-1097, 2009.

LAKA IÑURRATEGI, M.: *Evaluación De La Influencia De Las Nubes En La Irradiancia Directa Normal (DNI), en El Contexto De La Energía Solar Termoeléctrica*, Universidad de Granada, Máster GEOMET, 2012.

LINARES-RODRIGUEZ, A., Ruiz-Arias J. A, Pozo-Vazquez D., Tovar-Pescador J.: *An artificial neural network ensemble model for estimating global solar radiation from Meteosat satellite images*. Energy 61, 636-645, 2013

LIU, K.: *An introduction to atmospheric radiation*, volume 84. Academic press, 2002.

LONG, C. N., Sabburg, J. M., Calbó, J., and Pagès, D.: *Retrieving cloud characteristics from ground-based daytime color all-sky images*. J. Atmos. Oceanic Technol., 23, 633–652. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH1875.1>, 2006.

LORENZ, E., Heinemann, D., Hammer, A.: *Short-term forecasting of solar radiation based on satellite data*, in Proceedings of EuroSun 2004, Freiburg, Germany, pp. 841–848, 2004.

MARTUCCI, G., Milroy, C., and O'Dowd, C. D.: *Detection of cloud-base height using Jenoptik CHM15K and Vaisala CL31 ceilometers*, J. Atmos. Oceanic Technol., 27, 305–318. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009JTECHA1326.1>, 2010.

MAYER, B., Buras, R., Kylling, A., Emde, C., Gasteiger, J., Richter, B.: *libRadtran user's guide*, 2015.

MITTERMAIER, M. P.: *A critical assessment of surface cloud observations and their use for verifying cloud forecasts*, Q.J.R. Meteorol. Soc., 138, 1794-1807, doi: 10.1002/qj.1918, 2012.

MYERS, D.: *Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications*, CRC Press, New York, 2013.

PINCUS, R., R. J. P. Hofmann, J. L. Anderson, K. Raeder, N. Collins, and J. S. Whitaker.: *Can fully accounting for clouds in data assimilation improve short-term forecasts by global models?* Mon. Weather Rev., 139, 946–957, doi: 10.1175/2010MWR3412.1., 2011.

RICCHIAZZI, P., Yang, S., Gautier, C., and Sowle, D.: *SBDART: A research and Teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere*, Bulletin of the American Meteorological Society, 79, 2101–2114, 1998.

RIGOLLIER, C., Lefevre, M., and Wald, L., , *The method HELIOSAT-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images*, Sol. Energy, 77, pp. 159–169, 2004.

ROECKNER, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, E., Giorgetta, M., Schlese, U., and Schulzweida, U.: *The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate*, Tech. rep., Max Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 218, 1996.

RÜTHER, R.: *Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil*. Editora UFSC/LABSOLAR. Florianópolis, 2004.

SHETTLE, E.: *Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies*, in: *Atmospheric propagation in the uv, visible, ir and mm-region and related system aspects*, no. 454 in AGARD Conference Proceedings, 1989.

STAMNES, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W., and Jayaweera, K.: *Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media*, Appl. Opt., 27, 2502–2509, 1988.

STAMNES, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W., and Laszlo, I.: *DISORT, a General-Purpose Fortran Program for Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer in Scattering and Emitting Layered Media: Documentation of Methodology*, Tech. rep., Dept. of Physics and Engineering Physics, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ 07030, 2000.

TAPAKIS, R.: *Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review*. Solar Energy, 2012

WISCOMBE, W.: *Improved Mie scattering algorithms*, Appl. Optics, 19, 1505–1509, 1980.

YANG, P., Bi, L., Baum, B. A., Liou, K.-N., Kattawar, G., and Mishchenko, M.: *Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 μm to 100 μm* , J. Atmos. Sci., 70, 330–347, 2013.

ZOMER, Clarissa Debiazi.: *Método de Estimativa da Influencia do Sombreamento Parcial na Geração Energética de Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados em Edificações*. Doctor Thesis, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos más comunes de Nubes.....	6
Figura 2. Espectro Extraterrestre y Emisión de un Cuerpo Negro en 5782 K	13
Figura 3. Espectro Solar en el topo de la Atmosfera y en la Superficie.....	15
Figura 4. Estación meteorológica de la Universidad de Jaén. En la imagen: ceilómetro CHM 15k - Nimbus (izquierda) y cámara de nubes TSI-880 (derecha).	18
Figura 5. Esquema del método de operación del ceilómetro.....	19
Figura 6. Salida típica del ceilómetro para un día particular.....	19
Figura 7. Fotos realizadas con la cámara de nubes TSI-880 situada en la Universidad de Jaén. 20	
Figura 8. Pirheliómetro de la marca Delta-Ohmn Lp Pyrhe 16 montado sobre un seguidor solar de la marca EKO modelo Sun Tracker STR 22G.	21
Figura 9. Estación meteorológica de la Universidad de Jaén.....	22
Figura 10. Estructura del Modelo uvspec.....	24
Figura 11. Modelo Atmosférico midlatitud_summer.....	29
Figura 12. Ejemplo de archivo input generado para el modelo de Cielo Despejado	34
Figura 13. Ejemplo de archivo .DAT generado para caracterización de las nubes cirros.....	35
Figura 14. Ejemplo de archivo input generado para el modelo de Cielo Despejado	36
Figura 15. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para Cielo Despejado	40
Figura 16. Ejemplo de la camera de Nubes de las medidas de mayores errores. (a) 29/09/2013 11:10 y (b) 20/09/2013 11:15.....	41
Figura 17. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para Cielo Despejado Post-Processing	41
Figura 18. Evolución de los indicadores estadísticos post-processing.....	42
Figura 19. Distribución porcentual de las medidas de acuerdo con los errores RE	43
Figura 20. Ejemplo de archivo input generado para el modelo de Cielo Despejado con Aerosol	45
Figura 21. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para Cielo Despejado con Aerosol	45
Figura 22. Evolución de los indicadores estadísticos con la inserción del Aerosol Very Clear .	46
Figura 23. Evolución de la distribución porcentual de las mediciones de acuerdo con los errores RE. Las columnas azules representadas por la señal + representan la nueva distribución considerando el incremento de la absorción y dispersión atmosférica comparado con la situación anterior representada por la línea roja.	47
Figura 24.Boxplot de los errores absolutos con la presencia de nubes cirros.	50
Figura 25.Boxplot de los errores absolutos con la presencia de nubes cirros y aerosol very clear.	50

Figura 26. Distribución porcentual de las simulaciones con nubes cirros en función de los valores de RE	51
Figura 27. Distribución porcentual de las simulaciones con nubes cirros en función de los valores de RE (Aerosol Very Clear).	52
Figura 28. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para la Cirros 2 con Aerosol	53
Figura 29. Evolución de la distribución porcentual de las simulaciones de acuerdo con los errores RE. Las columnas azules representadas por la señal + representan la distribución considerando el aerosol mientras la línea naranja representa la situación sin aerosol.	53
Figura 30. Distribución de las simulaciones con nubes cirros de acuerdo con la configuración óptima.....	54
Figura 31. Comparación de las Irradiancias Simuladas y Medidas Para la Parametrización Óptima.	55
Figura 32. Evolución de los indicadores estadísticos con la utilización de las configuraciones optimas	56
Figura 33. Interacción de la Radiación en presencia de nubes tipo Cirro	57

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parametrizaciones de Nubes Liquidas en libRadtran.....	27
Tabla 2. Parametrizaciones de Nubes de Hielo en libRadtran	27
Tabla 3. Parametrizaciones de Nubes Cirros en libRadtran.....	35
Tabla 4. Indicadores Estadísticos Para Cielo Despejado	39
Tabla 5. Indicadores Estadísticos Para Cielo Despejado Post Processing	42
Tabla 6. Indicadores Estadísticos Para Cielo Despejado con Aerosol Very Clear.....	46
Tabla 7. Indicadores estadísticos para presencia de nubes tipo cirro	49
Tabla 8. Indicadores estadísticos para presencia de nubes tipo cirro con la presencia del Aerosol Very Clear	49
Tabla 9. Indicadores estadísticos para presencia de nubes tipo cirro en la configuración optima	55