

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Comparación de modelos paramétricos de cielo despejado

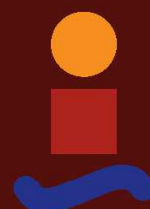
Autor: Ana Belén Medina Maldonado

Tutor: Manuel Antonio Silva Pérez

Cotutor: Carlos Fernández Peruchena

Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Comparación de modelos paramétricos de cielo despejado

Autor:

Ana Belén Medina Maldonado

Tutor:

Manuel Antonio Silva Pérez

Profesor Contratado Doctor

Cotutor:

Carlos Fernández Peruchena

Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Grado: Comparación de modelos paramétricos de cielo despejado

Autor: Ana Belén Medina Maldonado

Tutor: Manuel Antonio Silva Pérez

Cotutor: Carlos Fernández Peruchena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

*A mi pareja, familia y amigos,
por ser un pilar fundamental en
mi vida, y apoyarme tanto en todo
momento*

*A todos esos maestros que aman
la docencia y que he tenido la
suerte de cruzarme en el camino,
por ser mi guía y mi inspiración
en el día a día*

La utilización óptima de la energía solar requiere una caracterización completa del recurso solar. La manera más precisa es medir ese recurso in situ, pero desafortunadamente no es habitual que existan registros precisos, especialmente en largos períodos de tiempo. Para remediar, al menos parcialmente, la falta de mediciones en tierra, se pueden aplicar modelos que estiman las componentes de la radiación solar. La irradiancia en condiciones de cielo despejado es una componente fundamental ya que se utiliza como función de normalización en modelos que convierten las imágenes de satélites meteorológicos en irradiancia o en modelos que descomponen la irradiancia global en fracciones difusa / directa. Al modelar los efectos del paso de nubes en la irradiancia directa, es particularmente importante identificar esos momentos en los que no existe presencia de nubes entre el observador y el Sol. Por lo tanto, resulta de especial interés la detección de periodos de tiempo en ausencia de nubes y la evaluación posterior de la irradiancia de esos instantes en modelos de cielo despejado.

Este documento presenta un nuevo método simple para la detección de instantes en los que la radiación que llega a la superficie terrestre no se ve afectada por la presencia de nubes en el cielo, y una posterior comparación de esos instantes con las predicciones de diferentes modelos de cielo despejado. Se evalúa el rendimiento intrínseco de cinco modelos radiativos de cielo despejado, utilizando conjuntos de datos de alta calidad medidos en escala minutal en dos localizaciones con climas totalmente diferentes: Carpentras y Tamanrasset. Se utilizan hasta 4 años de registros de cada emplazamiento, de donde se extraen los periodos de cielo despejado mediante un algoritmo de detección automatizado. Con estos periodos de cielo despejado identificados, se evalúan cinco de los modelos más destacados de radiación de cielo despejado. Los modelos seleccionados pueden predecir irradiancias directas, difusas y globales bajo condiciones de cielo despejado a partir de datos atmosféricos registrados, y todos han sido (o aún están siendo) usados en aplicaciones a gran escala, por ejemplo para preparar mapas de recursos solares y conjuntos de datos, o para evaluar la radiación solar. Los datos de entrada a los modelos incluyen medidas registradas en cada zona de aerosoles y datos modelados en la misma escala temporal de vapor de agua.

El rendimiento intrínseco de los modelos se evalúa mediante la comparación entre sus predicciones y las mediciones en los instantes seleccionados con ausencia de nubes. Se calculan diferentes parámetros estadísticos para evaluar las diferencias entre las series de datos, así como el acuerdo entre las funciones de distribución acumulativa. Se muestran grandes diferencias entre los distintos modelos. Aquellos que requieren más entradas atmosféricas modelan generalmente mejor que modelos más simples. Los resultados muestran que para las simulaciones de irradiancia directa de cielo despejado, los enfoques McClear y Bird son los más eficaces, mostrando los mejores resultados en los dos emplazamientos, mientras que Solis y REST2 son los modelos de cielo despejado más ineficientes bajo esas mismas condiciones.

Abstract

The optimal utilization of solar energy requires a thorough characterization of the solar resource. The most accurate way is to measure that resource in situ, but unfortunately accurate measurements are not a common commodity, especially over long periods of time. To circumvent the lack of ground based measurements, models can be applied to estimate solar irradiance components. A fundamental component is clear sky irradiance, since it is used as a normalization function in models that convert meteorological satellite images into irradiance, or in models that decompose global irradiance into diffuse/direct fractions. When modeling the effect of the cloud transients in the direct normal irradiance, it is particularly relevant to identify those moments in which there are no clouds between the observer and the sun. Therefore, it is of special interest the detection of time periods in the absence of clouds and the subsequent evaluation of the irradiance of those moments in clear sky models.

This document presents a new simple method for the detection of instants in which the radiation that arrives at the terrestrial surface is not affected by the presence of clouds in the sky, and a later comparison of those moments with the predictions of different clear sky models. The intrinsic performance of five radiative clear sky models is evaluated using 4-years of high quality data sets measured on a 1- minute time step at two sites with different climates: Carpentras and Tamanrasset. The clear sky periods to be evaluated are extracted through an automated detection algorithm. The selected models can predict direct, diffuse and global irradiances under clear sky conditions from atmospheric data, and have all been (or still are) involved in large-scale applications, for instance to prepare solar resource maps and datasets, or to evaluate solar radiation. The input data to the models include accurate aerosol measurements in each zone and modeled water vapor data on the same time step.

The intrinsic performance of the models is evaluated by comparison between their predictions and measurements at the selected instants with no clouds. Various statistics are calculated to evaluate the differences between the data series, as well as the agreement between the cumulative distribution functions. Large differences in performance are apparent between models. Those that require more atmospheric inputs perform usually better than simpler models. The results show that for direct clear sky irradiance simulations, the McClear and Bird approaches are the most effective, showing the best results in both locations, while Solis and REST2 are the most inefficient clear sky models under the same conditions.

Índice

Resumen	i
Abstract	i
Índice	i
Índice de Figuras	i
Índice de Tablas	i
Notación	i
1 Introducción	1
2 Revisión bibliográfica	3
2.1. <i>Revisión de modelos</i>	3
2.2. <i>Revisión de detección de instantes claros</i>	3
3 Objetivos	7
3.1 <i>Detección de instantes claros</i>	7
3.2 <i>Comparación de modelos</i>	7
3.3 <i>Desarrollo de una herramienta</i>	7
4 Metodología	9
4.1 <i>Datos empleados</i>	9
4.2 <i>Modelos</i>	12
4.2.1 <i>Modelo Bird</i>	13
4.2.2 <i>Modelo ESRA</i>	13
4.2.3 <i>Modelo Solis Simplificado</i>	14
4.2.4 <i>Modelo McClear</i>	14
4.2.5 <i>Modelo REST2</i>	14
4.3 <i>Detección de instantes claros</i>	15
4.3.1 <i>Límite k_t'</i>	16
4.3.2 <i>Incrementos en k_t'</i>	17
4.3.3 <i>Incrementos en DNI</i>	17
4.4 <i>Indicadores estadísticos</i>	17
4.4.1 <i>Dispersión</i>	17
4.4.2 <i>Similitud de distribución</i>	18
4.4.3 <i>Global</i>	19
4.5 <i>Herramienta R</i>	19
5 Resultados	21
5.1 <i>Detección de instantes claros</i>	24
5.2 <i>Modelos de cielo despejado</i>	29
5.3 <i>Comparación de modelos</i>	31
6 Conclusiones	41
Referencias	42
Glosario	11

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de las estaciones de medida terrestres. Fuente: Google Earth	9
Figura 2 Estación de medidas radiométricas situada en Tamanrasset, Argelia. Fuente: BSRN	10
Figura 3 Parámetros que influyen en la radiación terrestre [74]	11
Figura 4 DNI de días claros seleccionados en diciembre de 2013 y 2014 en Carpentras y Tamanrasset	21
Figura 5 DNI en Carpentras y Tamanrasset en julio de 2015	22
Figura 6 DNI en Carpentras y Tamanrasset en diciembre de 2015	22
Figura 7 k_t y k_t' en días despejados de julio de 2014 en Carpentras y Tamanrasset	23
Figura 8 k_t y k_t' en el mes completo de julio de 2015 en Carpentras y Tamanrasset	24
Figura 9 k_t , k_t' y percentil 0.06 en días despejados de julio de 2013 y 2014 en Carpentras y Tamanrasset	25
Figura 10 k_t , k_t' y percentil 0.06 en el mes completo de julio de 2015 en Carpentras y Tamanrasset	26
Figura 11 Instantes de cielo despejado tras pasar el primer filtro del método de detección	27
Figura 12 Instantes de cielo despejado tras pasar el segundo filtro del método de detección	27
Figura 13 Instantes de cielo despejado tras pasar el tercer y último filtro del método de detección	28
Figura 14 Ejemplo de mala selección de instantes de cielo despejado tras aplicar el método de detección	29
Figura 15 DNI registrado y modelado con Bird, ESRA, Solis S., REST2 y McClear	30
Figura 16 Influencia de AOD_{700} para un día cualquiera en Carpentras	30
Figura 17 Influencia de AOD_{700} para un día cualquiera en Tamanrasset	31
Figura 18 DNI registrada y modelada para días despejados y nublados en Carpentras y Tamanrasset	32
Figura 19 Gráficos de dispersión de los modelos Bird, ESRA, REST2, Solis S. y McClear en Carpentras	33
Figura 20 Gráfico de dispersión mensual del modelo McClear en Carpentras	34
Figura 21 MBD , $RMSD$ y SD aplicado a Carpentras	35
Figura 22 MBD , $RMSD$ y SD aplicado a Tamanrasset	35
Figura 23 $ECDF$ aplicado a Carpentras	36
Figura 24 $ECDF$ aplicado a Tamanrasset	36
Figura 25 KSI y $OVER$ aplicado a Carpentras	38
Figura 26 KSI y $OVER$ aplicado a Tamanrasset	38
Figura 27 CPI aplicado a Carpentras y Tamanrasset	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Lista con detalles de las estaciones de medida terrestres	9
Tabla 2 Parámetros atmosféricos de entrada requeridos para todos los modelos considerados: ángulo cenital Z , espesor óptico del aerosol a 700 nm AOD_{700} , contenido atmosférico de nitrógeno NO_2 , columna de vapor de agua w , coeficiente de turbidez de Angstrom β , contenido atmosférico de ozono O_3 , presión P , albedo terrestre ρ_g y turbiedad de Linke T_L	12
Tabla 3 Resultados de indicadores estadísticos en Carpentras	37
Tabla 4 Resultados de indicadores estadísticos en Tamanrasset	37

Notación

A_c	Cantidad característica de una <i>CDF</i>
AOD_{380}	Espesor óptico de aerosoles a 380 nm
AOD_{500}	Espesor óptico de aerosoles a 500 nm
AOD_{700}	Espesor óptico de aerosoles a 700 nm
atm	Atmósfera, medida de presión
bar	Bar, medida de presión
<i>CDF</i>	Función de distribución acumulada
cm	Centímetro, medida de longitud
cos	Función coseno
CPI	Índice de rendimiento combinado
D_c	Valor crítico en la <i>CDF</i>
D_n	Diferencia absoluta entre las dos <i>CDFs</i> normalizadas
DU	Unidad Dobson, expresa la cantidad de ozono presente en la atmósfera terrestre. Una UD equivale a 0.01 mm de espesor de capa en condiciones normales de presión temperatura (1 atm y 0°C respectivamente)
ECDF	Función de distribución acumulada empírica
E_{ext}	Constante solar o radiación extraterrestre (1367 W/m^2)
HR	Humedad relativa
k_d	Índice de claridad en función de <i>DHI</i>
KSI	Test integral de Komolgorov-Smirnov
k_t	Índice de claridad o transmitancia horizontal global de la atmósfera
k_t'	Índice de claridad corregido en función de <i>GHI</i> y la masa óptica de aire
m	Masa de aire óptica relativa
m_A	Masa óptica de extinción de aerosoles
m_O	Masas óptica de absorción de ozono
m_R	Masa óptica para la dispersión de Rayleigh
m_U	Masa óptica de absorción de gases uniformes
m_w	Masa óptica de absorción de vapor de agua
MBD	Desviación media
N	Número de datos
nm	Nanómetro
NO_2	Dióxido de nitrógeno
O_3	Ozono
o_i	Dato i-ésimo registrado
O_m	Media de un conjunto de datos registrados
OVER	Parámetro estadístico de similitud de distribución derivado de <i>KSI</i>
P	Presión
p_i	Dato i-ésimo modelado

P_m	Media de un conjunto de datos modelados
RMSD	Error cuadrático medio
SD	Desviación estándar
T_A	Transmitancia debida a aerosoles
T_L	Turbiedad de Linke
$T_L(AM_2)$	Turbiedad de Linke con masa de aire igual a 2
T_N	Transmitancia debida al dióxido de nitrógeno
T_O	Transmitancia debida al ozono
T_R	Transmitancia de Rayleigh
T_S	Temperatura del suelo
T_U	Transmitancia debida a los gases uniformes
T_W	Transmitancia debida al vapor de agua
UV	Ultravioleta
w	Columna total de vapor de agua
X_{max}	Valor máximo en <i>CDF</i>
X_{min}	Valor mínimo en <i>CDF</i>
Z	Ángulo cenital
γ_s^{true}	Altura solar corregida por la refracción
ρ_g	Albedo de superficie
τ_b	Espesor óptico total directo
ϵ	Índice de claridad considerando el ángulo cenital
α	Exponente de Angstrom
β	Coefficiente de turbidez de Angstrom
δ_R	Espesor óptico de Rayleigh
λ	Longitud de onda
ψ	Ángulo acimutal solar

1 INTRODUCCIÓN

La luz solar es el combustible de todas las tecnologías de generación de energía solar. Como cualquier fuente de generación, el conocimiento de la calidad y de la futura disponibilidad del combustible es esencial para un análisis preciso del rendimiento del sistema y la viabilidad financiera de un proyecto. Con los sistemas de energía solar, la variabilidad de la oferta de luz solar representa probablemente la mayor incertidumbre en la predicción del rendimiento previsto en una planta de energía solar.

Existen varias alternativas cuando se definen las condiciones de cielo despejado y la irradiancia en esas condiciones. La definición más usada en los estudios de generación solar más actuales es la ausencia de nubes entre el observador y el Sol. La irradiancia de cielo claro es la registrada bajo esas condiciones, siendo en magnitud muy similar a la que se registra en ausencia de nubes visibles en la bóveda celeste. En la evaluación de un sistema de energía solar concentrada (CSP) resulta de gran interés la determinación de periodos con irradiancia en condiciones de cielo despejado.

Un modelo de cielo despejado es un conjunto de fórmulas que son capaces de producir una estimación de la irradiancia solar que llega a la superficie de la Tierra. Puede producir una estimación de la radiación directa, difusa y/o estimar la radiación global en condiciones de cielo despejado. Normalmente se obtiene la radiación global mediante la suma de las estimaciones directa y difusa, pero en ocasiones la estimación global puede obtenerse directamente. Aunque los modelos suelen producir salidas de banda ancha¹, deben ser capaces de contabilizar la dispersión, reflexión y absorción que se produce dentro de determinadas bandas espectrales debido a componentes atmosféricos tales como el vapor de agua, el ozono, los aerosoles...y procesos atmosféricos tales como la turbidez. Existe gran variedad de métodos por los cuales los modelos aplican estas influencias, requiriendo una o varias variables de entrada. Estas variaciones generan cambios significativos en el rendimiento de los modelos para diferentes ubicaciones, lo que complica la elección del más adecuado para cada emplazamiento.

Las actividades antropogénicas se han convertido en un factor importante en el cambio climático, lo que también repercute directamente en la radiación solar que llega al suelo a largo plazo. Es esencial comprender el impacto de estos cambios en el medio ambiente a la hora de realizar una predicción adecuada. Desafortunadamente, la densidad de las estaciones de medición de la irradiación terrestre de calidad es insuficiente, especialmente para la irradiancia directa. Para evitar esta falta de datos terrestres, los satélites meteorológicos pueden ser de gran ayuda debido a la disponibilidad de valores a largo plazo. Por ello se requiere que los modelos que convierten las imágenes de satélite en diferentes componentes de radiación sean cada vez más exactos y eficientes.

La capacidad de estos modelos para estimar la radiación que llega al suelo está directamente relacionada con la precisión del modelo de cielo despejado utilizado como función de normalización. Cuando se conocen los parámetros geográficos y geométricos (altitud, albedo, ángulo cenital solar, etc.), las dos principales variables de entrada de los modelos de cielo despejado son el espesor óptico del aerosol atmosférico (AOD) y la columna total de vapor de agua (w). Mientras que parámetros como la cantidad total de ozono (O_3) o el dióxido de nitrógeno (NO_2) tienen un impacto menor en la transmisividad de la radiación solar, el espesor óptico del aerosol y el vapor de agua tienen una influencia sustancial en la absorción y transmisividad de la radiación durante su paso por la atmósfera. Por lo tanto, para obtener buenas estimaciones de la irradiancia de cielo claro, estas dos entradas deben ser conocidas con la mejor precisión posible y una buena granularidad de tiempo y espacio. La columna de vapor de agua puede recuperarse con una incertidumbre relativamente baja a partir de las mediciones de temperatura del suelo (T_s) y de humedad relativa (HR) [1], pero no ocurre lo mismo con el espesor óptico del aerosol. Las mediciones del AOD son escasas, especialmente cuando se requieren varios años de datos, y su repartición espacial es pobre. Por lo tanto, es importante entender cómo la elección de un modelo y de sus datos de entrada influye en la incertidumbre de la irradiación de cielo despejado modelado.

¹ Que no distinguen entre intervalos con determinadas longitudes de onda en el espectro electromagnético.

Los modelos de cielo despejado se usan para el diseño de sistemas de energía solar, sistemas de calefacción y refrigeración de edificios, sistemas agrícolas y para la validación de modelos meteorológicos dinámicos. Las inversiones financieras requeridas por estos proyectos dependen en gran medida de la disponibilidad de conjuntos de datos solares de demostrable exactitud. La práctica más común para evaluar la energía solar local es confiar en conjuntos sintéticos de irradiancia solar generada a partir de modelos de tiempo o el procesamiento directo de imágenes de satélites [2]. Una aproximación analítica para resolver este problema es la comparación de las predicciones de varios modelos para evaluar el posible acuerdo o divergencia entre datos reales y estimados. Este trabajo presenta un nuevo método de detección de instantes de cielo despejado a partir de datos medidos en escala minutal, y una posterior comparación de esos instantes con las predicciones de diferentes modelos de cielo despejado. Tanto el método como la comparación se realizan para dos emplazamientos distintos: Carpentras, Francia y Tamanrasset, Argelia.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Son muchos los modelos de radiación en condiciones de cielo despejado propuestos en la literatura. Si bien esto podría considerarse un signo de progreso científico, esta proliferación de modelos de radiación también puede crear una fuente de confusión para los usuarios potenciales, tanto más cuantos más modelos se introduzcan sin una validación adecuada o suficiente. En el caso de detección de instantes claros ocurre algo similar, por lo que es importante la elección del método más adecuado en función del propósito en el cual se base el estudio. Se muestra a continuación una breve revisión bibliográfica tanto de modelos como de métodos de detección de instantes claros que crean una visión general del ámbito del trabajo discutido en el resto del documento.

2.1. Revisión de modelos

El tipo de modelo de irradiancia en condiciones de cielo despejado que se examina es a veces calificado de "meteorológico" o "atmosférico" (debido a su uso de información meteorológica o atmosférica típica como entrada), o incluso "parametrizado" (debido a su naturaleza simplificada en comparación con modelos de transferencia radiativa más sofisticados y rigurosos).

La existencia de tales modelos fue inicialmente examinada y su potencial discutido ya en los años setenta por Atwater y Ball [3], Bird y Hustrom [4] o Carroll [5]. Desde entonces, se han seguido investigando y desarrollando muchos más modelos de radiación solar.

Un diseño exacto y preciso de una planta de energía solar requiere una predicción lo más exacta y rigurosa posible del recurso solar, y por tanto la validación de los modelos candidatos para este tipo de tareas se convierte en un paso fundamental en el proceso. Por ello, es esencial proporcionar a los analistas suficiente información detallada de antecedentes sobre el desempeño de los diferentes modelos existentes.

Las condiciones de cielo despejado normalmente corresponden a la máxima insolación posible y, por lo tanto, son de interés esencial en estudios de recurso solar, modelos de radiación topográfica con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (*GIS*) y en la evaluación de las ganancias de calor solar y las cargas de refrigeración de edificios. La concentración de energía solar (*CSP*) y la concentración de sistemas fotovoltaicos (*CPV*) utilizan concentradores ópticos que sólo pueden funcionar cuando el Sol no está enmascarado por las nubes. Por este motivo, estos sistemas sólo se contemplan en zonas donde la nubosidad es baja y las condiciones de cielo despejado son frecuentes.

Algunos autores conocidos como Badescu, Davies, Gueymard o Ineichen entre otros, han propuesto ya varias metodologías para validar ciertos modelos de irradiancia solar de cielo despejado y evaluar su desempeño usando conjuntos de datos de radiación medidos [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16] y comparando los resultados para diferentes emplazamientos con distintas variables estadísticas ampliamente utilizadas. Para este estudio se seleccionan cinco de los modelos de mejor rendimiento y / o más utilizados para su evaluación, entendiendo el rendimiento como la capacidad del modelo de ajustar sus predicciones a las mediciones reales de irradiancia en condiciones de cielo despejado. La elección de los modelos se basa en su rendimiento, su facilidad de uso y su velocidad de cálculo. Se comparan resultados de irradiancia directa normal (*DNI*) con valores terrestres medidos en base minutal para los años 2015 y 2016, en los emplazamientos de Carpentras y Tamanrasset.

2.2. Revisión de detección de instantes claros

La condición de instante claro normalmente se define como la ausencia de nubes visibles en el cielo y la irradiancia de cielo despejado ocurre durante esas condiciones. Una definición más precisa de irradiancia de cielo despejado se basa en identificar periodos con ausencia de nubes entre el observador y el Sol, aunque

pueda haber presencia de nubes en el resto del cielo, ya que esto no afecta al valor de *DNI*. La radiación dispersada por las nubes y la producción en las plantas será similar a las dadas bajo condiciones de cielo totalmente despejado. Incluso en ausencia de nubes visibles los aerosoles, el vapor de agua y otros parámetros afectan a la transmitancia de la radiación solar en la atmósfera. Por consiguiente, existen varias alternativas para definir con precisión la condición de cielo despejado y la irradiancia en dicha situación.

Hay una gran variedad de enfoques disponibles para extraer los periodos de cielo despejado de los datos de radiación registrados. Dada la disponibilidad en la actualidad de registros de datos de resolución minatural, se sobreentiende que los métodos de extracción de cielo despejado basados en datos horarios son insuficientes. Muchos métodos de detección de cielo claro dependen de la irradiancia terrestre medida, principalmente de la irradiancia global horizontal (*GHI*) y de la irradiancia difusa horizontal (*DHI*) de alta resolución temporal [16], pero sólo unos pocos utilizan mediciones de *DNI*. El método más sencillo para identificar condiciones de cielo despejado es comparar el índice de claridad (k_t), definido como la relación entre la irradiancia horizontal global y la irradiancia extraterrestre en un plano horizontal, con un valor umbral. Los autores han utilizado diferentes umbrales para el valor que define cielo claro: 0.6 [17], 0.65 [18], [19], o 0.7 [20], [21]. La relación entre la luminancia cenital y la iluminancia difusa horizontal también puede utilizarse para determinar cielos despejados [22]. Otros autores han propuesto el uso de medidas más refinadas de la claridad del cielo. Por ejemplo, Pérez et al. [23], [24] propusieron una formulación de la claridad del cielo (ε). Para ello consideraron además de la irradiancia difusa y la irradiancia directa, el ángulo cenital (Z). Según el autor, se da condición de cielo despejado cuando $\varepsilon \geq 6.2$.

$$\varepsilon = \frac{(DHI + DNI / \cos z) \cdot DHI + 1.041 \cdot Z^3}{1 + 1.041 \cdot Z^3}$$

Inman et al. [25] aplicaron una metodología con 5 criterios para comparar una ventana deslizante de 10 minutos que contiene diez observaciones, a un modelo de cielo claro correspondiente para el mismo período, para las series de tiempo de *DNI*. Los umbrales para *DNI* fueron ligeramente relajados debido a la mayor variabilidad en las series temporales de observación de *DNI*. Nou et al. [26], [27] aplicaron un análisis multiresolución basado en la transformada de onda discreta para el mismo propósito utilizando también datos de 1 minuto. La señal se descompone en aproximaciones y detalles a través de filtros de paso bajo y de paso alto que resaltan cambios significativos en la *DNI* relacionados con la presencia de nubes.

Se necesitan series de *DNI* de alta resolución temporal para el diseño y evaluación de plantas *CSP*. Debido a la dificultad relativa de tener series temporales extensas, éstas son en algunos casos generadas sintéticamente. Cuando se modelan datos de *DNI* de alta resolución temporal, es particularmente relevante identificar periodos con irradiancia similar a la irradiancia de cielo claro para decidir si deben ser generadas perturbaciones en la radiación solar [28], especialmente en días con muy poca nubosidad, cuando la *DNI* puede mostrar fluctuaciones insignificantes [29].

Además de distinguir períodos claros y no claros, algunos autores también han clasificado el tipo de nube usando medidas de *GHI* y *DHI*. Calbó, Gonzalez y Pages utilizaron el índice de claridad, la fracción difusa y la variabilidad a corto plazo de la *GHI* para clasificar la nubosidad del cielo en categorías utilizando técnicas de clasificación supervisadas [30], [31]. Harrison, Chalmers y Hogan utilizaron *GHI* y *DHI* para determinar la cantidad de nubes y discriminar entre los tipos de nubes estratiformes y convectivas [32]. DeFelice y Wylie usaron un fotómetro solar de cuatro bandas colocado en tierra, para detectar y clasificar las nubes [33]. Otros métodos utilizan la variabilidad en una serie de tiempo de las mediciones de irradiancia para clasificar el período como claro utilizando métricas como el índice de variabilidad [34] o la probabilidad de persistencia [35]. Duchon y O'Malley utilizaron el índice de claridad media y la desviación estándar de la irradiancia en una ventana de 21 minutos para clasificar siete tipos de nubes [36]. Long y Ackerman [37] describen un enfoque detallado que comprende cuatro pruebas que utilizan *GHI* y *DHI* de modo que juntos detectan todos los escenarios de nubes.

Las condiciones de cielo despejado también pueden definirse utilizando instrumentos distintos de las mediciones de irradiancia. En los últimos años, la cobertura y los tipos de nubes se han tratado generalmente utilizando imágenes del cielo proporcionadas por satélites. Martínez-Chico et al. [38] definieron la condición del cielo por medio de los niveles de atenuación de la *DNI* que alcanza la superficie de la tierra. Las características más representativas del tipo de nube que producen cada condición del cielo se describieron

utilizando un generador de imágenes de cielo completo. Markou clasificó la condición del cielo sobre la base de datos de escaneo de luminancia del cielo. Dupont, Haeffelin y Long compararon los resultados de la detección de nubes mediante ondas cortas y radiación de onda larga y medidas de retrodispersión Lidar [39]. Hogan, Jakov e Illingworth calcularon la cobertura de las nubes utilizando un radar terrestre [40]. Marty y Philipona usaron la radiación de onda descendente de onda larga junto con la temperatura del aire y la humedad para detectar cielos claros durante el día y la noche [41]. Orsini et al. utilizaron la radiación de onda corta y la radiación de onda larga de para detectar el tipo de nube, la nubosidad y la altura de las nubes [42]. Más recientemente, se han utilizado imágenes de cielo para detectar nubes y clasificar su opacidad [43].

En este documento se presenta una metodología para la identificación de periodos con *DNI* de cielo claro equivalente sólo a partir de datos minutales de *DNI*, sin necesidad de utilizar otros dispositivos. El enfoque se realiza comparando las diferencias entre una selección de curvas medidas de cielo claro a lo largo de dos años de registros, y curvas medidas de días convencionales en años posteriores, lo cual devuelve resultados suficientemente válidos para cubrir el alcance en la posterior comparativa de modelos.

3 OBJETIVOS

Entre los distintos trabajos comparativos de modelos de cielo claro, no existen evidencias de que un modelo presente un mejor comportamiento en distintos climas y con diferentes datos de entrada. Un modelo determinado puede ajustarse mejor o peor en función de la localización, del periodo del año o de las condiciones climatológicas locales del emplazamiento. Por este motivo ocurre habitualmente que modelos muy simples y modelos más complejos pueden pertenecer a la categoría de “buenos modelos” en función de las características del estudio en cuestión.

Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una nueva metodología para la detección de instantes en condiciones de cielo despejado a partir de datos medidos en escala minutal, además de facilitar la elección del modelo de cielo claro que mejor se ajuste a las características de un emplazamiento cualquiera. Para ello se comparan estadísticamente datos registrados y modelados con cinco de los modelos de cielo claro de mejor rendimiento, en periodos seleccionados previamente por el algoritmo como de cielo despejado.

3.1 Detección de instantes claros

Se trata de presentar un algoritmo simple para identificar los periodos en los que no existen nubes entre el observador y el Sol, utilizando únicamente registros de *DNI* minutales. El algoritmo se basa en la caracterización de las relaciones entre la irradiancia directa de una selección de días completamente despejados y la irradiancia medida en días convencionales, partiendo para el cálculo de datos registrados en un periodo de cuatro años comprendido entre 2013 y 2016. La identificación de instantes de cielo despejado se basa en el cumplimiento de tres condiciones, donde los instantes se determinan como claros si entran dentro de una serie de límites establecidos para el valor del índice de claridad k_t' y para las diferencias de un instante a otro de los valores de k_t' y de la *DNI*, establecidos éstos dos últimos en función del ángulo cenital y del ángulo acimutal.

3.2 Comparación de modelos

Se seleccionan cinco de los modelos más comúnmente utilizados o de mayor interés para la evaluación de su rendimiento, comparando sus predicciones en condiciones climáticas idénticas. Para ello se parte de los instantes considerados en el algoritmo de detección como instantes de cielo despejado, y se calculan una serie de conocidos parámetros estadísticos que aportan una idea clara del ratio de error para cada uno de los modelos.

Adicionalmente se contrasta también cómo afectan los parámetros atmosféricos de entrada en un modelo simple (en este caso Bird) si éstos se consideran como valor constante aproximado o se modela con valores reales registrados, para cada instante seleccionado.

3.3 Desarrollo de una herramienta

En este trabajo se plantea el desarrollo de una herramienta ágil y efectiva que, a partir de datos de irradiancia solar registrada en un emplazamiento determinado, identifique periodos de cielo despejado y, a partir de dichos periodos, permita determinar qué modelo de cielo despejado es el más adecuado para caracterizar el recurso solar en el emplazamiento. Para ello se utiliza el entorno de desarrollo “R” junto con el complemento “R Studio”, de manera que cualquier usuario con conocimientos suficientes del entorno pueda plantear y solucionar el problema introduciendo previamente datos de irradiancia medidos junto con los parámetros atmosféricos de entrada requeridos por cada modelo.

4 METODOLOGÍA

El primer paso del proceso de comparación es la selección de los datos registrados con condiciones claras para que se emparejen con los datos modelados de cielo despejado. Los periodos de cielo despejado se extraen mediante un algoritmo de detección automatizado. Con estos periodos claros identificados, se evalúan cinco de los modelos más destacados de radiación en cielo despejado mediante el uso de indicadores estadísticos ampliamente utilizados. Finalmente, los resultados representativos se muestran gráficamente en para los dos sitios seleccionados.

4.1 Datos empleados

Un problema que ocurre durante la utilización de los modelos es la gran variedad de datos de entrada que los usuarios tienen a su disposición. Es muy habitual que el usuario tenga acceso a bases de datos que no cubren todos los parámetros de entrada necesarios de un modelo específico que se sabe que tiene un buen rendimiento. En este caso, el usuario debe elegir otro modelo que se ajuste a las bases de datos de entrada disponibles o, alternativamente, preparar parámetros de entrada a medida para ese modelo específico. Esta última solución a veces implica interpolación de datos (o incluso extrapolación) y se espera un menor rendimiento general debido a la inevitable propagación de errores.

El conjunto de datos de *DNI* y *GHI* reportados en este estudio se han tomado de 2 estaciones diferentes situadas en Carpentras y Tamanrasset. La distribución geográfica se muestra en la Figura 1. La latitud, longitud, altura y características climáticas de los sitios se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Lista con detalles de las estaciones de medida terrestres

Lugar	Carpentras (Francia)
Latitud	44.083° N
Longitud	5.059° E
Altura	100 metros
Clima	mediterráneo

Lugar	Tamanrasset (Argelia)
Latitud	22.790° N
Longitud	5.529° E
Altura	1400 metros
Clima	desértico

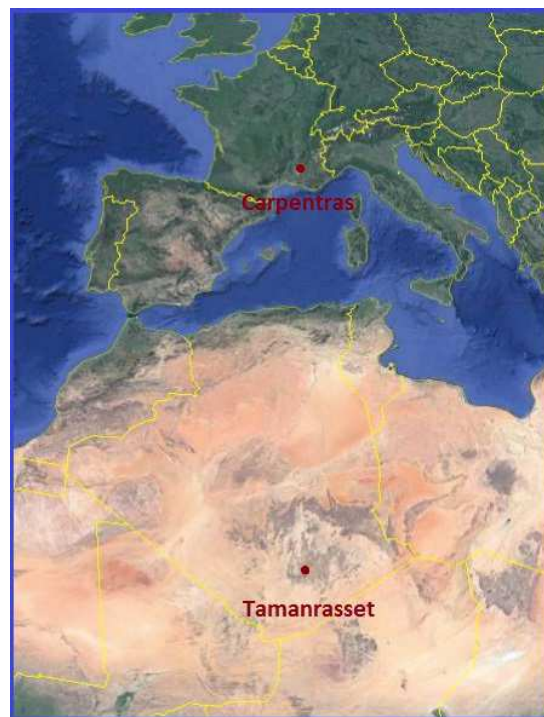


Figura 1 Mapa de las estaciones de medida terrestres. Fuente: Google Earth

Los datos han sido obtenidos a través de la *BSRN* [44]. *BSRN* es un proyecto del Panel de Datos y Evaluaciones del Experimento Mundial de Ciclo de Energía y Agua (*GEWEX*) bajo el paraguas del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (*WCRP*), destinado a detectar cambios importantes en el campo de radiación terrestre que puedan estar relacionados con el cambio climático. Los grupos de datos *DNI* en la

estación de Carpentras fueron medidos con pirheliómetros CH1 de Kipp & Zonen (ángulo de visión total: 5°, 95% de tiempo de respuesta: 7 s). En el caso de Tamanrasset fueron medidos con pirheliómetros Eppley NIP (ángulo de visión completo: 5°; tiempo de respuesta del 95%: 1 s). El conjunto de datos de GHI en Carpentras fue recogido con piranómetros CM21 de Kipp & Zonen pyranometers (tiempo de respuesta del 95%: 5 s). En Tamanrasset se usaron piranómetros Eppley PSP (tiempo de respuesta del 95%: 1 s). El procedimiento estándar de BSRN para la calibración del piranómetro considera el clima en el que se encuentra el piranómetro [45]. La coherencia de los datos fue verificada por los autores. Se aplicó una rigurosa calibración, caracterización y control de calidad en todos los datos por la persona a cargo de las mediciones para asegurar una alta precisión y homogeneidad en los datos [46]. El periodo de medición seleccionado para cada estación corresponde a cuatro años consecutivos, incluyendo aproximadamente $1,4 \cdot 10^6$ valores de 1 minuto de muestreo en cada emplazamiento.



Figura 2 Estación de medidas radiométricas situada en Tamanrasset, Argelia. Fuente: BSRN

Todos los modelos de radiación probados requieren de una serie de parámetros de entrada cuyo papel es describir la posición del lugar con respecto al Sol, además de las condiciones atmosféricas y ambientales locales y actuales (Tabla 2). Los parámetros utilizados en los modelos aquí estudiados son los siguientes:

- Ángulo cenital solar (Z): es el ángulo que forma la línea recta que une la Tierra con el Sol y la vertical. Es complementario a la altura solar.
- Ángulo acimutal solar (ψ): es el ángulo formado por la proyección del Sol sobre el plano del horizonte con la dirección Sur.
- Masa de aire óptica relativa (m): representa la cantidad de atmósfera que los fotones solares deben atravesar para llegar a la superficie de la Tierra. Depende directamente de Z , pero la mayoría de los modelos tienen en cuenta la geometría solar a través de m , en lugar de Z . Cada modelo recomienda el uso de una función específica $m = f(Z)$.
- Espesor óptico del aerosol atmosférico (AOD): es una medida de la niebla y los efectos de humo en la irradiancia que no son causados por las nubes. Las fuentes de AOD incluyen polvo, partículas, la contaminación del aire, el humo de los incendios forestales y la quema agrícola, y la sal marina (cerca de las costas). Se mide para diferentes longitudes de onda (λ) y se denomina como AOD_{380} cuando se mide a 380 nm, AOD_{500} cuando se mide a 500 nm y AOD_{700} cuando se mide a 700 nm.
- Albedo de superficie (ρ_g): cuantifica la fracción de la luz solar reflejada por la superficie de la Tierra.
- Ozono (O_3): expresa la cantidad presente de ozono en un perfil vertical de la atmósfera terrestre. Se mide en unidades Dobson (DU).

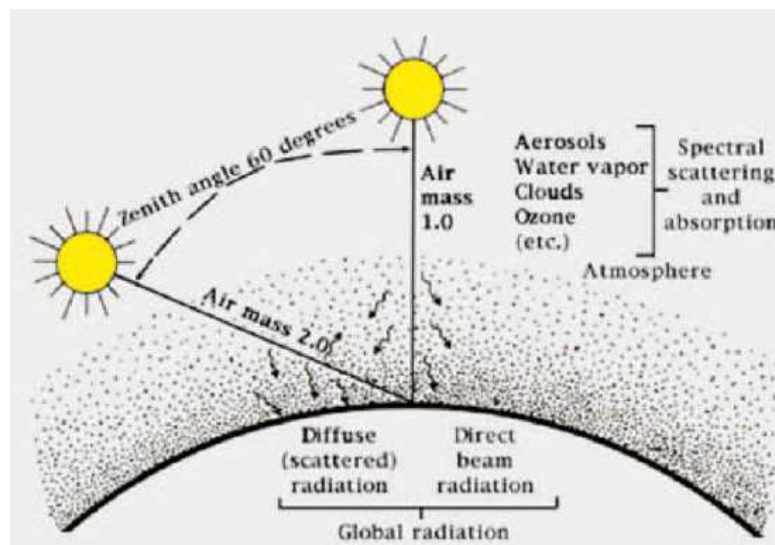


Figura 3 Parámetros que influyen en la radiación terrestre [74]

- Columna de vapor de agua (w): es el contenido total de vapor de agua en una columna atmosférica de superficie la unidad. Se expresa en términos de la altura que tendría la capa de agua si todo el contenido de vapor en la columna atmosférica se condensara y colectara en un recipiente con la misma superficie que la columna atmosférica. Normalmente se utiliza como unidad de medida el centímetro (cm).
- Dióxido de nitrógeno (NO_2): expresa la cantidad presente de dióxido de nitrógeno en un perfil vertical de la atmósfera terrestre. Normalmente se utiliza como unidad de medida el centímetro (cm).
- Turbiedad de Linke (T_L): es una medida de la atenuación de la atmósfera sin nubes. El coeficiente de turbidez de Linke representa el número de atmósferas limpias y secas que dan lugar a la misma atenuación que la atmósfera real sin nubes.
- Coeficiente de turbidez de Angstrom (β): método utilizado para caracterizar los efectos de atenuación por dispersión y absorción de los aerosoles atmosféricos.
- Espesor óptico de Rayleigh (δ_R): espesor óptico de una atmósfera de dispersión de Rayleigh² pura, por unidad de masa de aire, a lo largo de una longitud de trayectoria especificada. Como la radiación solar no es monocromática, el espesor óptico de Rayleigh depende de la trayectoria óptica exacta y por lo tanto de la masa de aire óptica relativa, m .

Algunos parámetros atmosféricos tienen grandes efectos sobre la irradiancia prevista, mientras que otros sólo tienen un efecto pequeño, por lo que es necesario realizar un análisis de sensibilidad y un análisis de incertidumbre para determinar qué parámetros deberían recibir la mayor atención. Tales análisis ya han sido reportados por algunos autores [10], [29], [47]. Estos estudios previos determinan que, en ausencia de nubes, la DNI se ve afectada principalmente por AOD y por w . La columna de vapor de agua puede estimarse fácilmente a partir de las mediciones en tierra de la temperatura del suelo (T_s) y de la humedad relativa (HR) con una precisión relativamente buena. Sin embargo, no es el caso del contenido de aerosoles atmosféricos que requiere fuentes de datos específicas. Esto también es generalmente cierto en el caso de la irradiancia difusa, aunque ρ_g puede convertirse en otro factor importante si es muy alto (por ejemplo, en caso de nieve), y la presencia de nubes, incluso con nubes pequeñas o delgadas, puede ser una perturbación grave. Por lo tanto, todos los instantes con presencia de nubes entre el observador y el Sol deben eliminarse para obtener resultados de rendimiento válidos. Otra dificultad es que el AOD cambia rápidamente en el tiempo y el espacio, y es difícil de predecir. Lo mismo ocurre con w , aunque con menor impacto ya que su influencia

² Dispersión de Rayleigh: fenómeno óptico que se refiere a la dispersión de la luz causada por las moléculas del aire en la atmósfera. Es la que le da el color azul al cielo.

sobre la *DNI* es menor. Por lo tanto, para estudios serios de validación es esencial obtener datos de *AOD* y w precisos a partir de mediciones realizadas en el lugar de estudio y con la misma frecuencia que los datos de irradiancia medidos que se utilizan como referencia. En el presente estudio, *AOD* para 380 y 500 nm se obtienen a partir de mediciones espectrales minutales de radiación directa a través de la red *AERONET* [45]. Para el resto de aerosoles y vapor de agua se utilizan datos modelados a través del proyecto *MACC* (Seguimiento de la composición atmosférica y del clima) [46].

Otras variables atmosféricas, como el albedo, el ozono, el dióxido de nitrógeno o la presión en el sitio, sólo tienen un impacto de segundo orden sobre la irradiancia [10] de modo que su exactitud es normalmente menos preocupante. Es habitual que no existan observaciones locales apropiadas disponibles para la mayoría de operaciones (especialmente las que operan en tiempo real). Para simular la situación más típica, se utilizan aproximaciones de datos estándar o valores climatológicos para estos parámetros atmosféricos. En este estudio, se utilizan datos con valores diarios de ρ_g obtenidos nuevamente a través del proyecto *MACC* [46]. En el caso de la turbiedad de Linke y el ozono, se utilizan datos mensuales obtenidos a través del portal intermediario *SODA* (Datos de radiación solar) [47], que a su vez se alimenta de datos proporcionados por la red *Meteotest* [48].

Debido a la disminución de precisión en los datos y a las pequeñas inconsistencias observadas en algunos modelos en elevaciones solares bajas, se decide descartar para la comparativa los datos obtenidos con elevaciones solares menores de 10° . Esto tiene además la ventaja de eliminar todos los riesgos de errores causados por el sombreado de obstáculos justo por encima del horizonte, pero también la desventaja de excluir sistemáticamente puntos de datos que usualmente se modelan con menor precisión. En sistemas de producción termosolar este hecho no supone ningún inconveniente ya que en la práctica las plantas no trabajan con elevaciones solares bajas.

4.2 Modelos

La mayoría de los modelos aquí expuestos ya han sido probados previamente, en algunos emplazamientos geográficos determinados, durante diferentes intervalos de tiempo y utilizando varios procedimientos de prueba. El presente documento utiliza mediciones de radiación "normales" y datos de entrada interpolados / extrapolados en el espacio y el tiempo para evaluar el desempeño real de modelos bajo condiciones no ideales. Los resultados se han presentado exclusivamente para el cálculo de la radiación directa.

Tal como se comentaba en el apartado 4.1, la estimación de la irradiancia de cielo despejado se realiza con la ayuda de datos auxiliares necesarios para el cálculo como columna de vapor de agua, cantidad de aerosoles, presión, dióxido de nitrógeno, etc. Cada modelo requiere unos parámetros atmosféricos de entrada distintos, por lo que, para mayor claridad, se muestra en la Tabla 2 un resumen de los mismos.

Tabla 2 Parámetros atmosféricos de entrada requeridos para todos los modelos considerados: ángulo cenital Z , espesor óptico del aerosol a 700 nm AOD_{700} , contenido atmosférico de nitrógeno NO_2 , columna de vapor de agua w , coeficiente de turbidez de Angstrom β , contenido atmosférico de ozono O_3 , presión P , albedo terrestre ρ_g y turbiedad de Linke T_L

Modelo	Z	AOD_{700}	NO_2	w	β	O_3	P	ρ_g	T_L
Bird	•	•		•	•	•	•	•	
ESRA	•						•		•
Solis									
Simplificado	•	•		•			•		
McClear	•	•		•	•	•		•	
REST2	•		•	•	•	•	•	•	

4.2.1 Modelo Bird

El modelo de cielo claro presentado en Bird y Hulstrom [49] es uno de los modelos más conocidos, simples y ampliamente utilizados en cielo despejado de la literatura [50]. Sus requerimientos incluyen el espesor óptico del aerosol, la columna total de vapor de agua (en cm) y la columna total de ozono (en cm), para calcular las transmitancias debidas a gases uniformes (T_v), dispersión de Rayleigh (T_R), ozono (T_O), aerosol (T_A) y vapor de agua (T_W). La expresión de DNI toma la forma:

$$DNI = E_{ext} \cdot \cos Z \cdot 0.9662 \cdot T_A \cdot T_W \cdot T_U \cdot T_O \cdot T_R \quad (1)$$

donde E_{ext} denota la conocida como constante solar o radiación extraterrestre (1367 W/m^2), corregida por el factor de corrección de la excentricidad de la Tierra. AOD se requiere a 700 nm , pero también puede ser calculada a partir de la atenuación espectral a 2 longitudes de onda comúnmente utilizadas por las redes meteorológicas: 380 y 500 nm .

$$AOD_{700} = AOD_{500} \cdot 0.35 + AOD_{380} \cdot 0.27583 \quad (2)$$

En este método la masa de aire óptica relativa se calcula como:

$$m = \frac{P}{1013} \cdot [\cos Z + 0.15 \cdot (93.885 - Z)^{-1.25}]^{-1} \quad (3)$$

Es habitual el uso de este modelo considerando valores constantes para los aerosoles, la columna total de ozono y la columna de vapor de agua. Con el fin de verificar la importancia de los parámetros de entrada en un modelo simple de cielo despejado, se analiza el comportamiento del modelo y su tendencia cuando se aplica introduciendo datos reales registrados en lugar de valores típicos constantes. Por este motivo de aquí en adelante se denota como “Bird” al modelo aplicado con valores constantes ($AOD_{380} = 0.1$, $AOD_{500} = 0.15$, $O_3 = 0.3 \text{ cm}$ y $w = 1.5 \text{ cm}$) y como “Bird Mejorado” al modelo aplicado con valores registrados o modelados en el emplazamiento considerado en cada caso (Sección 4.1).

4.2.2 Modelo ESRA

El modelo de cielo despejado ESRA se desarrolló en el marco del Atlas Europeo de Radiación Solar, fue presentado por Rigollier et al. [51] y se utilizó en el modelo de satélite Heliosat-2 [51], [52]. El modelo requiere como entrada principal la turbidez de Linke (con masa de aire igual a 2) para calcular la transmitancia de turbiedad de Linke (T_L) y utiliza una parametrización basada en la masa de aire óptica relativa para calcular el espesor óptico de Rayleigh (δ_R) [53]. DNI se obtiene como:

$$DNI = E_{ext} \cdot \exp(-0.8662 \cdot T_L(AM_2) \cdot m \cdot \delta_R(m)) \quad (4)$$

m expresa la relación de la longitud de trayectoria óptica del haz solar a través de la atmósfera y la trayectoria óptica a través de una atmósfera estándar al nivel del mar con el Sol en el cenit. A medida que la altura solar disminuye, aumenta la longitud de la trayectoria óptica relativa. La longitud de la trayectoria óptica relativa también disminuye al aumentar la altura de la estación por encima del nivel del mar, por lo que se aplica un procedimiento de corrección, obtenido como la relación de la presión atmosférica media (P), en la elevación del sitio, con respecto a la presión atmosférica al nivel del mar. Esta corrección es dada por Kasten y Young [54], donde γ_s^{true} se expresa en grados:

$$m(\gamma_s^{true}) = \frac{P/1013}{\sin(\gamma_s^{true}) + 0.50572 \cdot (\gamma_s^{true} + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (5)$$

El ángulo γ_s^{true} hace referencia a la altura solar corregida por la refracción.

El modelo ESRA es de particular importancia debido a su papel fundamental en la cartografía del recurso solar en Europa y en los países fronterizos. También constituye la columna vertebral de la rutina *r.sun* para el software de código abierto *GRASS-GIS* [55], [56]. Las prestaciones de *r.sun* se han utilizado para obtener mapas topográficos de la irradiancia solar sobre Europa y África [57]. Estas prestaciones también pueden servir para evaluar el potencial de las aplicaciones solares con alta resolución espacial [58].

4.2.3 Modelo Solis Simplificado

El modelo Solis original es un modelo de cielo despejado espectral desarrollado en el marco del proyecto Heliosat-3 [59] y basado en cálculos LibRadTran [60]. Para la aplicación a modelos de satélite, debido a la gran cobertura espacial, los cálculos de cielo despejado deben ser rápidos, cosa que no ocurre cuando se utiliza LibRadTran. Para aumentar la velocidad computacional, Ineichen desarrolló una versión Solis Simplificada de banda ancha [61], [62]. Esta versión simplificada del modelo Solis se utiliza ahora para evaluar las irradiaciones de cielo claro de los conjuntos de datos comerciales de radiación solar *SolarGIS*, que cubre ciertas partes del mundo [63]. La segunda versión [62] del modelo incluye tipos de aerosoles rurales, urbanos, marítimos y troposféricos [64]. El modelo requiere presión, espesor óptico del aerosol (en 700 nm) y columna del vapor de agua como parámetros de entrada. La irradiancia directa se calcula como:

$$DNI = E'_{ext} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_b}{\cos(\theta_z)^b}\right) \quad (6)$$

Donde τ_b es la profundidad óptica total directa, dependiente de *AOD*. El modelo es preciso y computacionalmente rápido.

4.2.4 Modelo McClear

McCclear es el modelo de cielo claro más reciente. Es un modelo completamente físico desarrollado por Mines Paris Tech [65] que reemplaza relaciones empíricas o modelos más simples utilizados anteriormente. El núcleo del modelo consiste en tablas de consulta calculadas con ayuda del modelo de transferencia radiativa LibRadTran [60] en un espacio de 10 dimensiones. Aprovecha los resultados recientes sobre las propiedades de los aerosoles y el contenido total de columnas de vapor de agua y ozono producidos por el proyecto MACC. Reproduce con precisión la irradiancia calculada por el modelo de transferencia radiativa de referencia LibRadTran con una velocidad computacional aproximadamente 105 veces mayor mediante la adopción del enfoque de ábacos, combinados con funciones de interpolación. Por lo tanto, es adecuado para la obtención de satélites geoestacionarios o esquemas numéricos de predicción del tiempo con muchos píxeles o puntos de rejilla, respectivamente.

La programación de este modelo es bastante más compleja que en el resto de modelos empleados en este documento y no se proporciona una metodología clara para su implementación en la documentación de los autores. Por este motivo, para este estudio se ha optado por la obtención directa de los datos modelados de 2015 y 2016 a través del servicio de radiación CAMS³.

4.2.5 Modelo REST2

La primera versión de REST, desarrollada por Gueymard [66] estaba limitada a la componente directa de la irradiancia de cielo despejado. REST2 es la versión de dos bandas del modelo REST, que utiliza las características generales de CPCr2 [66] con funciones de transmitancia actualizadas calculadas con el modelo espectral SMARTS [67] y utilizando la última distribución espectral extraterrestre y el valor de la constante solar. Es el único entre los modelos computados aquí, en que se separa en dos bandas que representan los componentes de banda ancha de dos series separadas de espectros. La estructura de REST2 hace una separación de bandas en 0.7 μm . La banda 1 cubre la radiación ultravioleta y visible desde 0.29 hasta 0.7 μm y está caracterizada por una fuerte absorción por el ozono en la radiación UV y una fuerte dispersión por moléculas y aerosoles en toda la banda. La banda 2 cubre el infrarrojo cercano, de 0.7 a 4 μm , y se caracteriza por una fuerte absorción por vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases, junto con dispersión limitada.

³ La investigación que conduce a estos resultados ha recibido financiación del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea (FP7/2007-2013) bajo la subvención nº. 218793 (proyecto MACC, 2009-2011), nº. 283576 (proyecto MACC-II, 2011-2014) y del programa H2020 de la Unión Europea (FP7/2007-2013) bajo acuerdo de subvención nº. 633080 (MACC-III project, 2014-2015). El servicio es parte del Servicio de Monitorización Atmosférica Copernicus (CAM5).

Para cada una de las dos bandas i , la irradiancia normal directa se obtiene como:

$$DNI_i = T_{Ri} \cdot T_{Ui} \cdot T_{Oi} \cdot T_{Ni} \cdot T_{wi} \cdot T_{Ai} \cdot E_{0ni} \quad (7)$$

Donde las irradiancias extra-atmosféricas a la distancia media Sol-Tierra son $E_{0n1} = 635.4 \text{ W/m}^2$ (o 46,51%) y $E_{0n2} = 709.7 \text{ W/m}^2$ (o 51,95%) en las dos bandas, respectivamente. T_{Ri} , T_{Ui} , T_{Oi} , T_{Ni} , T_{wi} y T_{Ai} son las transmitancias de banda para dispersión de Rayleigh, absorción de gases uniformemente mezclados, absorción de ozono, absorción de dióxido de nitrógeno, absorción de vapor de agua y extinción de aerosol respectivamente.

En lugar de una sola masa de aire para caracterizar la trayectoria de los rayos solares a través de la atmósfera, se utilizan las masas ópticas individuales m_R , m_U , m_O , m_w y m_A para la dispersión Rayleigh (molecular) y la absorción de gases uniformemente mezclados, absorción de ozono, absorción de vapor de agua y extinción de aerosoles, respectivamente. Todas se obtienen a partir del ángulo cenital Z .

REST2 es uno de los modelos que más entradas atmosféricas utiliza (Tabla 2). Los parámetros de entrada requeridos por el modelo son: presión del sitio (hPa), cantidad de ozono (atm - cm); cantidad de dióxido de nitrógeno total (atm - cm), agua precipitable (cm), y coeficientes de turbidez de Angström α_1 , α_2 y β , donde α_1 y α_2 son los respectivos valores de α para cada banda. En casos realistas α_1 , α_2 y β pueden derivarse de mediciones de irradiancia espectral (conducentes a AOD) de un número n de canales de aerosol discretos, usando la linealización de la ley de Angstrom:

$$\ln AOD_\lambda = \ln \beta_i - \alpha_i \cdot \ln \lambda \quad (8)$$

Donde λ es la longitud de onda en μm . Previamente se calcula β y α con la fórmula de turbiedad de Angstrom con los datos de AOD para dos longitudes de onda distintas:

$$AOD_\lambda = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (9)$$

Al contrario que otros modelos, REST2 también proporciona predicciones de iluminación de cielo claro y radiación fotosintéticamente activa, siendo uno de los modelos más flexibles en términos de especificidad de entrada. REST2 ha sido seleccionado para producir datos de radiación de cielo claro a nivel mundial para su uso en la construcción de cálculos de carga de enfriamiento [68], comenzando con la edición 2009 del Manual de Fundamentos de ASHRAE, apartado 4.1. Además, se está preparando una versión especial de REST2 como alternativa a la rutina actual *r.sun* para el software GRASS-GIS.

4.3 Detección de instantes claros

Se usa el término " DNI de cielo claro equivalente" para referirse a la DNI durante condiciones de cielo completamente despejado o DNI durante instantes donde no existen nubes entre el observador y el Sol. En adelante, DNI hará referencia siempre a ambas situaciones, siendo máxima a medio día solar local y cero en la noche.

La magnitud de la irradiancia directa depende de factores como la columna total de vapor de agua, el ozono o la cantidad de aerosoles presente, pero el factor principal que determina el valor en cualquier tiempo dado es el ángulo cenital. El acimut solar tiene también una influencia representativa en el tamaño y forma de las curvas, por lo que, en dos de las tres pruebas establecidas, se determinan los valores límite construyendo una matriz en función un ángulo acimutal y cenital determinado.

Otro parámetro importante de caracterización de curvas es el índice de claridad k_t , que se define como la irradiancia global horizontal normalizada por la irradiancia extraterrestre correspondiente:

$$k_t = \frac{GHI}{E_{ext} \cdot \cos Z} \quad (10)$$

Existe también un índice de claridad k_d que se calcula del mismo modo que k_t pero en base a DHI en lugar de GHI. El motivo por el cual el algoritmo de detección se caracteriza con k_t en lugar de k_d , es por la complejidad y la menor fiabilidad que supone la medición de la irradiancia difusa frente a las mediciones de global. Las medidas de irradiancia global son más precisas, más conocidas y su uso está más extendido en la literatura.

Este índice de claridad k_t tiene la desventaja de depender del ángulo de elevación solar, ya que, aunque su límite inferior no exhibe una variación notable para una elevación mayor que 10 grados, el límite superior (condiciones más claras) si es altamente dependiente de la elevación solar. Esto se debe a que el índice de claridad no tiene en cuenta el aumento de la absorción directa de radiación en función de la masa de aire óptica relativa. Por lo tanto, k_t no es un parámetro ideal para establecer las condiciones de irradiación máxima.

Esta limitación ya fue estudiada [69] y por ello se propuso un índice de claridad corregido:

$$k_t' = k_t / (1.031 \cdot \exp\left(-\frac{1.4}{0.9 + \frac{9.4}{m}}\right) + 0.1) \quad (11)$$

Este nuevo parámetro devuelve valores relativamente constantes, lo cual permite establecer unos límites superior e inferior y enmarcar los valores dentro de una banda limitada y mucho más independiente de la elevación solar, para elevaciones mayores de 10 grados.

Para determinar los periodos en los que la *DNI* es de cielo despejado, se usa una serie de tres pruebas que eliminan los datos registrados en presencia de nubes. Cada medición de un minuto se considera como clara sólo si se cumplen los valores umbral para los tres criterios de cielo despejado. Cada prueba de manera individual no es suficiente para determinar si el cielo está despejado o no, pero en conjunto se demuestra que todos los datos que superan todas las pruebas son representativos de cielo despejado. En apartados posteriores se comprobará, además, que muchos datos que pudieran considerarse dentro del conjunto de cielo despejado, queden excluidos por el procedimiento. En este estudio dicha situación no supone un problema grave ya que el objetivo final es la comparación de instantes de cielo despejado y salvo ciertas excepciones que se comentarán posteriormente, el conjunto de datos que supera los tres filtros lo son.

El método se realiza con registros de *DNI* y *GHI* minutales en los dos emplazamientos seleccionados para el estudio. En ambas localizaciones se utilizan datos comprendidos desde enero de 2013 hasta diciembre de 2014 de días totalmente despejados, que han sido seleccionados mediante una minuciosa observación de curvas diarias de *DNI*, para generar los valores umbrales que delimitan las condiciones que debe cumplir un instante para considerarse como claro. El motivo por el cual en este estudio se usan registros de dos años completos en la selección de días totalmente despejados es garantizar la existencia de un mínimo de registros válidos para cada mes, y obtener así resultados más coherentes de un mes con respecto a otro. Una vez obtenidos con esos datos los valores límite, se utilizan registros desde enero de 2015 hasta diciembre de 2016 para seleccionar dentro de este periodo instantes considerados como de cielo despejado y descartar los que no lo son en la posterior comparativa de modelos. Los criterios utilizados son tres:

1. Límite k_t' .
2. Incrementos en k_t' .
3. Incrementos en *DNI*.

Las tres pruebas se realizan exclusivamente con datos registrados y dependen del emplazamiento seleccionado por lo que es necesario disponer de al menos un par de años con registros minutales para poder aplicarlo.

4.3.1 Límite k_t'

El primer criterio implica la comparación minutal de valores de k_t' de días en los que se quiera aplicar la detección de instantes claros, con respecto al percentil 0.06 de k_t' mensual de un conjunto de días seleccionados como completamente despejados. Esto significa que, con los datos seleccionados de días completamente despejados de los dos primeros años de registros, se calcula el percentil 0.06 para cada mes sobre el índice k_t' para su posterior comparación con valores k_t' de los datos de los dos últimos años. Esto implica la imposición de un límite inferior mensual por el cual todos los instantes comparados que queden por debajo de ese valor, serán automáticamente descartados.

Por tanto, dado un mes cualquiera j , el instante i del mes j se considera como claro en el primer criterio si su valor $k_{t,i,j}'$ es mayor al percentil 0.06 establecido como límite en ese mismo mes j .

4.3.2 Incrementos en k_i'

El segundo paso consiste en construir una matriz con límites de diferencias de k_i' en función del acimut y la elevación solar, para posteriormente descartar los instantes que establezcan diferencias mayores a esos valores límite. Para construir la matriz se parte nuevamente de los registros de 2013 y 2014 de días completamente despejados a los que previamente se ha calculado el índice k_i' . Para cada instante se calcula la diferencia absoluta entre el índice k_i' de ese instante i con respecto al índice del instante inmediatamente anterior ($i-1$). Es importante destacar que sólo se consideran instantes correlativos en el espacio temporal para construir la matriz. Esa diferencia se clasifica en función del acimut y de la elevación al cual pertenece el instante y se establece como valor límite en la matriz si es la mayor entre todas las diferencias calculadas con acimut y elevación solar coincidentes. Una vez construida la matriz, los instantes de 2015 y 2016 seleccionados en el primer criterio se consideran nuevamente como claros si la diferencia entre el índice k_i' de ese instante con respecto al anterior es menor que la establecida en la matriz para el mismo valor de acimut y elevación. El resto de instantes que no cumpla con el criterio se descartan.

4.3.3 Incrementos en DNI

El tercer criterio es exactamente igual al segundo pero basado en diferencias de DNI en lugar de diferencias de k_i' . La matriz se construye nuevamente con los datos de días completamente despejados. Los registros considerados tras el algoritmo como de cielo despejado deberán tener diferencias de DNI con respecto al instante anterior inferiores a las establecidas en la matriz de límites, en función del acimut y de la elevación, tras haber sido considerados como claros previamente en los dos pasos anteriores.

4.4 Indicadores estadísticos

Para obtener resultados satisfactorios en las métricas de rendimiento, es evidente que la comparación entre la información evaluada (modelos) y la referencia (registros) sólo debe incluir puntos de datos comparables y ser proporcional. Esto es relativamente fácil de conseguir cuando se utilizan datos instantáneos como son los registros con intervalos de tiempo de 1 minuto. Las estimaciones de cielo despejado de cada uno de los modelos se calculan para todo instante en que se detectan períodos de cielo despejado en los registros, y para cada uno de los dos emplazamientos bajo estudio. En cada modelo, las estimaciones se comparan con la radiación medida para instantes temporales coincidentes, usando seis métricas distintas de error.

En lo que sigue, se nombrará como o_i al instante i registrado y p_i al instante i modelado. Los valores medios de las dos distribuciones (cada una con un total de N puntos) se nombrarán como O_m y P_m respectivamente.

Los indicadores estadísticos que se usan en este documento se clasifican en indicadores de dispersión, indicadores de similitud de distribución e indicadores de comparación global.

4.4.1 Dispersión

Todos los indicadores de dispersión se expresan en porcentaje en lugar de en unidades absolutas ya que así es más fácil de entender para los usuarios menos expertos. En cualquier caso, multiplicar por el valor medio de los datos en todos los resultados permite obtener los valores absolutos en lugar de porcentajes.

Dentro de los indicadores de dispersión se han seleccionado la desviación media (MBD), la raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$) y la desviación estándar (SD) debido a su uso frecuente en muchos otros estudios de validación. Por este motivo, el uso de estos indicadores permite que los resultados sean directamente comparables a los realizados en otros lugares.

MBD muestra la diferencia relativa entre los registros y el modelo, $RMSE$ presenta las fluctuaciones entre registros y datos modelados (medida de precisión) y por último SD indica la desviación con respecto a la media de los datos. Se calculan como:

$$MBD = \frac{100}{O_m} \cdot (O_m - P_m) \quad (12)$$

$$RMSE = \frac{100}{O_m} \cdot \left[\sum_{i=1}^{i=N} \frac{(p_i - o_i)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$SD = \frac{100}{O_m} \cdot \left[\sum_{i=1}^{i=N} N \cdot (p_i - o_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{i=N} (p_i - o_i) \right)^2 \right]^{1/2} / N \quad (14)$$

Es importante tener en cuenta que para que los resultados sean coherentes en el cálculo de *MBD*, se considera que el error reportado es el relativo al valor medio de los datos.

4.4.2 Similitud de distribución

El objetivo de los indicadores de similitud de distribución es comparar una o más distribuciones de frecuencia acumulada de datos modelados con la de un conjunto de datos de referencia o registrados. Con el fin de poder comparar diferentes funciones de distribución acumulativa (*CDFs*), se desarrolló el método denominado como test integral de Kolmogorov-Smirnov (*KSI*) [70] en tanto por ciento, definido como:

$$KSI = \frac{100}{A_c} \cdot \int_{X_{min}}^{X_{max}} D_n \cdot dx \quad (15)$$

donde D_n es la diferencia absoluta entre las dos distribuciones normalizadas dentro del intervalo de irradiancia n , X_{min} y X_{max} son los valores mínimo y máximo del conjunto de datos de irradiancia x , y A_c es una cantidad característica de la distribución, tal que:

$$A_c = D_c \cdot (X_{max} - X_{min}) \quad (16)$$

donde el valor crítico D_c es una característica estadística de la distribución de referencia, definida en función del número de valores N :

$$D_c \approx 1.63/N^{1/2} \quad (17)$$

El mínimo valor del índice *KSI* es cero, que significa que las funciones de distribución acumulada de los dos conjuntos de datos comparados son iguales.

Derivado del indicador *KSI* se utiliza también el estadístico *OVER*, que describe la frecuencia relativa de las situaciones de exceso, cuando la distribución normalizada de los puntos de datos modelados en contenedores específicos excede el límite crítico que haría estadísticamente indistinguible de la distribución de referencia. Este parámetro genera dos tipos de resultados: los conjuntos que se comportan estadísticamente similares y los que no lo hacen. Esta es una ventaja comparada con los resultados suministrados por los parámetros de dispersión, que no dan información sobre la distribución de dos conjuntos de datos. El indicador *OVER* en porcentaje se obtiene como:

$$OVER = \frac{100}{A_c} \cdot \int_{x_0}^{x_1} \max(D_n - D_c, 0) \cdot dx \quad (18)$$

OVER es 0 si la distribución normalizada permanece siempre por debajo de D_c .

Espinar et al. [70] aplicó esta técnica a la validación de un conjunto de datos de radiación global derivados de satélites contra 38 estaciones radiométricas en Alemania. Es interesante señalar que las estaciones donde el *MBD* y el *RMSD* fueron más pequeños no fueron necesariamente las que tuvieron el menor *KSI* o *OVER* y viceversa. *OVER* fue nulo en 34 de las 38 estaciones, lo que indica que el conjunto de datos derivados del satélite estaba respetando la distribución de la irradiancia global sobre la mayor parte de Alemania. Este ejemplo demostró que el uso de *KSI* y *OVER* ofrece un tipo diferente de información que los indicadores más

convencionales, y también puede ser más discriminante (sobre todo en el caso de *OVER*).

4.4.3 Global

Gueymard [50] mejoró el cálculo de D_c , por la Ec. (17), y propuso un Índice de Desempeño Combinado (*CPI*) tal que:

$$CPI = (KSI + OVER + 2 \cdot RMSD)/4 \quad (19)$$

donde todos los valores se expresan en porcentaje. El interés del *CPI* es que combina la información convencional sobre dispersión y sesgo (a través de *RMSE*) con información sobre la similitud de distribución (a través de *KSI* y *OVER*), manteniendo un alto grado de discriminación entre diferentes modelos. Esta última característica es muy deseable cuando se comparan diferentes modelos de rendimiento similar. Actualmente hay muchos autores que piensan que, si se tuviera que seleccionar un solo indicador estadístico para comparar el rendimiento de los modelos, la mejor opción sería *CPI*.

4.5 Herramienta R

El desarrollo de la herramienta para la comparación de modelos se realiza con un lenguaje de programación basado en *R* [71]. *R* es un entorno de software libre para la computación estadística y el desarrollo de gráficos. Compila y ejecuta en una amplia variedad de plataformas, como Linux, Windows y MacOS. *R* además dispone de un paquete adicional *R Studio* [72] que simplifica y facilita el manejo del entorno de trabajo para usuarios menos avanzados.

Se ha seleccionado este entorno de programación por ser de acceso libre a cualquier usuario además de ágil y de gran utilidad para el desempeño de la herramienta en estudio en este documento.

5 RESULTADOS

Se parte de registros minutales desde enero de 2013 hasta diciembre de 2016 de dos sitios distintos: Carpentras (Francia) y Tamanrasset (Argelia). Para establecer los valores límite en el método de detección de instantes claros se utilizan los registros de los dos primeros años de datos, seleccionando mediante una minuciosa observación los días considerados como totalmente despejados. Un ejemplo de los días seleccionados en ambos emplazamientos se muestra en la Figura 4. Los datos utilizados en el estudio estadístico excluyen condiciones de baja elevación solar debido a que no tienen implicaciones en la producción termosolar. Todo el estudio está basado en registros con elevaciones de entre 10° y 90° . Cabe destacar que, en los registros de meses invernales, se alcanzan máximos en registros de *DNI* de hasta 226 W/m^2 más en Tamanrasset que en Carpentras, alcanzando en enero valores límite de hasta 1118 W/m^2 . Debido a su elevación relativamente alta, en Tamanrasset a menudo se registran espesores ópticos de aerosol y columnas de vapor de agua muy bajas. Sin embargo, en la región son frecuentes las tormentas de arena, lo que aumenta considerablemente *AOD* sobre una base más o menos regular. Esto hace que la magnitud de *AOD* sea en gran medida variable, y muy alta en algunas ocasiones. Aún así, el potencial del recurso solar en este emplazamiento es mucho mayor a lo largo del año que en Carpentras ya que tiene un clima desértico y por tanto generalmente con menor cobertura de nubes, frente al clima mediterráneo de Carpentras. Por este motivo lo habitual es que se registren mayor número de días con cielo completamente despejado en Tamanrasset que en Carpentras y por tanto más instantes de cielo claro a evaluar tras el procedimiento de detección.

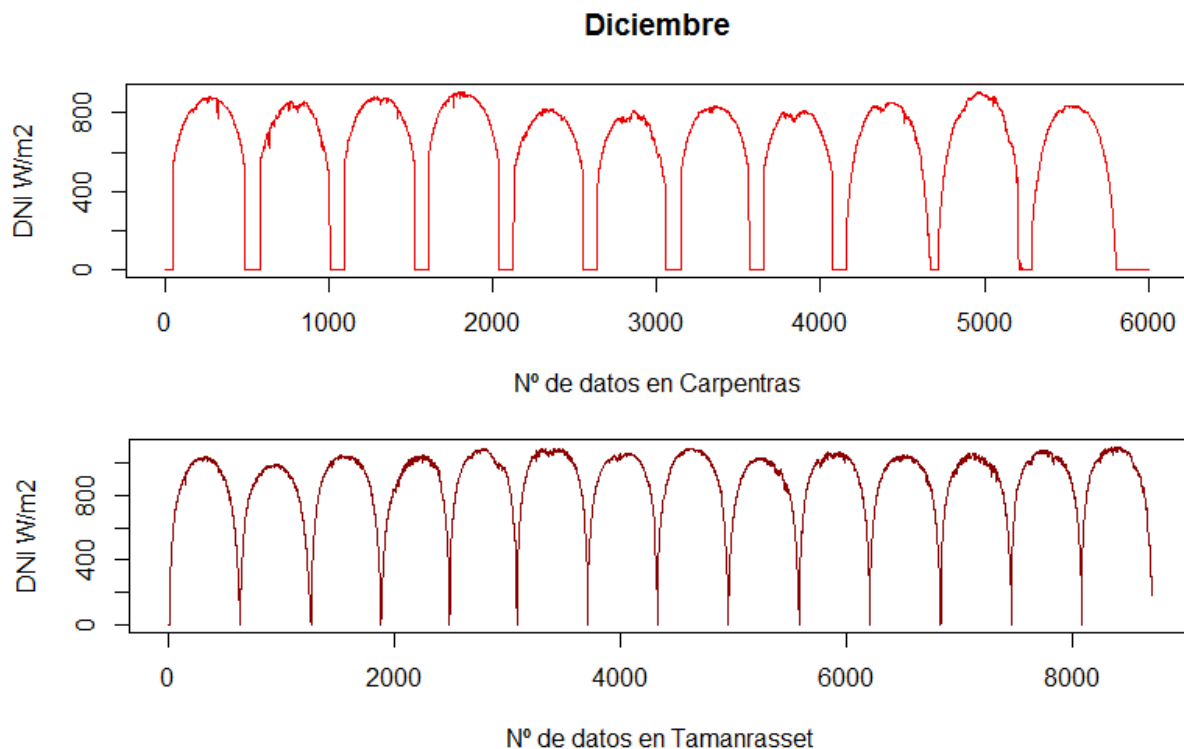


Figura 4 *DNI* de días claros seleccionados en diciembre de 2013 y 2014 en Carpentras y Tamanrasset

Para la posterior detección y comparación de instantes con cielo despejado se utilizan registros de años completos en 2015 y 2016 de ambos sitios. En las Figuras 5 y 6 se muestra a modo de ejemplo la *DNI* de los meses completos de julio y diciembre de 2015, donde se puede apreciar la gran diferencia existente entre el clima en una y otra ciudad en periodo estival e invernal.

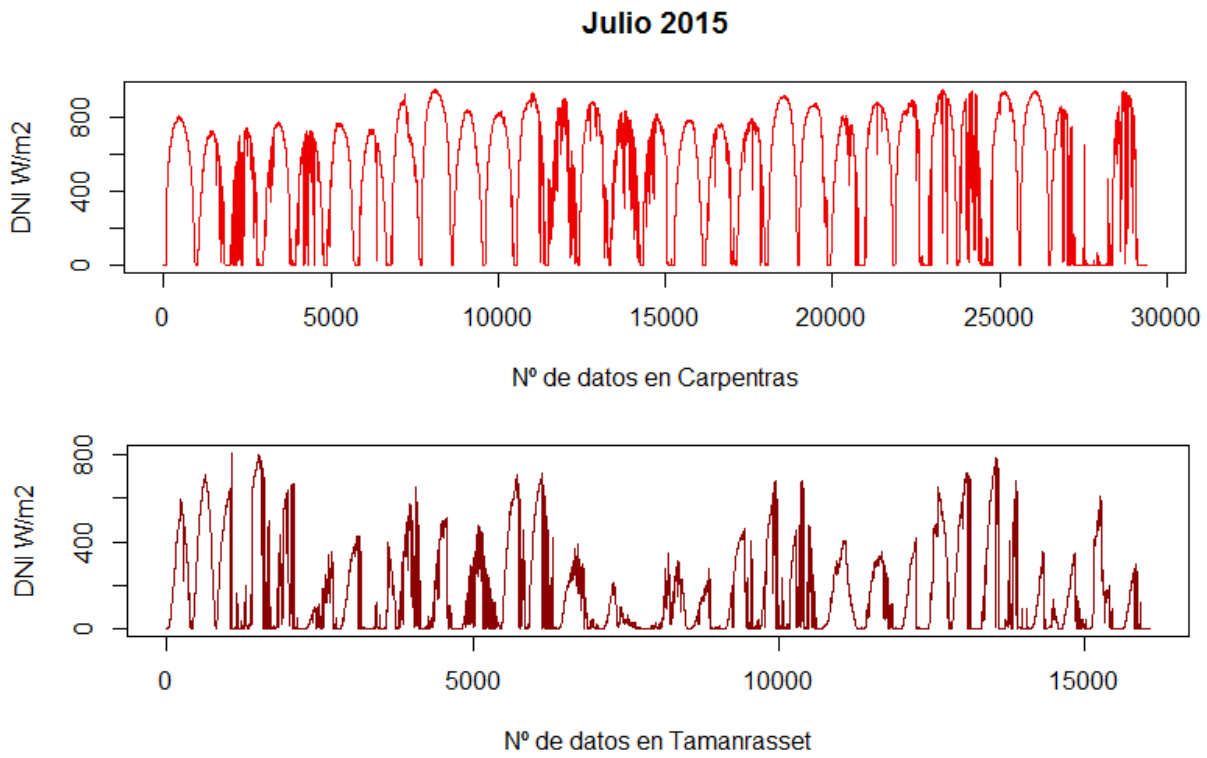


Figura 5 *DNI* en Carpentras y Tamanrasset en julio de 2015

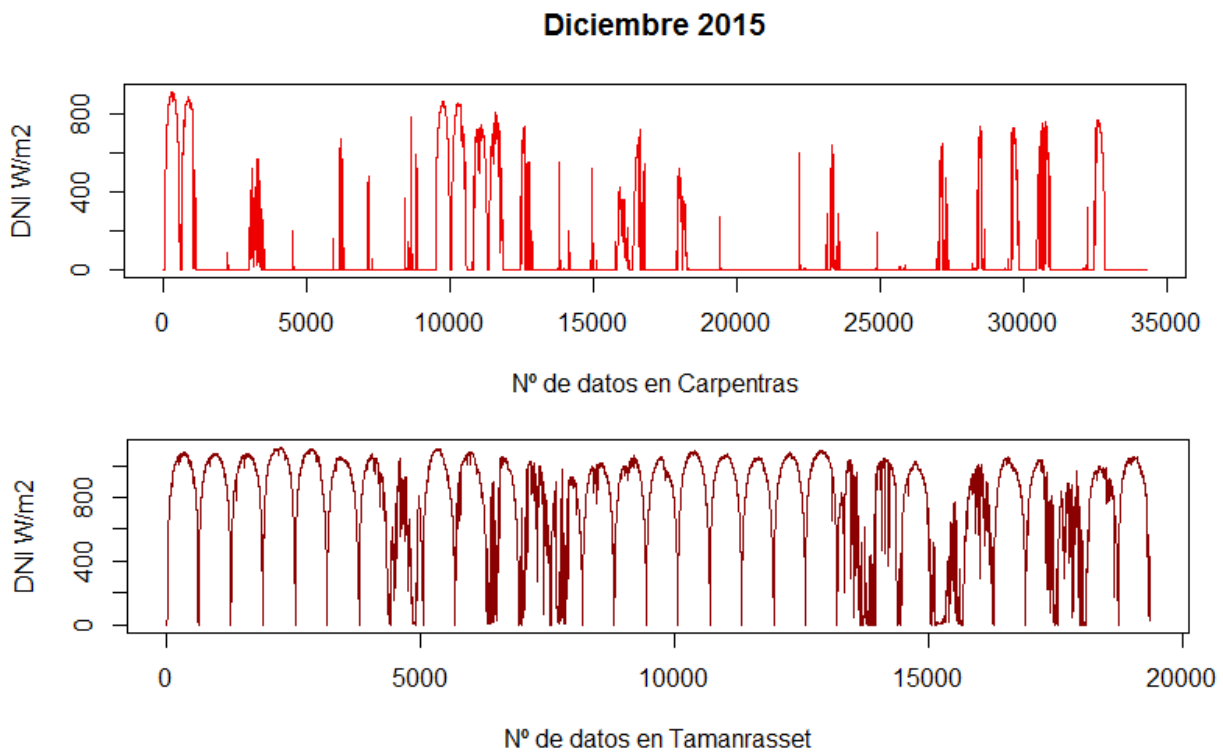


Figura 6 *DNI* en Carpentras y Tamanrasset en diciembre de 2015

En el método de detección de instantes claros se parte del índice de claridad corregido k_t' . El motivo de la elección del índice corregido es que, al contrario de k_t , devuelve valores relativamente constantes para elevaciones solares mayores a 10° que permiten caracterizar las curvas y establecer posteriormente un límite inferior del mismo en el método.

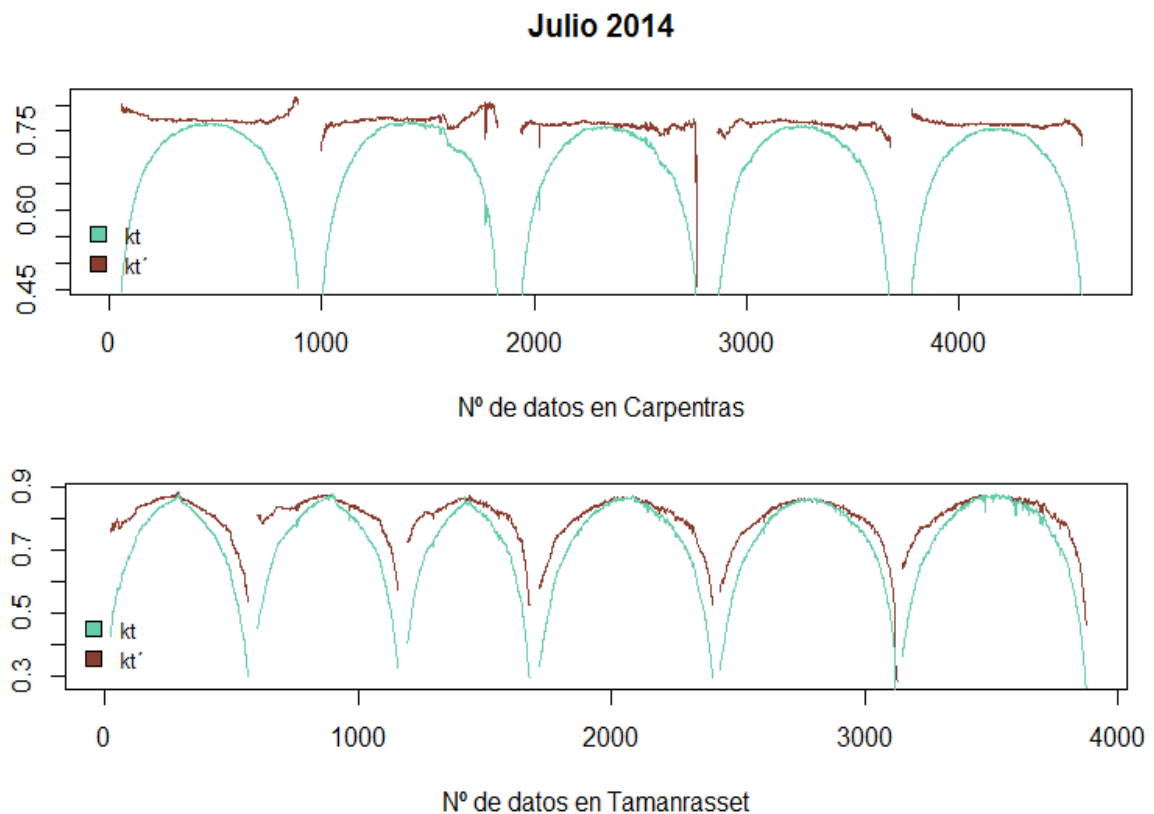


Figura 7 k_t y k_t' en días despejados de julio de 2014 en Carpentras y Tamanrasset

En la Figura 7 se puede comprobar como en días completamente despejados, en Tamanrasset se registran valores de k_t' mayores pero más variables a lo largo del día. Esta tendencia es aún más notable si se observan los valores mensuales (Figura 8), donde para el mismo mes, Carpentras muestra curvas mucho más estables y regulares de k_t y k_t' que Tamanrasset. Esto se debe a que, para esa época del año, los días en Tamanrasset son mucho más irregulares en cuanto a registros de *DNI* y *GHI* se refiere que en Carpentras, como se podía apreciar en la Figura 5, debido a la gran presencia y variabilidad de las condiciones atmosféricas, y en especial de los aerosoles. Ocurre algo parecido pero a la inversa en meses invernales, ya que en ese periodo es en Carpentras donde se registran mayores irregularidades en registros de *DNI*, por la presencia mucho más continua de nubes en la zona de estudio.

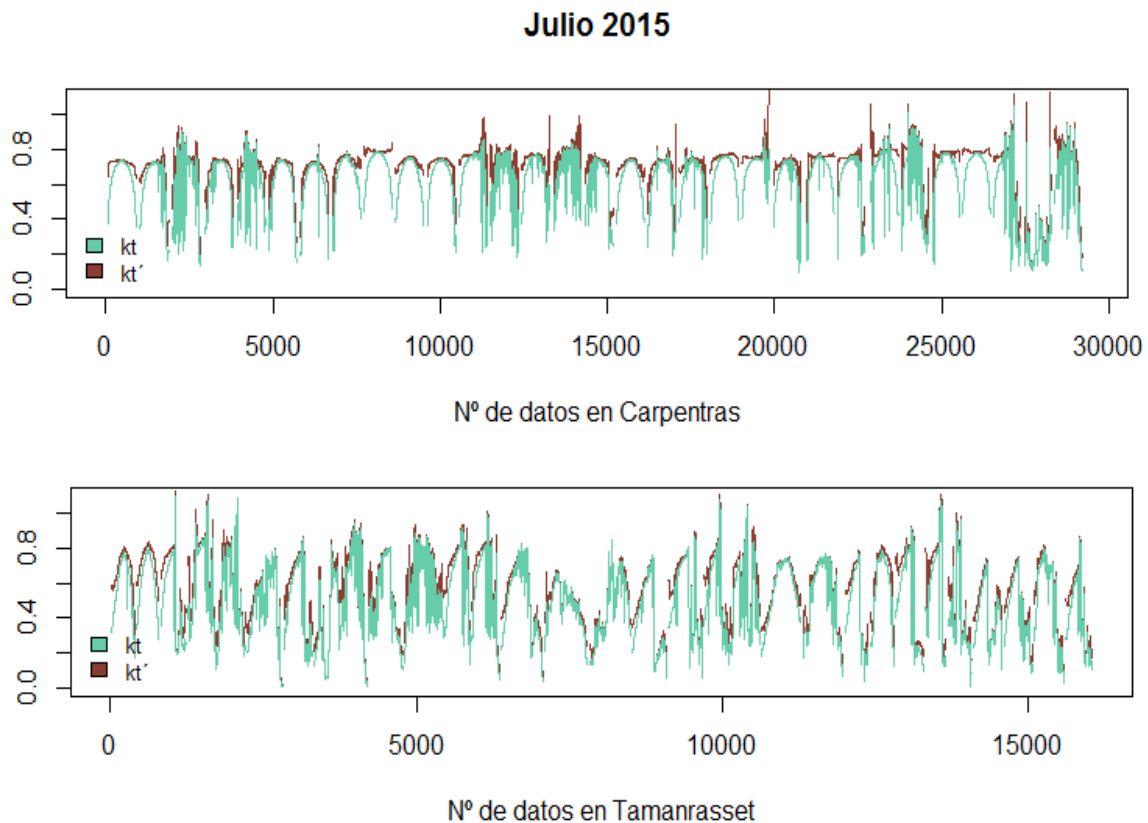


Figura 8 k_t y k_t' en el mes completo de julio de 2015 en Carpentras y Tamanrasset

5.1 Detección de instantes claros

El primer paso del proceso de validación de modelos es la selección de los datos medidos en condiciones de cielo despejado. La posterior estimación de cielo claro en cada uno de los modelos se calcula para todos esos instantes en que se detectan períodos de cielo despejado. Para ello el algoritmo de detección, descrito en la sección 4.3, parte de registros de 2013 y 2014 de *DNI* y *GHI*. A partir de registros de días seleccionados visualmente como completamente despejados en esos dos años, se calcula el índice de claridad corregido y se establece un límite a partir del percentil 0.06 mensual de cada conjunto de datos. El motivo de la elección del percentil 0.06 en lugar de cualquier otro es que, tras realizar varias pruebas de comportamiento con percentiles desde 0.01 hasta 0.1, se comprobó que 0.06 es el que devolvía mejores resultados en el filtrado de datos. Un ejemplo de este límite se muestra en la Figura 9 para cada uno de los sitios.

El planteamiento inicial del algoritmo también contemplaba el establecimiento de un límite superior de k_t' para enmarcar dentro de una franja los instantes que en primera instancia iban a ser considerados como claros, pero tras varias pruebas de comportamiento se decidió descartar esta hipótesis por no reportar resultados satisfactorios.

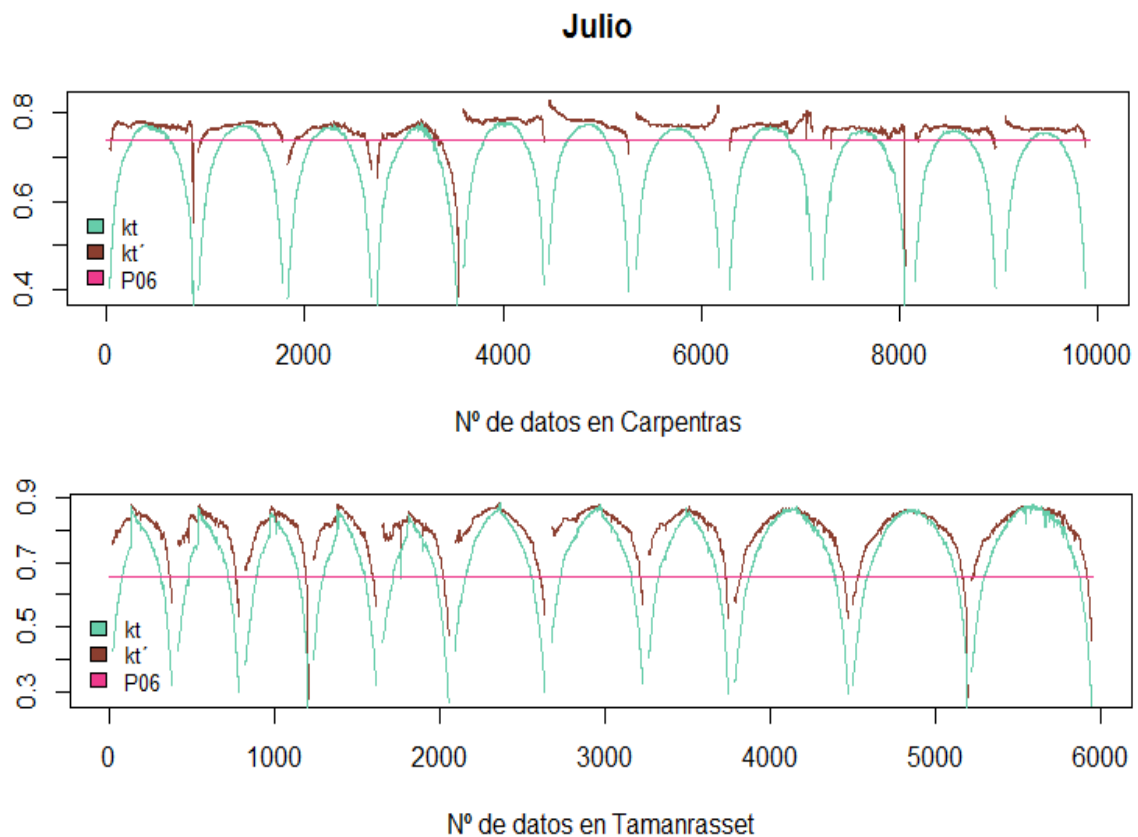


Figura 9 k_t , k_t' y percentil 0.06 en días despejados de julio de 2013 y 2014 en Carpentras y Tamanrasset

El límite en el valor mínimo de k_t' constituye el primer paso en el método de selección de instantes de cielo despejado ya que todos los periodos registrados en 2015 y 2016 que en función del mes, queden por debajo del mismo, serán automáticamente descartados para la posterior comparativa. Un ejemplo de esta criba para el mismo mes de Julio se muestra en la Figura 10, donde se observa como el número de periodos descartados por el límite en Tamanrasset es mucho mayor que en Carpentras. Esto concuerda con lo que vimos anteriormente en la Figura 5, ya que se registran muchos más periodos en presencia de nubes ese mes en Tamanrasset que en Carpentras.

Aplicando este paso se hace un primer barrido de instantes con periodos nublados o parcialmente nublados, que aunque no es suficiente, si es bastante eficaz a la vista de los resultados. La Figura 11 muestra un ejemplo de días prácticamente despejados (columna izquierda) y prácticamente nublados (columna derecha) para días aleatorios en Carpentras (primera fila) y Tanmarasset (segunda), donde se pintan con círculos grises los instantes que superan el primer filtro del método y con una línea roja el registro de *DNI*. En este ejemplo la mayor parte de los instantes en presencia de nubes quedan descartados, aunque no la totalidad de los mismos. Esto justifica la necesidad de añadir un segundo paso de verificación, que complementa al primero, para filtrar de manera más exhaustiva la presencia o ausencia de instantes con nubes en los registros.

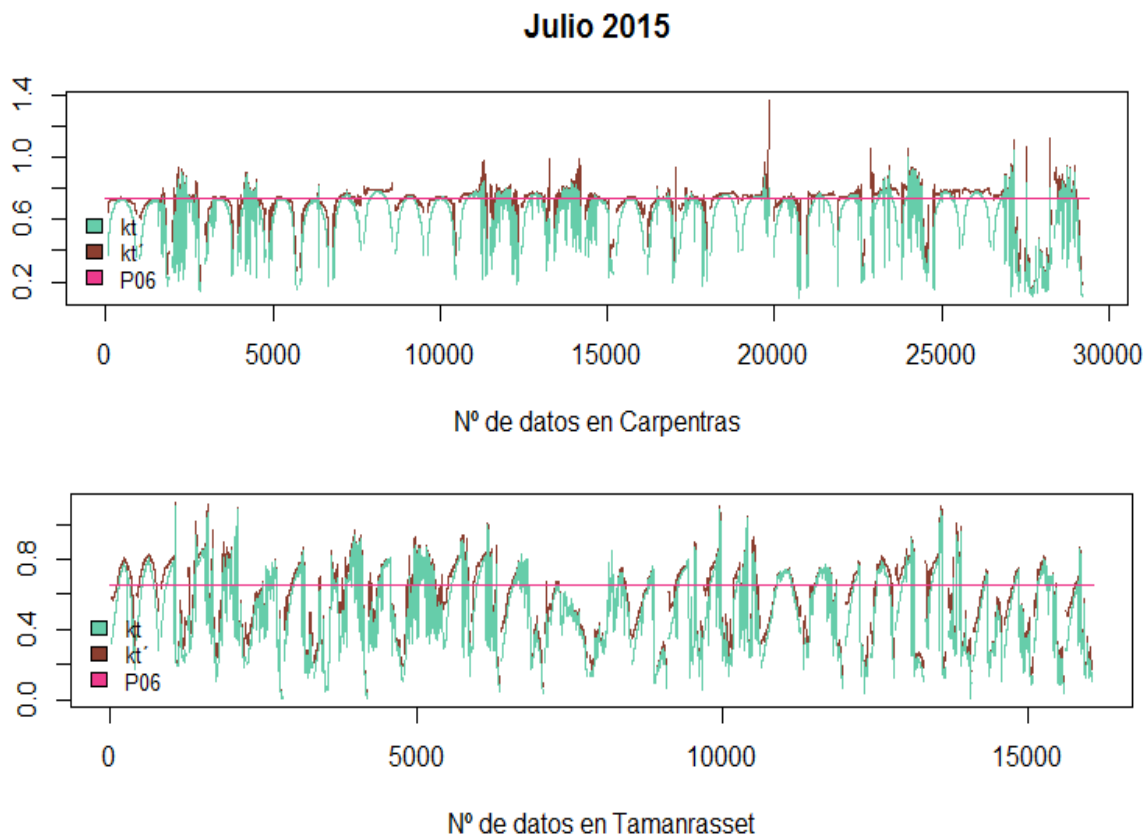


Figura 10 k_t , k_t' y percentil 0.06 en el mes completo de julio de 2015 en Carpentras y Tamanrasset

Los instantes seleccionados en el primer filtro se vuelven a considerar como de cielo despejado si su diferencia o salto de k_t' con respecto al instante anterior, es menor a la establecida como límite para la misma elevación solar y acimut en días completamente despejados de los dos primeros años. Este criterio se establece por la fuerte dependencia que muestran los registros de *DNI* ante el ángulo de elevación solar, y de manera menos significativa pero también importante ante el ángulo acimutal solar. Debido a que la escala temporal de los registros está en base minutal, se espera que de un instante al siguiente no exista gran diferencia entre valores de *GHI* o en su defecto de k_t' mientras se mantengan periodos de cielo claro, no siendo así para instantes en presencia de nubes. Esto justifica el segundo paso en el método de detección, junto a que como se puede comprobar en la Figura 12, efectivamente el segundo filtro elimina muchos de los instantes con presencia de nubes que en el paso anterior pasaban desapercibidos.

Tras comprobar los resultados en el segundo filtro, se hace necesario y se justifica establecer un paso más en el algoritmo de detección de instantes claros con la finalidad de reducir al mínimo el error en el mismo, ya que siguen apareciendo ciertos puntos que de manera visual claramente se clasifican como en presencia de nubes, pero sin embargo el método sigue sin detectar como tales.

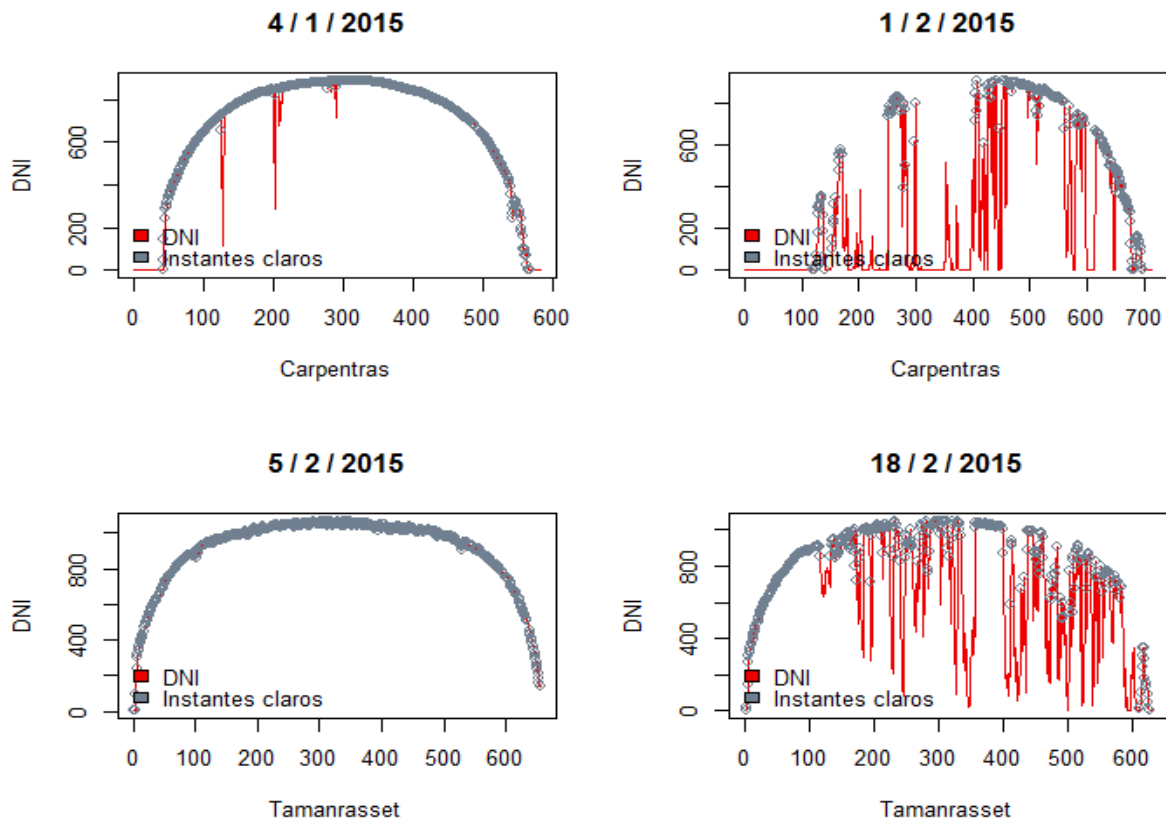


Figura 11 Instantes de cielo despejado tras pasar el primer filtro del método de detección

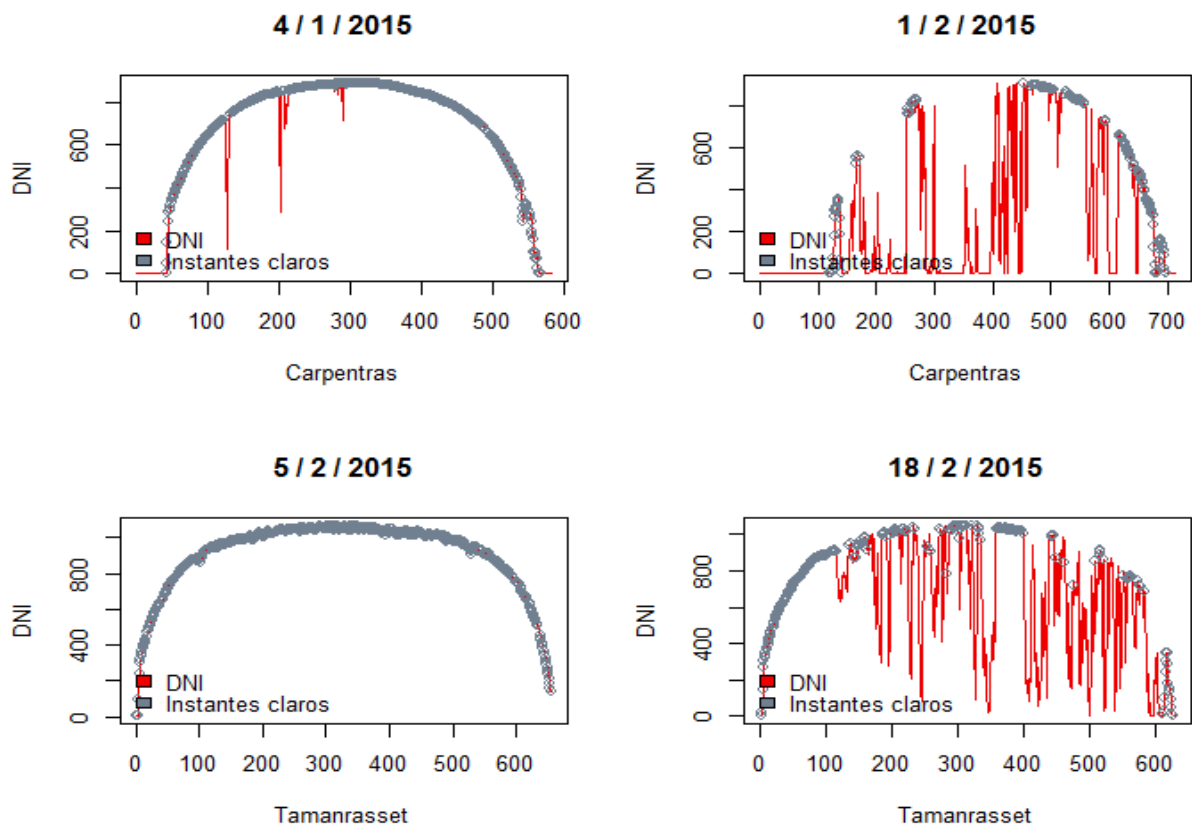


Figura 12 Instantes de cielo despejado tras pasar el segundo filtro del método de detección

El tercer y último paso en el algoritmo de detección se realiza de manera similar al anterior pero en función de incrementos en *DNI*. Este último paso es capaz de eliminar nuevamente ciertos instantes con registros tomados en presencia de nubes que tras el filtro 1 y 2 seguían pasando desapercibidos al método (Figura 13).

Es importante destacar que, aunque en la representación se muestran todos los instantes que cumplen las condiciones del método de detección, en la posterior comparativa estadística de modelos sólo se consideran los instantes que además de considerarse como de cielo despejado por el algoritmo, tengan elevaciones solares mayores de 10° . Este criterio se establece debido a las pequeñas inconsistencias de datos observadas en algunos modelos de cielo claro para elevaciones solares bajas, unido a que el mayor aprovechamiento del recurso solar se produce en elevaciones mayores. Por tanto, descartar todos los instantes con elevaciones solares bajas para la comparativa no supone gran diferencia al resultado final a la hora de elegir un modelo de cielo despejado u otro, que es el objetivo final del trabajo.

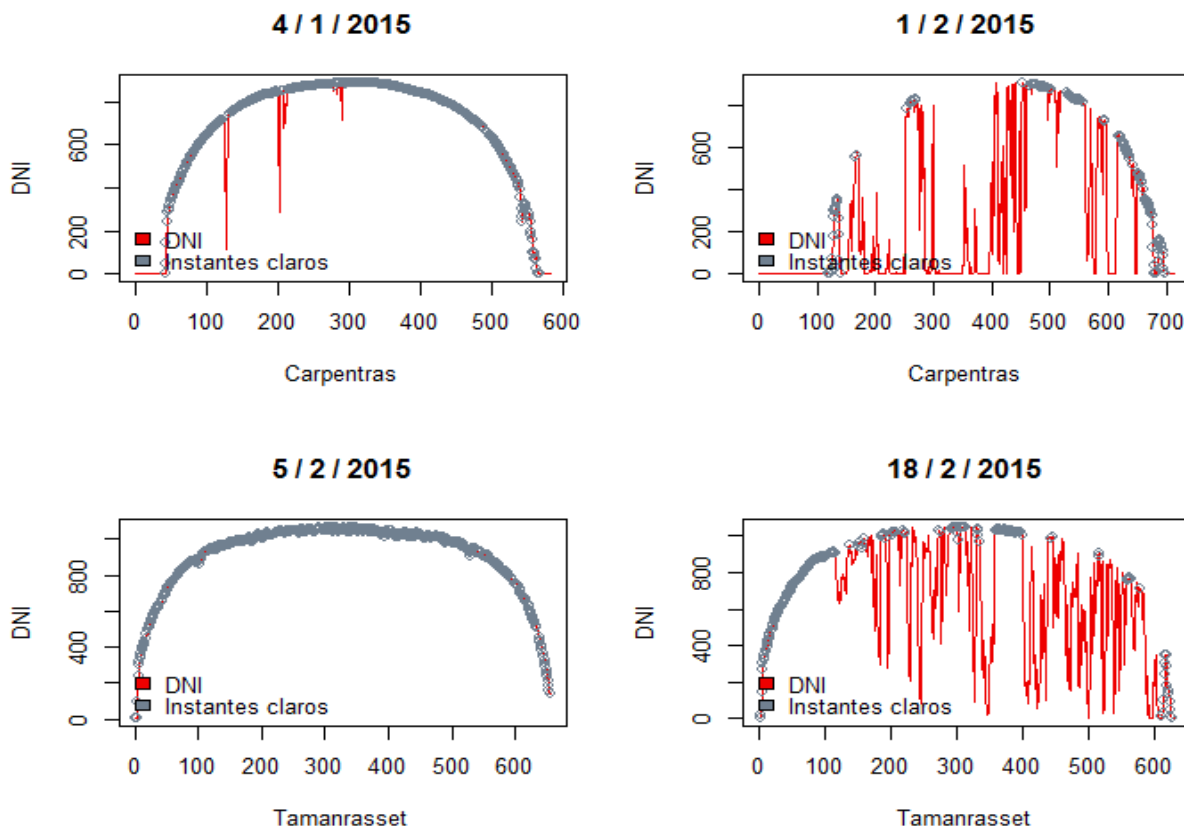


Figura 13 Instantes de cielo despejado tras pasar el tercer y último filtro del método de detección

Esta selección es restrictiva, pero minimiza el error a la hora de que solo se seleccionen condiciones claras y estables. Esto es particularmente importante para los sitios de alta latitud donde las condiciones son a menudo nubladas y donde una selección menos restrictiva puede conducir a resultados estadísticos erróneos sesgados por unos pocos valores no representativos.

En general los resultados finales del algoritmo de detección de instantes claros son muy satisfactorios, ya que la selección caracteriza con bastante precisión los instantes deseados. Esto no siempre es así ya que ocurre que, cuando la selección mensual de días considerados como completamente despejados en los dos primeros años de registros es muy pobre, el primer criterio de selección puede descartar muchos instantes que a priori pudieran ser considerados como claros. Un ejemplo de este problema se muestra en la Figura 14 y en particular para el mes de Mayo en Carpentras, donde al solo disponerse de 4 días representativos para establecer los límites, se ve bastante mermada la precisión del método. Este hecho aunque si empobrece la cantidad de datos disponibles posteriormente para la comparativa, no afecta de manera demasiado significativa

a los resultados finales para la posterior selección del modelo de cielo despejado idóneo.

Otras veces ocurre que los pasos 2 y 3 no funcionan de manera tan determinante para descartar totalmente los instantes en presencia de nubes, como por ejemplo ocurre en el mes de diciembre en Tamanrasset. Este hecho se ha observado en días puntuales para ambos emplazamientos, no siendo en ningún caso la tendencia general, por lo que sería interesante en un futuro poder realizar una segunda revisión del método para encontrar una posible solución a estos casos e intentar así depurar errores. En lo que a este trabajo respecta y dado el bajo porcentaje de puntos que representan error en la detección, se asume que supone un bajo porcentaje de error y se descarta que influya de manera significativa en la selección final de entre los modelos de cielo despejado comparados.

Aún así hay que destacar lo sumamente importante que es una correcta selección inicial de días despejados representativos del emplazamiento en cuestión, ya que aumentan considerablemente el porcentaje de éxito en el método de detección de instantes claros, que posteriormente proporcionan resultados mucho más fiables para la comparación y selección final del modelo de cielo despejado idóneo.

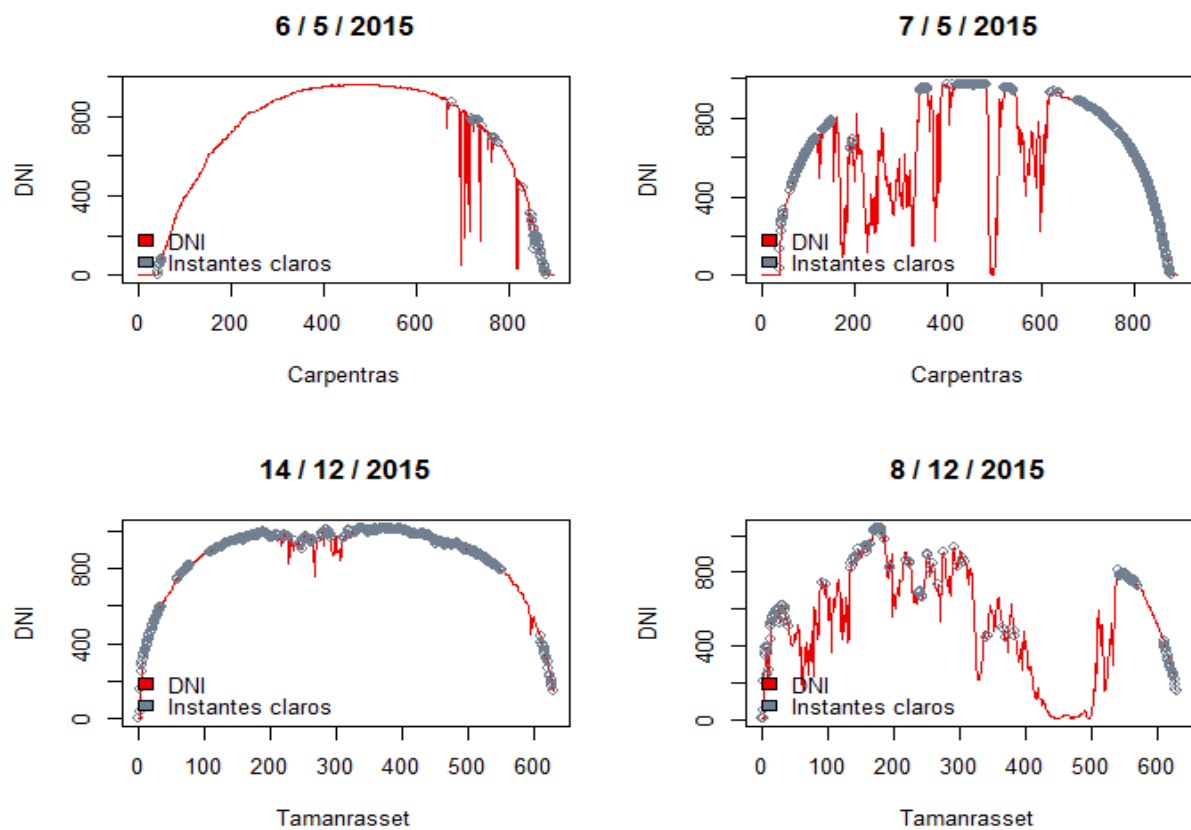


Figura 14 Ejemplo de mala selección de instantes de cielo despejado tras aplicar el método de detección

5.2 Modelos de cielo despejado

Se comparan un total de cinco modelos de cielo despejado para el cálculo de la radiación directa, descritos en la Sección 4.2, donde uno de ellos (Bird) además se considera con parámetros atmosféricos de entrada constantes ($AOD_{380} = 0.1$, $AOD_{500} = 0.15$, $O_3 = 0.3$ cm y $w = 1.5$ cm) o variables (modelados o registrados en el emplazamiento), para así cuantificar la importancia o influencia de los mismos en un modelo simple.

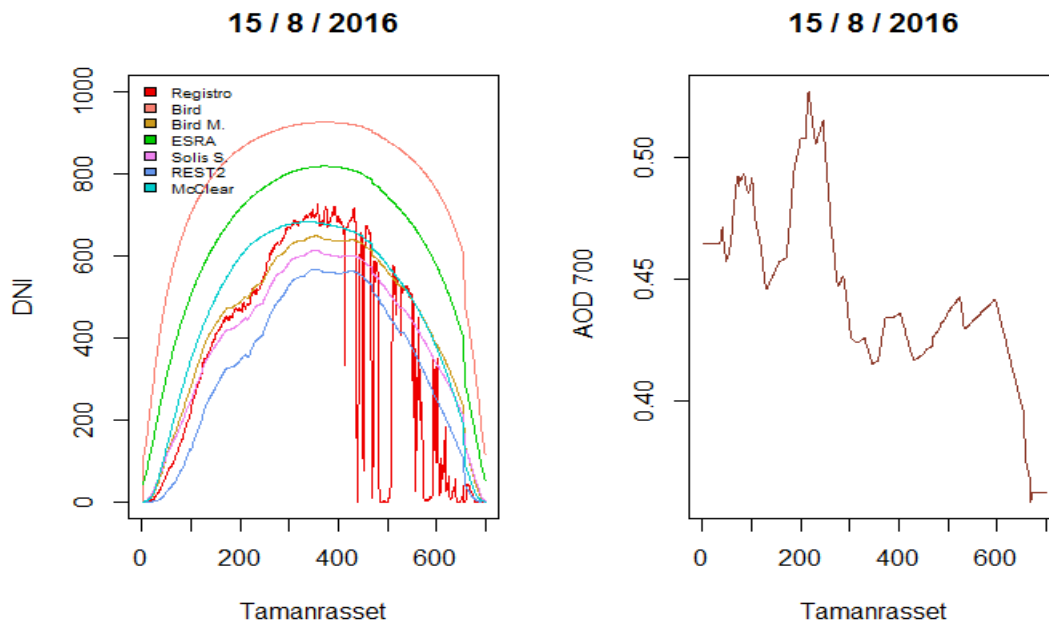


Figura 17 Influencia de AOD_{700} para un día cualquiera en Tamanrasset

La estimación de cielo claro de cada uno de los modelos que se utiliza posteriormente para la comparativa, se calcula para todos los instantes en que se detectan condiciones de cielo despejado, en los registros comprendidos durante el periodo 2015-2016. Se utilizan un total de $N_C = 187096$ y $N_T = 197268$ puntos válidos en Carpentras y Tamanrasset, cuya media en DNI medida es de 780.4 W/m^2 y 745.9 W/m^2 respectivamente.

5.3 Comparación de modelos

La validación se cuantifica a continuación utilizando una serie de indicadores estadísticos que muestra la tendencia de cada uno de los modelos. Para cada uno, las estimaciones del modelo se comparan de forma minutal con la radiación medida para cada instante detectado como de cielo despejado, de manera que un valor positivo de MBD representa una subestimación del modelo. La comparación se realiza usando seis métricas de error, y todos los resultados se presentan gráficamente para mayor claridad, en los dos emplazamientos seleccionados. Con el fin de obtener resultados comparables, las estadísticas se dan para todos los modelos basados en el mismo conjunto de datos.

Haciendo una rápida observación del conjunto de curvas, se comprueba que no se puede establecer un patrón claro en ninguno de los modelos, ya que todos sobreestiman o subestiman en algún momento al registro real de DNI . A todos les ocurre que en días concretos aproximan su curva casi a la perfección, y en otros momentos se convierten en el modelo que más se aleja de la realidad. Este es el motivo principal de la complejidad que supone la elección de un modelo concreto, ya que ninguno es mejor que otro a priori y los resultados cambian en función de las características de cada lugar. Lo que sí parece evidente es que los modelos que contemplan mayores parámetros atmosféricos de entrada, en general se ajustan y comportan mejor que los modelos con menor número de entradas. En la Figura 18 y a simple vista, se puede verificar que modelos simples como Bird se comportan muy bien si los parámetros atmosféricos de entrada se toman variables, con registros reales si se dispone de ellos, o modelados en la misma base temporal a ser posible, al menos para los más influyentes como son los aerosoles y el vapor de agua.

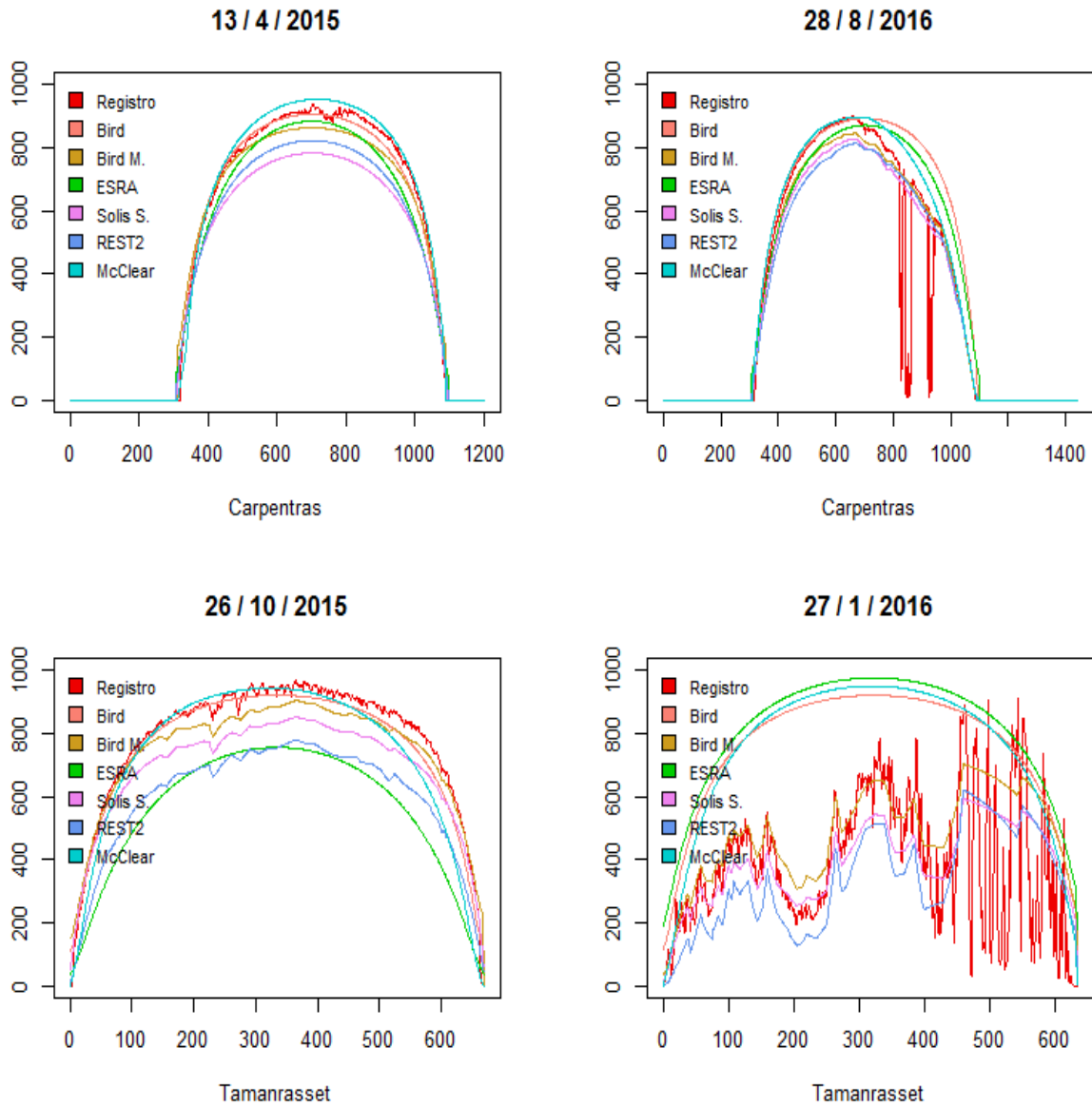


Figura 18 *DNI* registrada y modelada para días despejados y nublados en Carpentras y Tamanrasset

En la Figura 19 se representan los gráficos de dispersión para todos los modelos calculados en el conjunto total de datos seleccionados como claros entre 2015 y 2016 en Carpentras, y para elevaciones solares mayores a 10° . De aquí en adelante, todas las estadísticas se aplican al mismo conjunto de datos, para cada uno de los dos emplazamientos. Cabe destacar como en los modelos de Bird, Solis y REST2 se establece un límite superior bastante definido, no ocurriendo lo mismo con el límite inferior. También como al representar en el mismo gráfico las mediciones y los valores modelados para las condiciones de cielo despejado seleccionadas, se puede ver para todos los modelos a excepción de McClear, que las mediciones de *DNI* más altas no son alcanzadas por los valores modelados. Según los gráficos de dispersión, el modelo que tiene mejor comportamiento es McClear, por lo que en la Figura 20 se muestra con más detalle la dispersión de ese modelo en base mensual. Llama la atención como por ejemplo en el mes de Noviembre McClear ofrece una muy baja dispersión mientras que en el mes inmediatamente posterior y anterior la dispersión de los datos es mayor. Esto se debe principalmente a que la cantidad de días seleccionados como claros en el mes de Noviembre para definir los límites en el método de detección en Carpentras es menor que en Octubre y diciembre (4 frente a 7 y 11 respectivamente), lo que deriva en que el paso 1 del método es mucho más restrictivo en Noviembre frente a los otros dos meses, afectando directamente a la cantidad y calidad de datos seleccionados en ese mes.

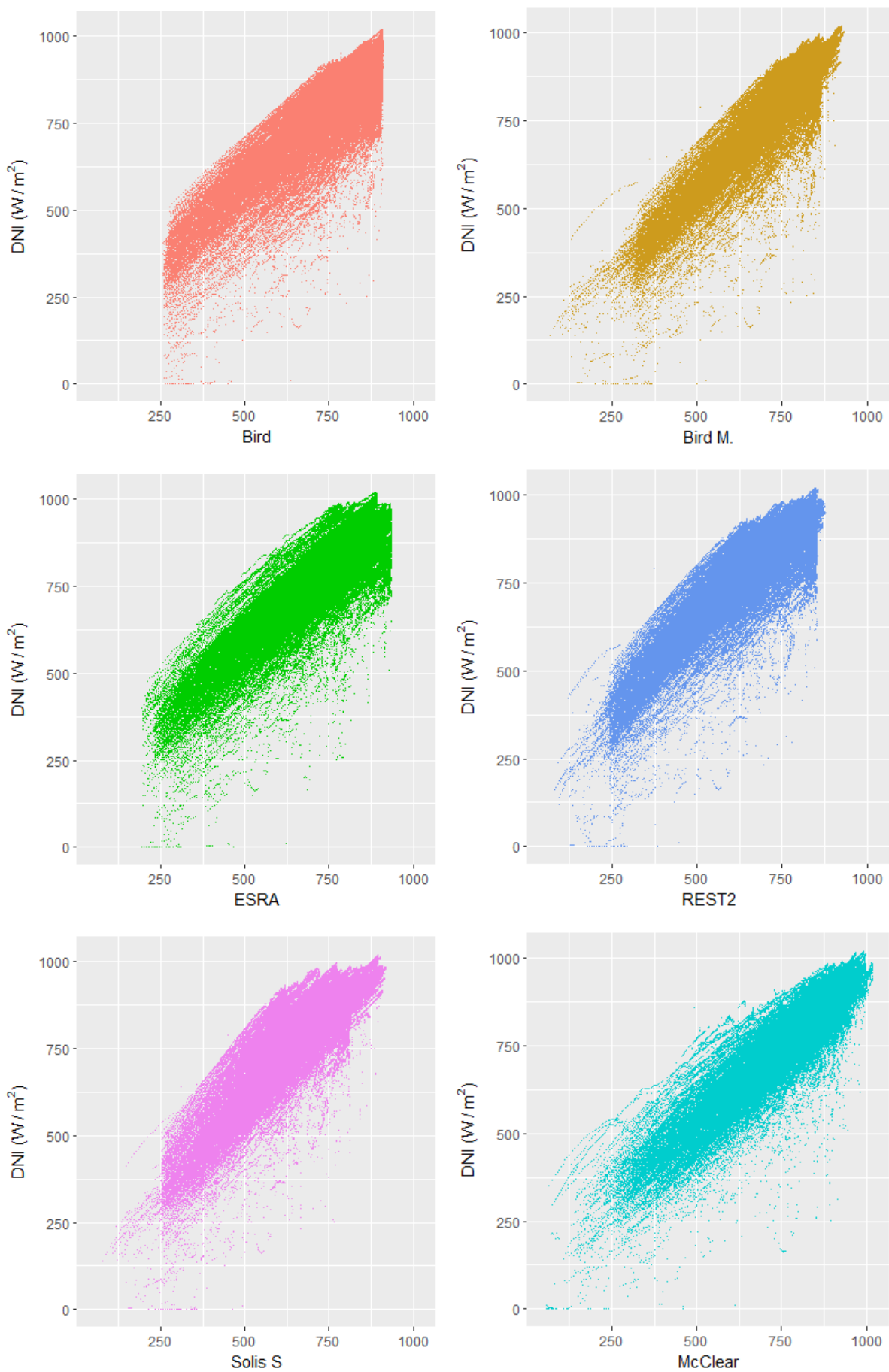


Figura 19 Gráficos de dispersión de los modelos Bird, ESRA, REST2, Solis S. y McClear en Carpentras

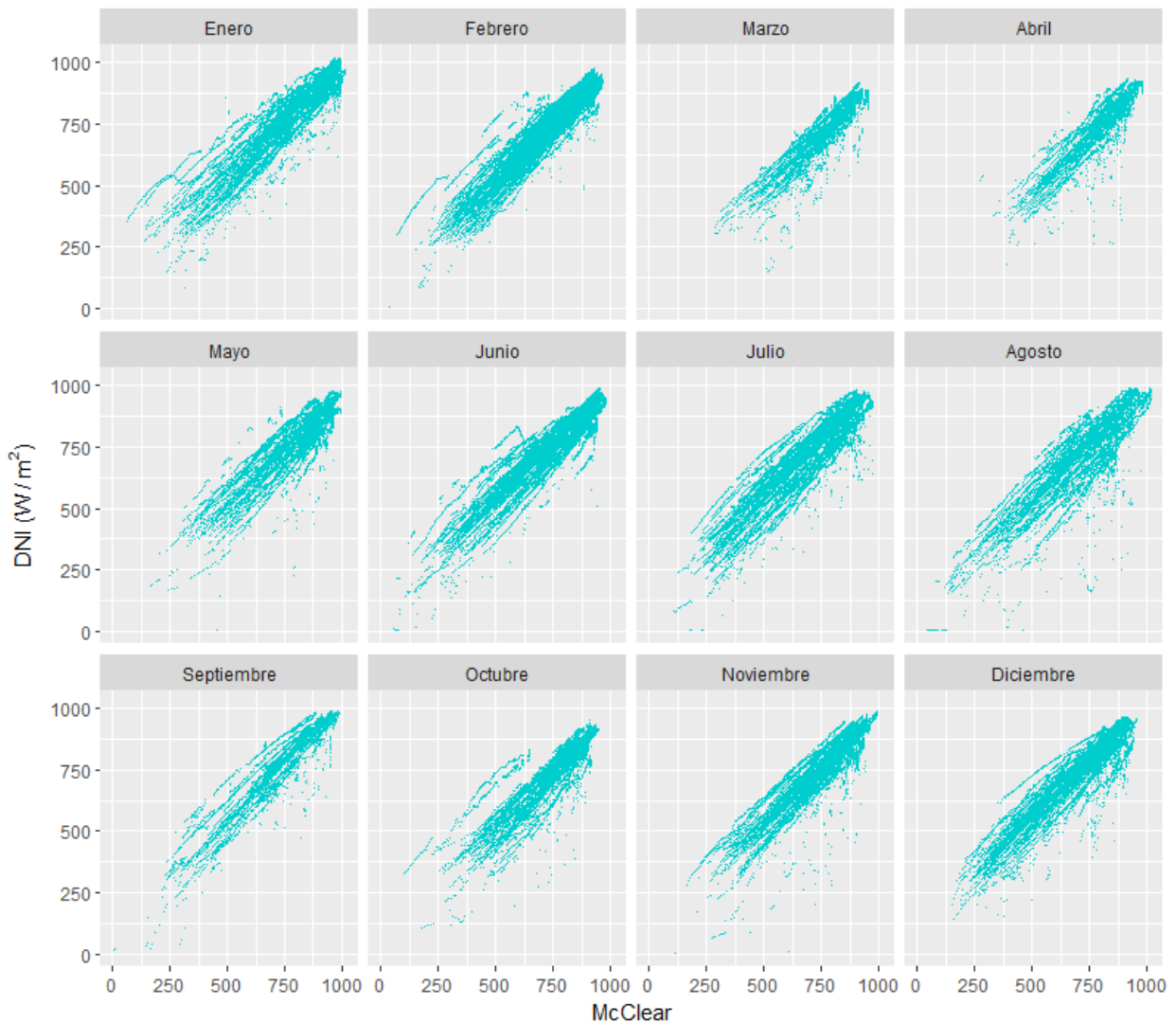


Figura 20 Gráfico de dispersión mensual del modelo McClear en Carpentras

No se añaden gráficos de dispersión de Tamanrasset al documento por simplicidad, ya que muestran resultados muy similares a los observados en Carpentras.

Además de los gráficos, como indicadores de dispersión también se calculan *MBD*, *RMSD* y *SD* para ambos lugares, obteniéndose los resultados reflejados en las Figuras 21 y 22.

A la vista de los resultados obtenidos en Carpentras, McClear es el modelo que menor diferencia y error con respecto a la media presenta, frente al modelo REST2 que es el que peor comportamiento tiene en cuanto a dispersión se refiere. El modelo simplificado de Solis también presenta malos resultados, con una gran diferencia media con respecto a registros, poca precisión y alta desviación; mientras que Bird y ESRA muestran un comportamiento bastante bueno aún siendo de los modelos más simples. En el caso concreto de Bird, no se muestra una diferencia suficientemente significativa al modelar con o sin parámetros atmosféricos registrados.

En el caso de Tamanrasset sin embargo, llama la atención la gran diferencia que existe en el modelo Bird cuando se modela con parámetros de entrada constantes o variables (Bird frente a Bird M.), mostrando unos resultados buenos y muy similares a los dados en Carpentras cuando se dispone de registros, pero con una precisión mucho más baja y con mayor desviación cuando se toman valores constantes. El modelo McClear aquí muestra resultados muy similares a Bird M., siendo ambos modelos los que mejor se ajustan. En este emplazamiento ocurre de nuevo que REST2 presenta peor comportamiento que el resto.

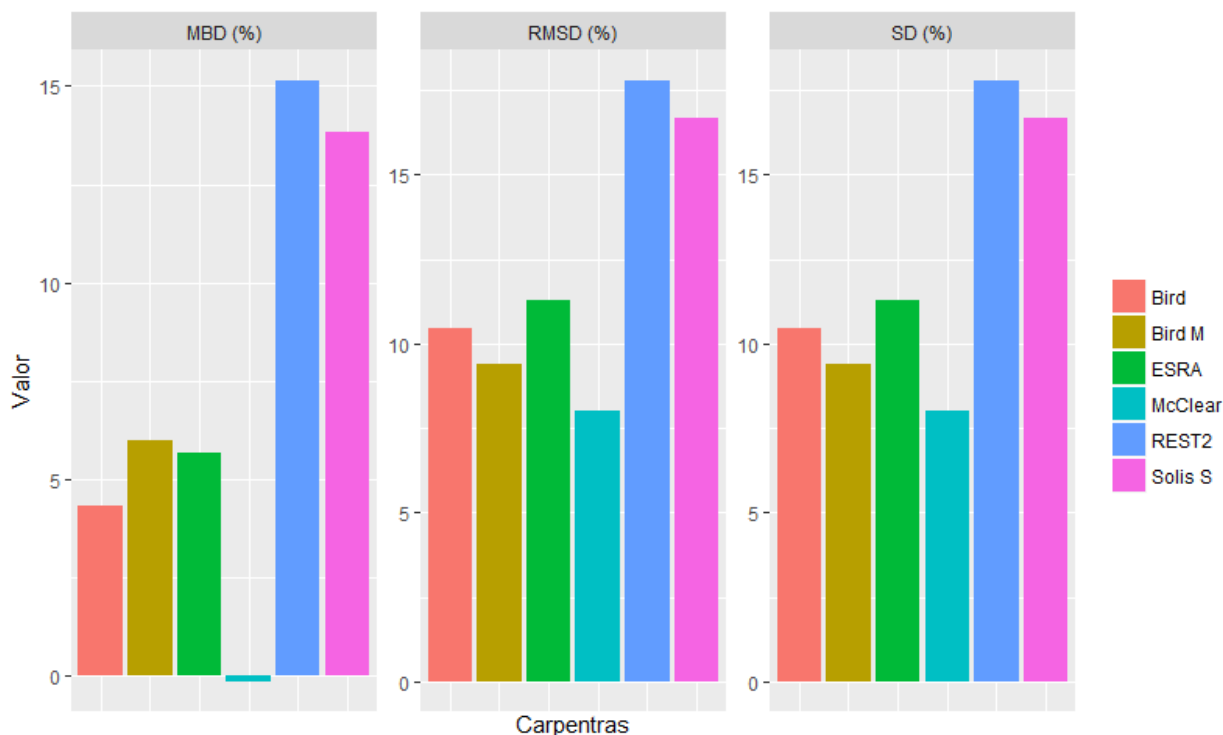


Figura 21 *MBD*, *RMSD* y *SD* aplicado a Carpentras

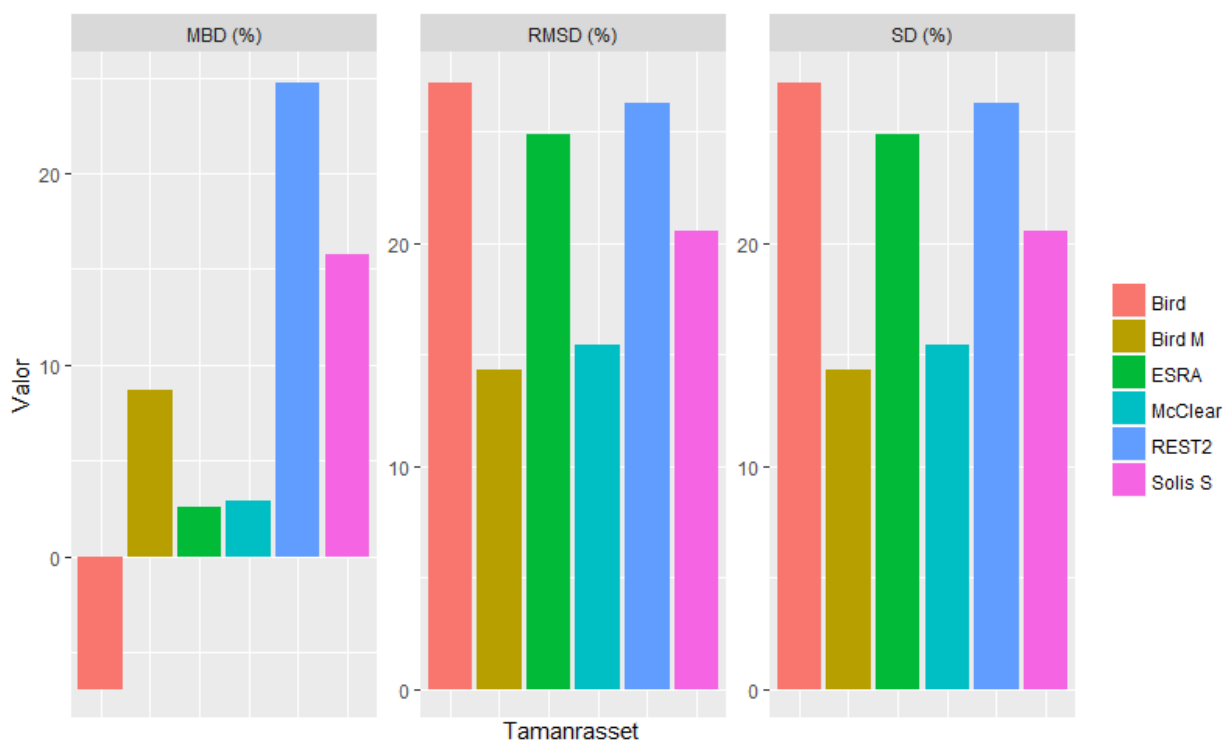


Figura 22 *MBD*, *RMSD* y *SD* aplicado a Tamanrasset

Para la correcta evaluación de los recursos solares, la literatura ha reconocido desde hace tiempo la importancia de que la función de distribución acumulativa de los valores modelados sea lo más cercana posible a la realidad. En vista de los resultados obtenidos en este estudio, el modelo que más se asimila a la curva de registros según este criterio vuelve a ser una vez más McClear para ambos lugares (Figuras 23 y 24).

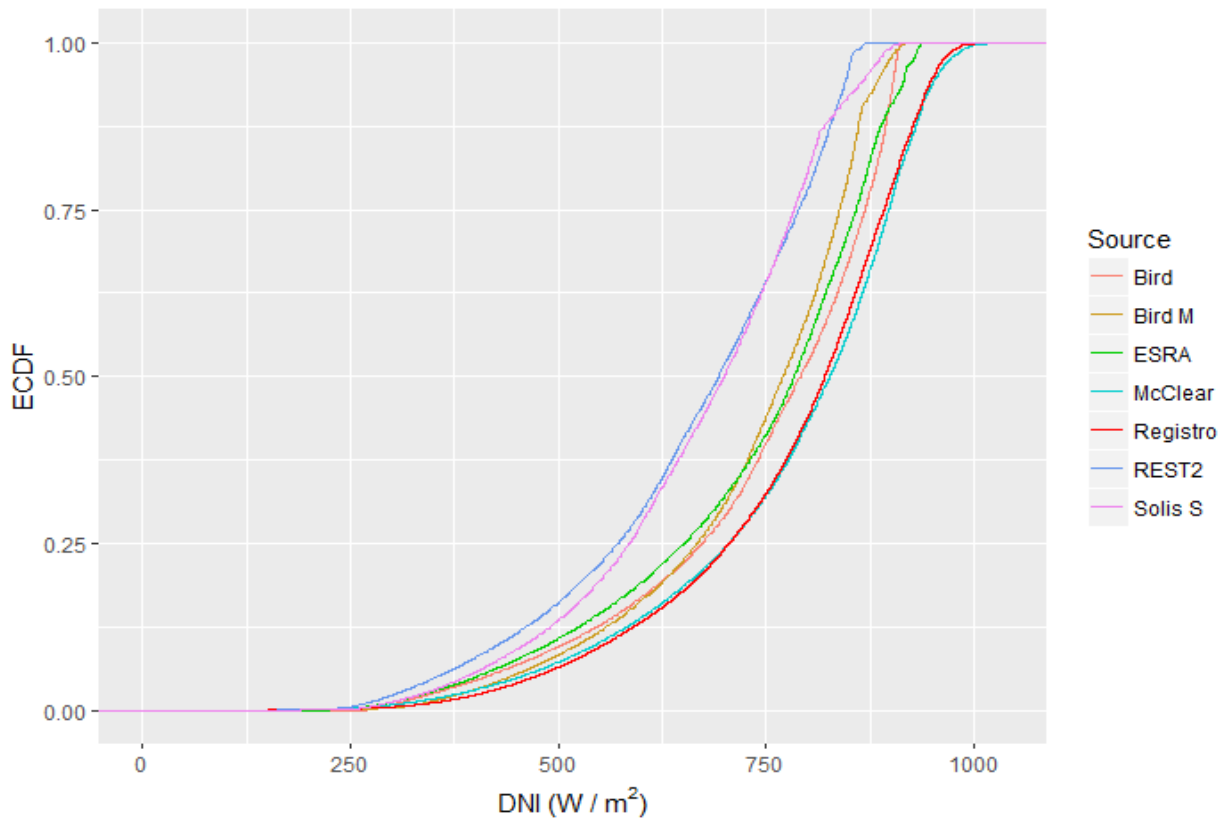


Figura 23 *ECDF* aplicado a Carpentras

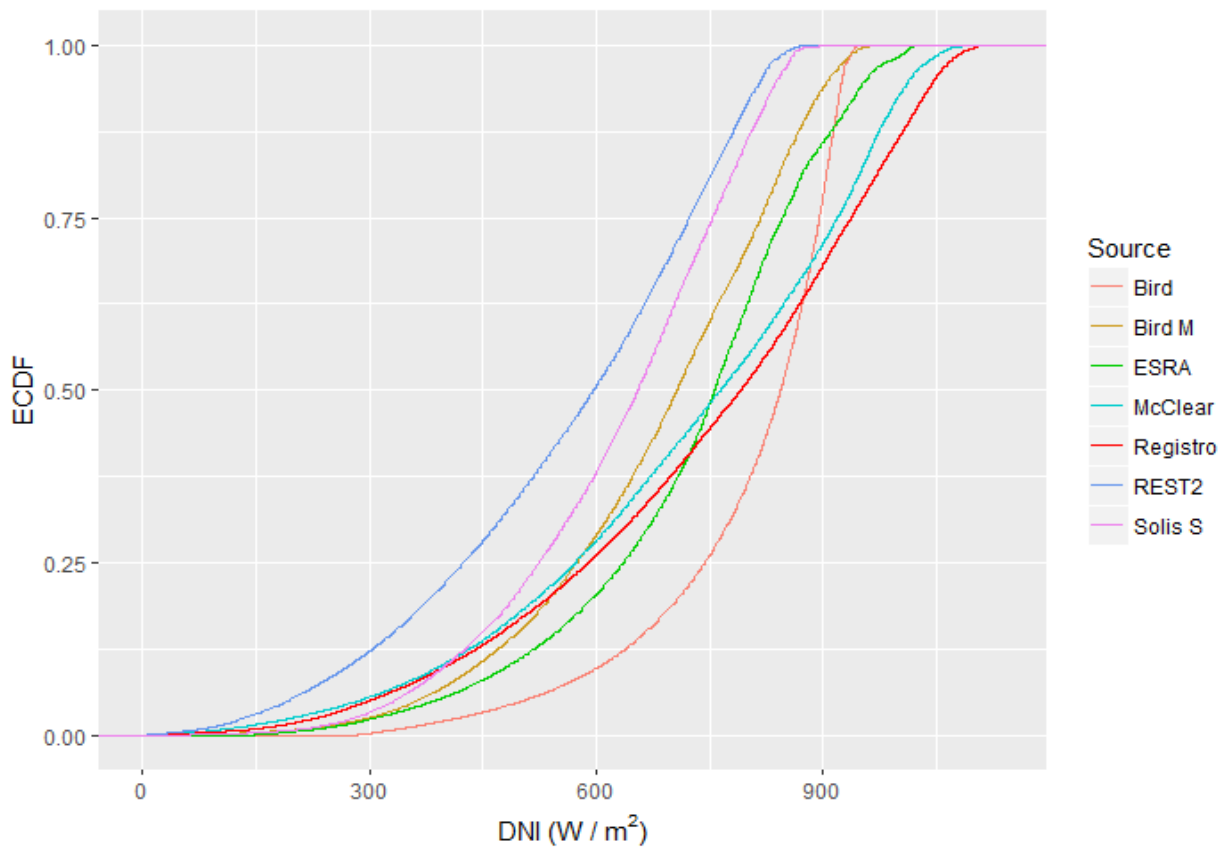


Figura 24 *ECDF* aplicado a Tamanrasset

Los modelos que más se alejan y por tanto predicen peor la magnitud de la *DNI* vuelven a ser REST2 y Solis Simplificado, ofreciendo un rango de valores de *DNI* bastante más pequeño que los obtenidos en mediciones. Destaca de nuevo en el caso de Tamanrasset, emplazamiento situado en el mayor foco del mundo de aerosoles, se observa una gran diferencia en el modelo simple Bird cuando contemplan estas variaciones, y como es de esperar se ajusta mucho más a la curva real cuando se tienen en cuenta que cuando no. También llama la atención como la distribución del modelo ESRA sigue un patrón muy similar a la de los registros en el estudio hecho en Carpentras, pero sin embargo no se parece tanto en el caso de Tamanrasset. La razón vuelve a ser una vez más la influencia de los aerosoles.

Todos los resultados obtenidos se muestran en valor relativo en las Tablas 3 y 4 donde además de los indicadores de dispersión, se muestran los valores de similitud de distribución y *CPI*.

Tabla 3 Resultados de indicadores estadísticos en Carpentras

Modelos	MBD (%)	RMSD (%)	SD (%)	KSI (%)	OVER (%)	CPI (%)
Bird	4,340	10,458	10,458	2,065	0,0083	5,747
Bird M.	6,008	9,394	9,394	2,837	0,0469	5,418
ESRA	5,680	11,266	11,265	2,683	0,0000	6,304
Solis S.	13,849	16,665	16,665	6,549	0,1306	10,002
McClear	-0,139	7,998	7,998	0,412	0,0000	4,102
REST2	15,148	17,789	17,789	7,156	0,1221	10,714

Tabla 4 Resultados de indicadores estadísticos en Tamanrasset

Modelos	MBD (%)	RMSD (%)	SD (%)	KSI (%)	OVER (%)	CPI (%)
Bird	-6,919	27,189	27,189	5,913	0,0476	15,085
Bird M.	8,664	14,348	14,348	4,611	0,0598	8,342
ESRA	2,574	24,880	24,880	3,652	0,0175	13,357
Solis S.	15,756	20,532	20,532	7,111	0,1277	12,076
McClear	2,895	15,460	15,460	1,214	0,0000	8,033
REST2	24,733	26,272	26,272	10,573	0,1485	15,816

Estas estadísticas vuelven a confirmar que como era de esperar, los modelos que usan más entradas atmosféricas se desempeñan usualmente mejor y más consistentemente que aquellos que utilizan pocas o ninguna de tales entradas. Hay excepciones notables a esta tendencia ya que el número de entradas a una modelo no es el único factor que condiciona su desempeño, las características algorítmicas pueden tener un gran impacto. La excepción más notable ocurre en el modelo REST2 que siendo uno de los que más entradas requiere, al aproximar los valores de *DNI* proporciona unos resultados no tan acertados como pudiera esperarse, siendo aún peores para todos los indicadores estadísticos y en los dos emplazamientos que los obtenidos con el modelo ESRA, aún siendo este el modelo estudiado con menor número de entradas.

Los resultados de las Tablas 3 y 4 también muestran que los mejores modelos, McClear y Bird, puede predecir *DNI* con baja incertidumbre. Obviamente y sobre todo en el caso de Bird, en lugares con gran variabilidad en sus condiciones atmosféricas solo puede lograrse si los modelos se proporcionan con datos de entrada de alta calidad y frecuencia.

Si se analizan los resultados obtenidos en los indicadores de similitud de distribución *KSI* y *OVER* (Figuras 25 y 26), McClear vuelve a consolidarse como el mejor modelo, mostrando una diferencia en su función de distribución acumulada con respecto a la de los registros mínima para ambos sitios, y manteniendo su distribución en todo momento por debajo del valor crítico D_c . Esto significa que los datos que modela McClear con respecto a los registros son estadísticamente tan similares que podrían ser los mismos. Los modelos Solis Simplificado y REST2 vuelven a dar los peores resultados en ambos indicadores y lugares.

Curiosamente, a excepción de McClear, ninguno de los modelos logra mantener su distribución normalizada

por debajo del valor D_c . Esto es debido al valor tan bajo que toma D_c cuando el conjunto de datos es muy largo. Cabe destacar también como el modelo ESRA a pesar de reportar mayor dispersión que Bird en resultados anteriores, obtiene mejores resultados al comparar sus *CDFs* con respecto a la de los registros.

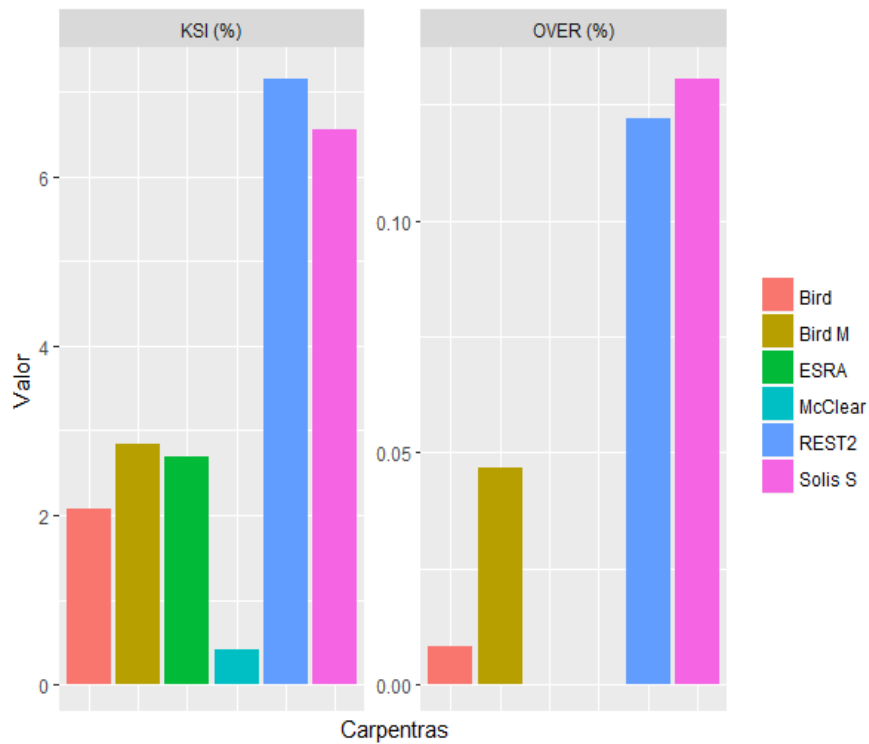


Figura 25 *KSI* y *OVER* aplicado a Carpentras

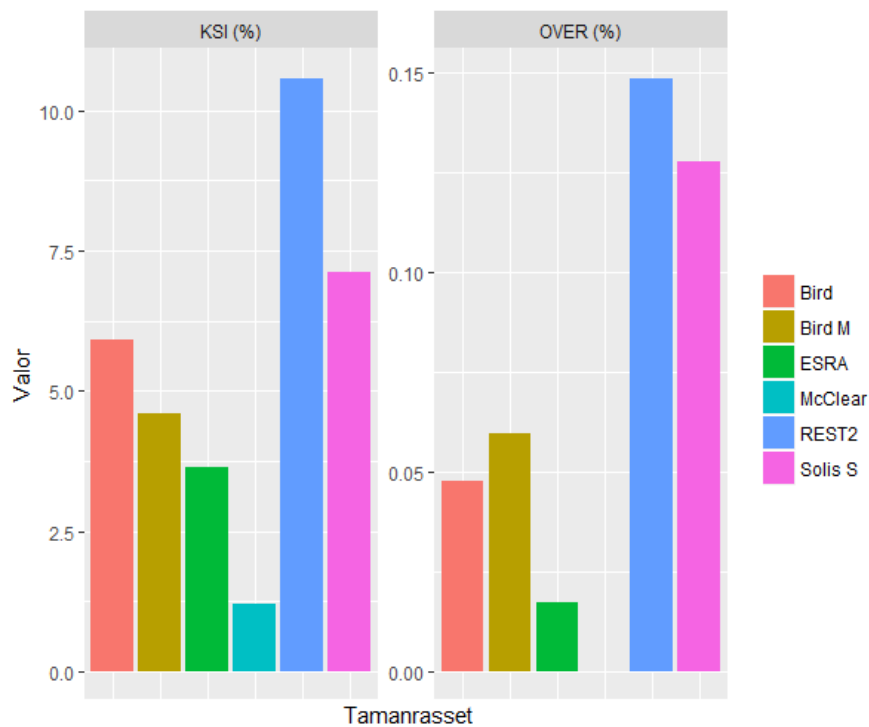


Figura 26 *KSI* y *OVER* aplicado a Tamanrasset

Por último, si comparamos en función de *CPI* el modelo que trabaja con mayor rendimiento, en los dos casos expuestos el mejor resulta ser McClear, consolidándose por tanto como la mejor opción en los dos emplazamientos seleccionados en este estudio. Seguidamente y para ambos emplazamientos también, se sitúa el modelo simple Bird con entradas atmosféricas registradas y/o modeladas. A partir de aquí los resultados son ligeramente distintos en ambos sitios. En Carpentras el modelo Bird con entradas constantes obtiene resultados similares a sí mismo modelado con parámetros variables, obteniendo la tercera posición en el ranking. El cuarto y con resultados ligeramente superiores al tercero lo ocupa ESRA, y tras él con una diferencia notable al mismo Solis S. y REST2. En el caso de Tamanrasset el tercer lugar lo ocupa con diferencia notable al segundo el modelo Solis S., ESRA el cuarto, Bird con entradas constantes el quinto y de nuevo se repite el modelo REST2 como el que obtiene el peor rendimiento.

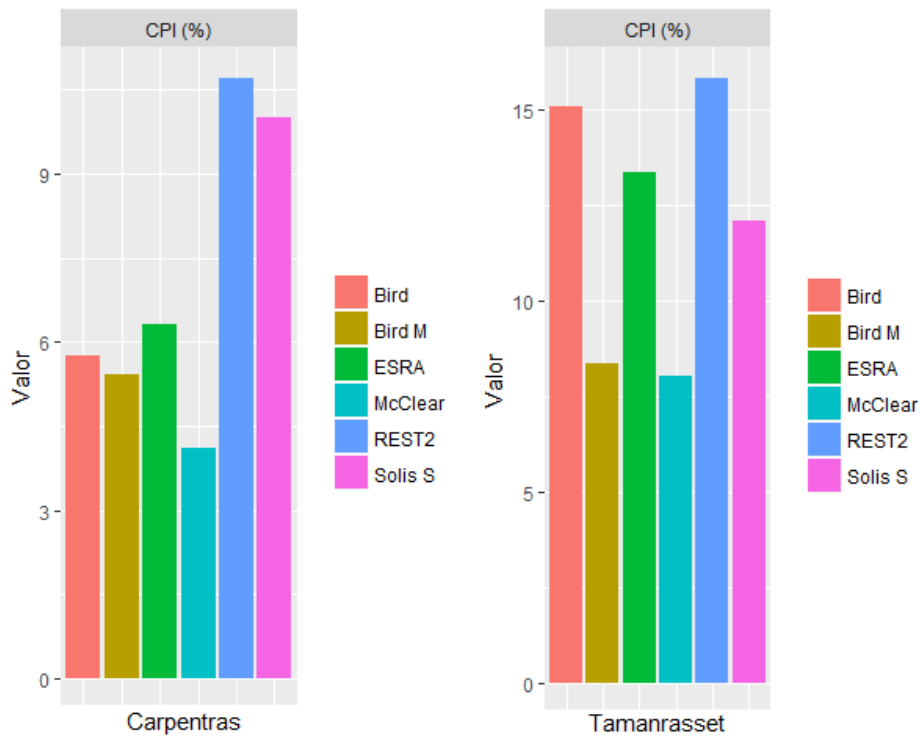


Figura 27 CPI aplicado a Carpentras y Tamanrasset

6 CONCLUSIONES

Se propone un nuevo algoritmo para la detección simple de periodos con *DNI* similar a las condiciones de cielo despejado, usando solo medidas de *DNI* de alta resolución temporal. El algoritmo usa tres criterios de detección basados en diferencias y límites de *DNI* y k_t' , donde dos de ellos son además función de la elevación solar y el ángulo acimutal.

El método de detección de instantes claros se aplica utilizando datos de irradiancia medida en Carpentras, Francia, y en Tamanrasset, Argelia, durante un periodo de 4 años comprendido entre 2013 y 2016, donde los registros de días completamente despejados en los dos primeros años se utilizan para establecer límites en el algoritmo, y los dos últimos para aplicar el algoritmo de detección y seleccionar los instantes considerados en ausencia de nubes.

Los resultados del método se verifican visualmente y se utilizan posteriormente para comparar estadísticamente los resultados de cinco modelos de cielo despejado con respecto a los registros medidos. Además se analiza la diferencia existente si las entradas atmosféricas en el modelo simple Bird se toman como constantes o se añaden entradas variables de registros y/o datos modelados en la misma base minutal cuando es posible.

Del análisis de los resultados en las Tablas 3 y 4, se pueden extraer varias conclusiones. En primer lugar, queda claro que el comportamiento de los modelos depende mucho de los parámetros usados y de la calidad de los mismos, siendo el espesor óptico del aerosol un aspecto crítico en el modelado de irradiancia solar, particularmente sobre áreas con condiciones ocasionales o frecuentes de alta turbiedad. Esto se refleja claramente en el modelo Bird, que a pesar de ser un modelo simple, tiene un excelente comportamiento con cierta independencia de que los parámetros de entrada sean constantes o variables en Carpentras, lugar con una mayor estabilidad en su turbiedad atmosférica. Sin embargo, en Tamanrasset donde es habitual una mayor variabilidad en su turbiedad atmosférica debido a las frecuentes tormentas de arena, el modelo Bird se comporta muy mal cuando se consideran parámetros constantes y muy bien cuando éstos son registrados o modelados.

El modelo McClear se consolida como el mejor modelo bajo las condiciones estudiadas en este trabajo para ambos emplazamientos, mientras que Solis Simplificado y REST2 obtienen los peores resultados. El análisis en el modelo ESRA muestra que funciona mejor en Carpentras debido a que se trata de un modelo simple con pocos parámetros de entrada, y ese lugar registra condiciones atmosféricas más regulares.

Los resultados obtenidos aquí excluyen condiciones de baja elevación solar debido a que no tienen implicaciones en la producción termosolar. El estudio compara datos con elevaciones de entre 10° y 90°, por lo que en la práctica se producirá cierta degradación del rendimiento bajo condiciones de elevación inferior a 10°. En este sentido, los resultados obtenidos en este trabajo son optimistas, ya que excluyen periodos en los que se pueden modelar ciertas entradas más inexactas.

La identificación de periodos con *DNI* de cielo despejado tiene muchas aplicaciones en el diseño y operación en los sistemas de concentración solar. Conocer qué modelo de cielo claro se ajusta a las características del emplazamiento es de vital importancia para hacer un correcto dimensionado del recurso solar, por lo que la herramienta propuesta y desarrollada en este trabajo puede convertirse en una gran ayuda y facilitar enormemente esa labor.

REFERENCIAS

- [1] M.A. Atwater and J.T. Ball, "Comparison of radiation computations using observed and estimated precipitable water.," *Appl. Meteorol.*, no. 15, pp. 1319-1320, 1976.
- [2] R. Perez, T. Cebecauer, and M. Šúri, "Semi-Empirical Satellite Models," in *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, Elsevier Inc., Ed., 2013, ch. 2, pp. 21 – 48.
- [3] M.A. Atwater and J.T. Ball, "A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations.," *Solar Energy*, no. 21, pp. 163–170, 1978.
- [4] R.E. Bird and R.L. Hulstrom, "Review, evaluation, and improvement of direct irradiance models.," *Transactions on ASME Journal of Solar Engineering*, no. 103, pp. 182–192, 1981b.
- [5] J.J. Carroll, "Global transmissivity and diffuse fraction of solar radiation for clear and cloudy skies as measured and as predicted by bulk transmissivity models.," *Solar Energy*, no. 35, pp. 105–118, 1985.
- [6] V. Badescu, "Verification of some very simple clear and cloudy sky models to evaluate global solar irradiance.," *Solar Energy*, no. 61, pp. 251–264, 1997.
- [7] J.A., McKay, D.C. Davies, "Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces. ," *Solar Energy* , no. 43, pp. 153–168, 1989.
- [8] C.A. Gueymard, "Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. ," *Solar Energy*, no. 51, pp. 121–138, 1993a.
- [9] C.A. Gueymard, "Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Pt 1: Detailed theoretical performance assessment.," *Solar Energy*, no. 74, pp. 355–379, 2003a, Corrigendum: *Solar Energy* 76, 513 (2004).
- [10] C.A. Gueymard, "Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Pt 2: Validation with high-quality measurements.," *Solar Energy*, no. 74, pp. 381–395, 2003b, Corrigendum: *Solar Energy* 76, 515 (2004).
- [11] C.A. Gueymard, "REST2: High performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance and photosynthetically active radiation—validation with a benchmark dataset.," *Solar Energy*, no. 82, pp. 272–285, 2008.
- [12] C.A., Myers, D.R. Springer. Gueymard, "Validation and Ranking Methodologies for Solar Radiation Models.," *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, no. 32p, pp. 479-510, 2008a.
- [13] P. Ineichen, "Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. ," *Solar Energy*, no. 80, pp. 468–478, 2006.
- [14] M.G., Mayer, H. Iziomon, "Assessment of some global solar radiation parameterizations.," *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, no. 64, pp. 1631–1643, 2002.
- [15] M.A. et al. Madkour, "Comparative study on different models for estimation of direct normal irradiance

- (DNI) over Egypt atmosphere.," *Renewable Energy*, no. 31, pp. 361–382, 2006.
- [16] S. Younes and T. Muneer, "Clear-sky classification procedures and models using a world-wide database.," *Applied Energy*, no. 84, pp. 623–645, 2007.
- [17] T. Muneer, M.S. Gul, and J. Kubie, "Models for estimating solar radiation and illuminance from meteorological parameters," *Sol. Energy Eng.*, no. 122, pp. 146-153, 2000.
- [18] M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, and V. Marinelli, "Correlations of global and diffuse solar luminous efficacy for all sky conditions and comparisons with experimental data of five localities," *Renew. Energy*, no. 33, pp. 2036-2047, 2008.
- [19] M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, and V. Marinelli, "Correlations of direct solar luminous efficacy for all sky, clear sky and intermediate sky conditions and comparisons with experimental data of five localities," *Renew. Energy*, no. 35, pp. 2143-2156, 2010.
- [20] J.C. Lam and D.H.W. Li, "Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components," *Build. Environ.*, no. 31, pp. 527-535, 1996.
- [21] D.H.W. Li and J.C. Lam, "An analysis of climatic parameters and sky condition classification," *Build. Environ.*, no. 36, pp. 435-445, 2001.
- [22] D.H.W. Li and H.L. Tang, "Standard skies classification in Hong Kong, J.," *Atmos. Solar Terr. Phys.*, no. 70, pp. 1222-1230, 2008.
- [23] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance," *Sol. Energy*, no. 44, pp. 271-289, 1990a.
- [24] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, and A. Zelenka, "Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions," *Sol. Energy*, no. 45, pp. 111-114, 1990.
- [25] R.H. Inman, J.G. Edson, and C.F.M. Coimbra, "Impact of local broadband turbidity estimation on forecasting of clear sky direct normal irradiance," *Sol. Energy*, no. 117, pp. 125-138, 2015.
- [26] J. Nou, R. Chauvin, A. Traor_e, S. Thil, and S. Grieu, "Atmospheric turbidity forecasting using side-by-side ANFIS," *Energy Proc.*, no. 49, pp. 2387-2397, 2014, Proceedings of the Solar PACES 2013.
- [27] J. Nou, R. Chauvin, A. Traor_e, S. Thil, and S. Grieu, "A new approach to the real-time assessment of the clear-sky direct normal irradiance," *Appl. Math. Model.*, no. 40, pp. 7245-7264, 2016.
- [28] M. Larrañeta, S. Moreno, M.A. Silva, and I. Lillo, "An improved model for the synthetic generation of high temporal resolution direct normal irradiation time series," *Sol. Energy*, no. 122, pp. 517-528, 2015.
- [29] C.A. Gueymard, "Importance of atmospheric turbidity and associated uncertainties in solar radiation and luminous efficacy," *Model. Energy*, no. 30, pp. 1603-1621, 2005.
- [30] J. Calbó, J.A. González, and D. Pagès, "A method for sky-condition classification from ground-based solar radiation measurements," *Appl. Meteorol.*, no. 40, pp. 2193-2199, 2001.
- [31] D. Pagès, J. Calbó, and J.A. González, "Using routine meteorological data to derive sky conditions," *Ann. Geophys.*, no. 21, pp. 649-654, 2003.

- [32] R.G. Harrison, N. Chalmers, and R.J. Hogan, "Retrospective cloud determinations from surface solar radiation measurements," *Atmos. Res.*, no. 90, pp. 54-62, 2008.
- [33] T.P. DeFelice and B.K. Wylie, "Sky type discrimination using a ground-based sun photometer," *Atmos. Res.*, no. 59, pp. 313-329, 2001.
- [34] J.S. Stein, C.W. Hansen, and M.J. Reno, "The variability index: a new and novel metric for quantifying irradiance and PV output variability, 2012, Conference.
- [35] B.O. Kang and K.-S. Tam, "A new characterization and classification method for daily sky conditions based on ground-based solar irradiance measurement data," *Sol. Energy*, no. 94, pp. 102-118, 2013.
- [36] C.E. Duchon and M.S. O'Malley, "Estimating cloud type from pyranometer observations," *Appl. Meteorol.*, no. 38, pp. 132-141, 1999.
- [37] C.N. Long and T.P. Ackerman, "Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects," *Geophys. Res. Atmos.*, no. 105, pp. 15609-15626, 2000.
- [38] M. Martínez-Chico, F.J. Batlles, and J.L. Bosch, "Cloud classification in a Mediterranean location using radiation data and sky images," *Energy*, no. 36, pp. 4055-4062, 2011.
- [39] J.C. Dupont, M. Haeffelin, and C.N. Long, "Evaluation of cloudless-sky periods detected by shortwave and longwave algorithms using Lidar measurements," *Geophys. Res. Lett.*, no. 35, p. 10, 2008.
- [40] R.J. Hogan, C. Jakob, and A.J. Illingworth, "Comparison of ECMWF winter-season cloud fraction with radar-derived values," *Appl. Meteorol.*, no. 40, pp. 513-525, 2001.
- [41] C. Marty and R. Philipona, "The clear-sky index to separate clear-sky from cloudy sky situations in climate research," *Geophys. Res. Lett.*, no. 27, pp. 2649-2652, 2000.
- [42] A. Orsini et al., "Cloud cover classification through simultaneous ground-based measurements of solar and infrared radiation," *Atmos. Res.*, no. 61, pp. 251-275, 2002.
- [43] M.S. Ghonima et al., "A method for cloud detection and opacity classification based on ground based sky imagery," *Atmos. Meas. Tech.*, no. 5, pp. 2881-2892, 2012.
- [44] BSRN. [Online]. <http://bsrn.awi.de/>
- [45] B. Forgan, "A new method for calibrating reference and field pyranometers," *Atmos. Ocean. Technol.*, no. 16, pp. 638-645, 1996.
- [46] Ohmura and et al, "Baseline surface radiation network (BSRN/WCRP): new precision radiometry for climate research.," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, no. 79, pp. 2115-2136, 1998.
- [47] C.A. Gueymard and D.R. Myers, "Evaluation of conventional and high-performance routine solar radiation measurements for improved solar resource, climatological trends, and radiative modeling," *Solar Energy*, no. 83, pp. 171-185, 2009.
- [48] AERONET. [Online]. <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

- [49] Proyecto MACC. [Online]. <http://www.gmes-atmosphere.eu/services/aqac/>
- [50] SODA. [Online]. <http://www.soda-pro.com/home>
- [51] Meteotest. [Online]. <https://meteotest.ch/en/>
- [52] R.E. Bird and R.L. Hulstrom, "A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces," Solar Energy Research Institute, Tech. rep. 1981.
- [53] C. Gueymard, "Clear-Sky Irradiance Predictions for Solar Resource Mapping and Large-Scale Applications: Improved Validation Methodology and Detailed Performance Analysis of 18 Broadband Radiative Models," *Solar Energy*, no. 86, pp. 2145–2169, Aug. 2012.
- [54] C., Bauer, O., Wald, L. Rigollier, "On the Clear Sky Model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas - With Respect to the Heliostat Method.," *Solar Energy*, no. 68, pp. 33–48, 2000.
- [55] M. Geiger, L. Diabaté, L. Ménard, and L. Wald, "A web Service for Controlling the Quality of Measurements of Global Solar Irradiation," *Solar Energy*, no. 73, pp. 475–480, 2002.
- [56] F. Kasten, "The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness," *Solar Energy*, no. 56, pp. 239–244, 1996.
- [57] F. Kasten and A.T. Young, "Revised optical air mass tables and approximation formula," *Applied Optics*, no. 28, pp. 4735–4738, 1989.
- [58] M., Suri, M., Hofierka, "The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications. In: Proceedings of Open Source GIS-GRASS Users Conference. ,", Trento, Italy., 2002.
- [59] GRASS-GIS. [Online]. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solmod3.htm>
- [60] r.sun. [Online]. **¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.**
- [61] H.T., Pearce, J.M. Nguyen, "Estimating potential photovoltaic yield with r.sun and the open source geographical resources analysis support system," *Solar Energy*, no. 84, pp. 831–843, 2010.
- [62] B. Mayer and A. Kylling, he libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use, 2005, Technical note.
- [63] Dagestad K.F., Ineichen P., Schroedter-Homscheidt M., Cros S., Dumortier D., Kuhlemann R., Olseth J.A., Piernavieja G., Reise C., Wald L., Heinemann D. Mueller R.W, "Rethinking satellite based solar irradiance modelling - The SOLIS clear-sky modul," *Remote Sens. Environ.*, no. 91, pp. 160–174, 2004.
- [64] P. Ineichen, "A broadband simplified version of the Solis clear sky model, *Solar Energy*," no. 82, pp. 768–772, 2008a.
- [65] P. Ineichen. (2008b) A broadband simplified version of the Solis clear sky model, Excel tool. [Online]. <http://www.unige.ch/energie/fr/equipe/ineichen/solis-tool/>
- [66] M., et al. Suri, "Quality procedures of SolarGIS for provision site specific solar resource information.," in *Proceedings of SolarPACES Conference.*, Perpignan, France., 2010.
- [67] E.P. Shettle, "Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies.," in

AGARD Conference proceedings, Copenhagen, Denmark, 1989.

- [68] M. Lefèvre, "McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions.," *Atmos. Meas. Tech.*, no. 6, pp. 2403–2418, 2013.
- [69] C.A. Gueymard, "A two-band model for the calculation of clear Sky Solar Irradiance, Illuminance, and Photosynthetically Active Radiationb at the Erath Surface," *Solar Energy*, no. 43, pp. 253-265, 1989.
- [70] C.A. Gueymard, "Parametrized Transmittance Model for Direct Beam and Circumsolar Spectral Irradiance," *Solar Energy*, no. 71, pp. 325–346, 2001.
- [71] C.A., Thevenard, D., 2009. Gueymard, "Monthly average clear-sky broadband irradiance database for worldwide solar heat gain and building cooling load calculations," *Solar Energy*, no. 83, pp. 1998–2018, 2009.
- [72] R., Ineichen, P., Seals, R., Zelenka, A. Perez, "Making full use of the clearness index for parametrizing hourly insolation conditions," *Solar Energy*, no. 45, pp. 111- 114, 1990.
- [73] B. Espinar et al., "Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and German radiometric stations," *Sol Energy*, no. 83, pp. 118–25, 2009.
- [74] R. [Online]. <https://www.r-project.org/>
- [75] R Studio. [Online]. <https://www.rstudio.com/>
- [76] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*, EBSCOhost ed.: SciTech Connec, 1983, (accessed August 31, 2017).
- [77] M. Sengupta and A. Habte, *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications*, NREL, Ed., 2015.
- [78] N.A. Engerer and F.P. Mills, "Validating nine clear sky radiation models in Australia," *Solar Energy*, no. 120, pp. 9-24, 2015.
- [79] P. Ineichen, "Validation of models that estimate the clear sky global and beam solar irradiance," *Solar Energy*, no. 132, pp. 332-344, 2016.
- [80] Jose A. Ruiz-Arias, Christian A. Gueymard, and Tomas Cebecauer, "Worldwide Multi-Model Intercomparison of Clear-Sky," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1850, no. 1, pp. 1-7, 2017.
- [81] Badescu et al., "Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 16, pp. 1636-1656, 2012.
- [82] Concentrated solar power plants: Review and design methodology, "Zhang, H.L.; Baeyens, J.; Degrève, J.;Cacères, G.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 22, pp. 466-481, 2013.
- [83] P. Ineichen and R. Perez, "Derivation of cloud index from geostationary satellites and application to the production of solar irradiance and daylight illuminance data," *THEORETICAL AND APPLIED CLIMATOLOGY*, no. 64, pp. 119-130, 1999.
- [84] C.A. Gueymard, "A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects," *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, no. 39, pp. 1024-1034, 2014.
- [85] M. Larrañeta, M.J. Reno, I. Lillo, and M.A. Silva, "Identifying periods of clear sky direct normal irradiance," *Renewable Energy*, no. 113, pp. 756-763, 2017.
- [86] M.J. Reno and C.W. Hansen, "Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements," *Renewable Energy*, no. 90, pp. 520-531, 2016.
- [87] P. Ineichen, "Validation of models that estimate the clear sky global and beam solar irradiance," *Solar Energy*, no. 132, pp. 332-334, 2016.
- [88] P. Ineichen, "Clear sky and all-weather global and beam irradiance models: long term validation," in *6th PV Performance Modeling and Monitoring Workshop*, Freiburg, Germany, 2016.
- [89] M. Chaâbane, M. Masmoudi, and K. Medhioub, "Determination of Linke turbidity factor from solar radiation measurement in northern Tunisia," *Renewable Energy*, no. 29, pp. 2065-207, 2004.
- [90] C. Rigollier, O. Bauer, and L. Wald, "On the clear sky model of the ESRA-European solar radiation atlas with respect to the Heliostat Method," *Solar Energy*, no. 68, pp. 33-48, 2000.
- [91] M. Reno, "Global horizontal irradiance clear sky models : implementation and analysis.," Informe técnico 2012.
- [92] C. Fernández-Peruchena, M. Blanco, and A. Bernardos, "Increasing the temporal resolution of direct normal solar irradiance series in different climatic zones," *Solar Energy*, no. 115, pp. 255-263, 2015.
- [93] C. Fernández-Peruchena and M. Gastón, "A simple and efficient procedure for increasing the temporal resolution of global horizontal solar irradiance series," *Renewable Energy*, no. 86, pp. 375-383, 2016.

GLOSARIO

AERONET: Red robótica de aerosol	12
AOD: Espesor óptico de aerosoles	1
BSRN: Red de radiación de superficie de referencia	9
CPV: Concentrador fotovoltaico	3
CSP: Concentrador de energía solar	1
DHI: Irradiancia Difusa Horizontal: radiación solar dispersa desde la cúpula del cielo	4
DNI: Irradiancia Directa Normal: radiación directa disponible	3
GEWEX: Experimento mundial de ciclos de energía y agua	9
GHI: Irradiancia Global Horizontal: suma geométrica de directa horizontal y difusa horizontal	4
GIS: Sistemas de Información Geográfica	3
MACC: Seguimiento de la composición atmosférica y del clima	12
NO ₂ : Dióxido de Nitrógeno	1
R: Entorno de software libre para computación estadística y desarrollo de gráficos	19
SODA: Datos de radiación solar	12
WCRP: Programa Mundial de Investigaciones Climáticas	9