



---

**Universidad de Valladolid**

***“Evaluación de la irradiación solar directa  
a partir de la global y su aplicación a la  
tecnología solar”***

**José Luis García Segura**

**Trabajo fin de máster**

**Curso 2015-2016**

**Tutor: Isidro Pérez Bartolomé**



## Agradecimientos

Con este Trabajo Fin de Máster termino una trayectoria en la que he ampliado mis conocimientos y desarrollado mis capacidades gracias a la dedicación y enseñanzas recibidas de muchas personas y a la colaboración de Instituciones sin cuya ayuda no hubiera sido posible alcanzar este punto, es por ello que quiero agradecer a todas ellas sus esfuerzos y actividades.

Así, en primer lugar me gustaría dar las gracias a la Universidad de Valladolid por ofrecerme la posibilidad de terminar los estudios del Máster en “Instrumentación en Física”.

También agradezco al Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Valladolid y a sus miembros, por acogerme y proporcionarme la ayuda y medios necesarios para desarrollar este Trabajo de Fin de Máster.

He de agradecer en gran medida al Tutor de este trabajo, D. Isidro Pérez Bartolomé, y a D<sup>a</sup>. Julia Bilbao Santos, por su ayuda, enseñanzas, explicaciones, por su transferencia de conocimientos, y sobre todo por la confianza depositada en mí desde el primer día.

En este trabajo han sido básicos y de gran utilidad los datos medidos por el personal de varios organismos, es por ello que quiero también mostrar mi agradecimiento al personal de la Agencia Estatal de Meteorología, AEMet, por registrar y facilitar los datos de radiación solar.

Así mismo agradezco la ayuda del personal de la red, Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), perteneciente al Ministerio de Agricultura, infraestructura que registra y divulga datos meteorológicos, que en nuestro caso nos han servido de base para la realización de este Trabajo Fin de Máster.

Deseo manifestar mi agradecimiento a las instituciones internacionales y redes, Agencia Espacial Nacional Americana (NASA), al Sistema de Información Geográfico Fotovoltaico (PVGIS) y al SoDa (Solar Radiation Data), que me han proporcionado valores de irradiación directa normal, con los cuales he podido comparar los resultados que he obtenido.

Gracias también al Ministerio de Economía y Competitividad por el proyecto CGL2011-25363, mediante el cual he podido disponer de los datos y medios necesarios para la realización de este trabajo.

# Índice general

Índice de figuras .....	6
Índice de tablas .....	7
<b>1. Introducción. Motivaciones y objetivos.</b> .....	9
1.1. Marco de trabajo y antecedentes bibliográficos. ....	9
1.2. Objetivos y estructura. ....	10
<b>2. Radiación solar directa, global y difusa.</b> .....	11
2.1. Introducción. ....	11
2.2. Definiciones previas. ....	11
2.3. Factores geométricos que afectan a la radiación solar. ....	13
2.3.1. Movimiento de la Tierra. ....	13
2.3.2. Sistemas de coordenadas. ....	13
2.3.3. Posición del Sol. ....	15
2.4. Propiedades de la atmósfera que influyen en la radiación. ....	16
2.4.1. Altura solar. ....	16
2.4.2. Ozono. ....	17
2.4.3. Nubosidad. ....	18
2.4.4. Aerosoles. ....	19
2.4.5. Albedo superficial. ....	19
<b>3. Instrumentación y medida de la radiación solar.</b> .....	20
3.1. Instrumentos de medida de la irradiancia directa: pirheliómetros. ....	20
3.2. Instrumentos de medida de la irradiancia global y difusa: piranómetros. ....	21
a) Piranómetro térmico. ....	21
b) Piranómetro fotovoltaico. ....	21
3.3. Estaciones de medida. ....	22
3.3.1. La red SIAR. ....	22
3.3.2. La red AEMET. ....	26
a) Descripción general de la red. ....	26
b) Componentes principales de los piranómetros. ....	28
c) Propiedades físicas de los piranómetros. ....	30
d) Calibración de los piranómetros. ....	33
3.3.3. El Centro de Investigación de la Baja Atmósfera (C.I.B.A.) .....	34
<b>4. Datos experimentales.</b> .....	36
<b>5. Método utilizado: evaluación de la irradiación solar directa a partir de la global.</b> .....	39
<b>6. Resultados y discusión.</b> .....	43
6.1. Valores de la irradiación global diaria media mensual. ....	43
6.1.1. Red SIAR. ....	43

a) Andalucía. ....	43
b) Aragón. ....	44
c) Baleares. ....	45
d) Canarias. ....	45
e) Castilla-la Mancha. ....	46
f) Castilla y León. ....	46
g) Comunidad Valenciana. ....	48
h) Galicia. ....	49
i) Navarra. ....	49
6.1.2. Red AEMET y estación de Villalba de los Alcores. ....	50
6.2. Valores de la irradiación directa normal anual. ....	52
6.2.1. Red AEMET y estación de Villalba de los Alcores. ....	52
6.2.2. Red SIAR. ....	53
6.3. Comparación de los resultados con los proporcionados por tres bases de datos. ....	55
6.4. Comparación de los valores calculados con valores medidos. ....	60
6.5. Mapas de irradiación directa normal anual. ....	61
<b>7. Conclusiones.</b> ....	66
<b>Referencias</b> .....	68
<b>Direcciones web consultadas</b> .....	70
<b>Anexos</b> .....	71

## Índice de figuras

### Capítulo 2

- Figura 2.1. Principales componentes de la radiación solar. ....12
- Figura 2.2. Coordenadas horizontales. ....14
- Figura 2.3. Coordenadas horarias. ....14
- Figura 2.4. Posición del Sol. ....16

### Capítulo 3

- Figura 3.1. Ejemplo de un pirheliómetro. ....20
- Figura 3.2. Imagen de una estación de la red SIAR. ....23
- Figura 3.3. Respuesta espectral del piranómetro SP1110 .....24
- Figura 3.4. Corrección del coseno para el SP1110 .....24
- Figura 3.5. Imagen del piranómetro Skye SP1110 .....25
- Figura 3.6. Imagen del Datalogger Campbell Scientific CR10X .....26
- Figura 3.7. Instrumentación de una estación radiométrica tipo (CRN-Madrid). ....28
- Figura 3.8. Detalle de la construcción de un piranómetro. ....28
- Figura 3.9. Piranómetro Kipp-Zonen modelo CM-11 .....30
- Figura 3.10. Espectro de irradiancia solar en la superficie de la Tierra y respuesta del piranómetro. ....31
- Figura 3.11. Datalogger CM23X de Campbell Scientific. ....35

### Capítulo 4

- Figura 4.1. Valores de la irradiación global diaria media mensual en Tordesillas ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), desde enero de 2005 hasta enero de 2015. ....37

### Capítulo 5

- Figura 5.1. Diagrama que muestra los apartados 1-8 del método propuesto. ....42
- Figura 5.2. Diagrama que muestra los apartados 9-14 del método propuesto. ....42

### Capítulo 6

- Figura 6.1. Error de la DNI anual para tres estaciones de la red AEMET. ....57
- Figura 6.2. Error de la DNI anual para tres estaciones de la red SIAR. ....60
- Figura 6.3. Valores calculados de la DNI anual en función de los valores medidos ( $\text{kWh m}^{-2}$ ) .....61
- Figura 6.4. Mapa de la DNI anual (en  $\text{kWh m}^{-2}$ ) calculada con el método propuesto, para las estaciones de la red AEMET. ....62
- Figura 6.5. Mapa de la DNI anual (en  $\text{kWh m}^{-2}$ ) calculada con el método propuesto, para las estaciones de la red SIAR. ....63
- Figura 6.6. Mapa de la DNI anual (en  $\text{kWh m}^{-2}$ ) para los valores medidos. ....64
- Figura 6.7. Mapa de la DNI anual en Europa ( $\text{kWh m}^{-2}$ ) .....64

## Índice de tablas

### Capítulo 3

- Tabla 3.1. Valores de resolución y precisión del Datalogger Campbell Scientific CR10X. .25
- Tabla 3.2. Características de los piranómetros CM-11 y CM-21 de Kipp-Zonen. ....30
- Tabla 3.3. Características del datalogger CR23X de la casa Campbell Scientific. ....35

### Capítulo 4

- Tabla 4.1. Estaciones de la red SIAR consultadas en Castilla y León, y fechas de inicio y final de la toma de datos. ....36
- Tabla 4.2. Estaciones de la red SIAR consultadas en diferentes Comunidades Autónomas y fechas de inicio y final de la toma de datos. ....36
- Tabla 4.3. Estaciones de la red AEMET consultadas y fechas de inicio y final de la toma de datos. ....38

### Capítulo 6

- Tabla 6.1. Valores de la irradiación global diaria media mensual en las provincias de Almería, Cádiz, Córdoba y Granada ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....43
- Tabla 6.2. Valores de la irradiación global diaria media mensual en las provincias de Huelva, Jaén, Málaga y Sevilla ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....44
- Tabla 6.3. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Aragón ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....44
- Tabla 6.4. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Baleares ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....45
- Tabla 6.5. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Canarias ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....45
- Tabla 6.6. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Castilla- la Mancha ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....46
- Tabla 6.7. Valores de irradiación global diaria media mensual en las provincias de Ávila y Burgos ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....46
- Tabla 6.8. Valores de irradiación global diaria media mensual en las provincias de León y Palencia ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....47
- Tabla 6.9. Valores de la irradiación global diaria media mensual en las provincias de Salamanca, Segovia, Soria y Zamora ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....47
- Tabla 6.10. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la provincia de Valladolid ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....48
- Tabla 6.11. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad Valenciana ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....48
- Tabla 6.12. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Galicia ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....49
- Tabla 6.13. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Navarra ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....49

- Tabla 6.14. Valores de la irradiación global y de la insolación diaria media mensual en las estaciones de medida de la red AEMET ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) (I) .....	50
- Tabla 6.15. Valores de la irradiación global y de la insolación diaria media mensual en las estaciones de medida de la red AEMET ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) (II) .....	50
- Tabla 6.16. Valores de la irradiación global y de la insolación diaria media mensual en las estaciones de medida de la red AEMET ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) (III) y en la estación de Villalba de los Alcores. ....	51
- Tabla 6.17. Coordenadas geográficas e irradiación directa normal anual calculada en las estaciones de medida de la red AEMET de la península Ibérica y en la estación de Villalba de los Alcores. ....	52
- Tabla 6.18. Coordenadas geográficas e irradiación directa normal anual calculada en las estaciones de la red SIAR en Castilla y León. ....	53
- Tabla 6.19. Coordenadas geográficas e irradiación directa normal anual calculada en las estaciones de la red SIAR en Andalucía, Aragón Baleares, Canarias, Castilla- la Mancha, Comunidad Valenciana, Galicia y Navarra. ....	54
- Tabla 6.20. Comparación entre la DNI anual calculada con el método propuesto y la DNI anual proporcionada por las bases de datos NASA-SSE, Climate-SAF PVGIS y SoDa, para las estaciones de la red AEMET en la península Ibérica ( $\text{kWh m}^{-2}$ ) .....	56
- Tabla 6.21. Comparación entre la DNI anual calculada con el método propuesto y la DNI anual proporcionada por las bases de datos NASA-SSE, Climate-SAF PVGIS y SoDa, para las estaciones de la red SIAR en Castilla y León ( $\text{kWh m}^{-2}$ ) .....	57
- Tabla 6.22. Comparación entre la DNI anual calculada con el método propuesto y la DNI anual proporcionada por las bases de datos NASA-SSE, Climate-SAF PVGIS y SoDa, para las estaciones de la red SIAR en Andalucía, Aragón, Baleares, Castilla-la Mancha, Comunidad Valenciana, Galicia y Navarra ( $\text{kWh m}^{-2}$ ) .....	58
- Tabla 6.23. Comparación entre valores calculados y medidos de la DNI anual en las estaciones de la red AEMET en la península Ibérica y en la estación de Villalba de los Alcores. ....	60



## 1. Introducción. Motivaciones y objetivos.

En esta introducción se presenta el marco en el que se desarrolla este trabajo de investigación, los antecedentes bibliográficos más interesantes y los objetivos planteados. Además, se detalla la estructura del mismo.

### 1.1. Marco de trabajo y antecedentes bibliográficos.

En este trabajo se presenta un método para estimar la irradiación solar directa a partir de la global y también se comentará la aplicación que tiene en los dispositivos fotovoltaicos el conocimiento de dicha irradiación solar directa. En concreto, se verá la importancia de la misma en los llamados **concentradores fotovoltaicos** (CPV). Ellos están basados en el uso de dispositivos ópticos que incrementan la luz recibida en la superficie de la célula solar (Pérez-Higueras, *et al.* 2011). El mecanismo de concentración se consigue mediante lentes o espejos que reflejan o refractan la luz del sol en la superficie de la célula receptora. Dependiendo del proceso de concentración, así como del área de la concentración, hay un amplio rango de configuraciones ópticas que se pueden usar en la implementación de un concentrador fotovoltaico (Sala, *et al.* 2003).

El uso de concentradores implica que los dispositivos fotovoltaicos antes mencionados solo funcionan con la **irradiancia directa normal (DNI)**. Por tanto, es necesario conocer datos de la DNI para estimar la energía que producirá el sistema, realizar análisis económicos, supervisar la operación, etc. Sin embargo, las medidas terrestres de la DNI son caras y raramente disponibles debido a la sofisticación de los equipos de medida y a los requisitos de procesamiento de datos.

La escasez de medidas de la DNI contrasta con la disponibilidad de las medidas de la irradiación solar global horizontal (Pérez-Higueras, *et al.* 2012). Por tanto, sería interesante disponer de un procedimiento que calcule la irradiación directa normal a partir de la global. En la literatura se pueden encontrar varios modelos para calcular la DNI a partir de diferentes parámetros (Ineichen, *et al.* 2000; Pérez, *et al.* 2002; Schillings, *et al.* 2004; Martins, *et al.* 2007; Janjai, 2010). Estos modelos son precisos pero algunos de ellos son complejos y difíciles de aplicar, especialmente porque requieren datos de entrada que no son fáciles de obtener, como pueden ser medidas tomadas de imágenes de satélites. En este trabajo se presenta un modelo simplificado para calcular la DNI, obtenido de varios modelos previos propuestos por diferentes autores. Una de las ventajas de este modelo es que sólo requiere la latitud y la irradiación global como variables de entrada, valores que se pueden obtener con facilidad.

Por otra parte, también interesa comparar los valores calculados de la DNI con los proporcionados por diversas bases de datos operativas en Europa: NASA Surface Meteorology and Solar Energy (NASA-SSE), Climate - SAF PVGIS (PhotoVoltaic Geographical Information System) y SoDa (Solar radiation Data). Diferentes autores (Súri, *et al.* 2009) han realizado dichas comparaciones, demostrando que en la mayor parte de las zonas de Europa la incertidumbre de la DNI anual, expresada por medio de la desviación estándar, puede llegar a ser de hasta el 17 %. En el presente trabajo también se comprobará que existe una gran variabilidad entre los valores calculados y los que proporcionan estas bases de datos.

Por último, también se desean obtener mapas de isolíneas de la DNI anual en España. Otros autores (Pérez-Burgos, *et al.* 2014; Pérez-Burgos, *et al.* 2015) han obtenido mapas de este tipo en diversas ciudades de España, pero no para la DNI anual sino para la DNI horaria media mensual. También se han obtenido diagramas de isolíneas de irradiación global diaria en Castilla y León (de Miguel, *et al.* 1994), mapas de radiación global horizontal y de irradiación directa normal diaria en Vietnam (Polo, *et al.* 2015) y mapas de irradiación global anual horizontal en Grecia (Kambezidis, *et al.* 2015).

## **1.2. Objetivos y estructura.**

En este apartado se enumeran los objetivos y se detalla la estructura del presente trabajo.

Los objetivos principales de este trabajo son obtener valores de la DNI en España, compararlos con los proporcionados por varias bases de datos y con medidas realizadas en tierra, y obtener mapas de isolíneas de la DNI anual en la península Ibérica.

La presente memoria consta de siete capítulos, una sección con las referencias consultadas, y una serie de anexos.

En el *primer capítulo* se ha visto el marco de trabajo, los antecedentes bibliográficos y los objetivos propuestos.

En el *segundo capítulo* se verá una introducción teórica sobre la radiación solar, en la que se mostrarán los distintos parámetros geométricos y atmosféricos que influyen en la misma.

En el *tercer capítulo* se explicarán los distintos instrumentos de medida de la radiación solar (piranómetros, pirheliómetros,...) y se describirán las estaciones de medida que se han consultado, correspondientes a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y al Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). También se explicará cómo son los instrumentos de dichas estaciones de medida. Se hará lo mismo para la estación de Villalba de los Alcores.

En el *cuarto capítulo* se enumerarán las estaciones de medida consultadas, tanto para la red SIAR como para la red AEMET. Se indicarán también las fechas de inicio y final de la toma de datos.

En el *quinto capítulo* se explicará el modelo utilizado, consistente (como ya se ha dicho) en estimar la irradiación solar directa normal a partir de la global.

En el *sexto capítulo* se darán los resultados que se han obtenido tras aplicar el modelo, para las estaciones de la red AEMET y SIAR y para la de Villalba de los Alcores. Se compararán dichos resultados con los proporcionados por tres bases de datos (NASA-SEE, Climate-SAF PVGIS y SoDa) y con mediciones realizadas en tierra. También se presentarán mapas de la DNI anual en España, tanto para la red AEMET como para la red SIAR, y para los valores medidos de la DNI.

En el *séptimo capítulo* se resumen los principales resultados y conclusiones obtenidos en este trabajo de investigación.

## 2. Radiación solar directa, global y difusa.

### 2.1. Introducción.

El flujo de radiación solar que llega a la Tierra es la fuente primaria de todas las formas de energía conocidas. La radiación solar es el origen de los movimientos de circulación de la atmósfera y el océano, de la vida vegetal o de los combustibles fósiles entre otros.

Las características más singulares que presenta dicha radiación son su gran dispersión (por tanto, su baja densidad) y su intermitencia o variabilidad en el tiempo. Estas dos características son de gran importancia cuando se intenta aprovechar la energía procedente del Sol. Desde el punto de vista de los sistemas de utilización de la energía solar, interesa cuantificar la cantidad de radiación solar que incide sobre una superficie en la Tierra, y su relación con los parámetros geográficos y climatológicos.

La complejidad de los fenómenos que afectan a la radiación solar en su camino a través de la atmósfera es el principal problema que aparece a la hora de cuantificar la disponibilidad energética. Se puede conocer con suficiente precisión la energía emitida por el Sol en un momento determinado, pero no es sencillo estimar la cantidad de energía que alcanza la superficie de la Tierra. Desde que esta energía entra en la atmósfera, dos tipos de factores influyen en su recorrido a través de la misma hasta alcanzar la tierra; unos son de naturaleza determinista y otros se pueden denominar aleatorios.

-Entre los factores deterministas se encuentran los factores astronómicos, que dependen de la geometría Sol-Tierra. Son función de la posición relativa de ambos y del lugar de la Tierra que se considere. Estos factores condicionan el recorrido de la radiación a través de la atmósfera y el ángulo de incidencia sobre la misma.

-Los otros factores que inciden en la cantidad de energía que se recibe en la superficie de la Tierra son los factores climáticos. Estos son los responsables de que se produzca una atenuación en la cantidad de energía que podría alcanzar la Tierra. Estos factores, a diferencia de los astronómicos, no son fácilmente cuantificables. Algunos componentes de la atmósfera son los responsables de dicha atenuación: vapor de agua, aerosoles, ozono y nubes.

### 2.2. Definiciones previas.

En este apartado se describen los conceptos de radiación solar extraterrestre, directa, global y difusa, así como los de índice de claridad y fracción difusa de la radiación global (Iqbal, 1983).

La **radiación solar extraterrestre** es la radiación solar diaria que se recibe sobre una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera. Se define a partir del valor de la constante solar, que es la cantidad de radiación que se recibe en la capa superior de la atmósfera, sobre una superficie unidad perpendicular a los rayos solares y a una distancia del Sol media. En consecuencia, para calcular la radiación solar extraterrestre se debe corregir la constante solar considerando que la distancia Sol-Tierra varía a lo largo del año, y pasando también de una superficie perpendicular a los rayos solares a una horizontal a la Tierra.

La **radiación directa** es aquella que procede del disco solar, la cual se atenúa por la presencia de nubes en su camino, además de otros componentes presentes en la atmósfera. La reducción de la radiación directa debido a las nubes depende del tipo de nube, de su espesor y del número de capas de dicha nube.

La radiación descendente que se recibe, en un ángulo sólido de  $2\pi$  estereorradianes, sobre una superficie horizontal (con la excepción del ángulo sólido subtendido por el sol) se llama **radiación difusa**. Se produce cuando la radiación directa interacciona con las moléculas de aire y con los aerosoles. Además, se produce la interacción de la radiación solar directa con las nubes (o con las capas de nubes, si éstas están en capas), que da lugar a la llamada **radiación difusa reflejada**.

La determinación teórica de la radiación directa y difusa es compleja, ya que se requieren datos del tipo y propiedades ópticas de las nubes, de la cantidad de ellas, de su espesor, posición y del número de capas.

La suma de la radiación directa y difusa, para cualquier superficie, es la **radiación global**. Una práctica habitual, que es la que se ha seguido en este trabajo, consiste en estimar la componente difusa de la radiación a partir de la global, la cual se ha medido con un piranómetro. En la siguiente figura se pueden observar las componentes de la radiación mencionadas hasta ahora.

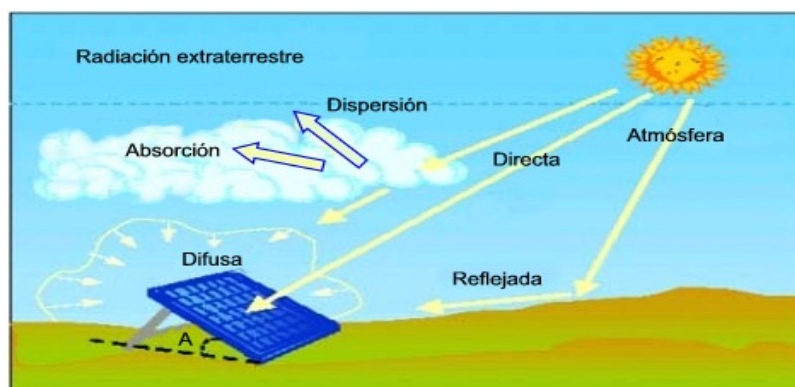


Figura 2.1. Principales componentes de la radiación solar.

La irradiancia directa recibida en un plano normal a los rayos del sol se denomina **irradiancia directa normal (DNI)**. La DNI, en sentido estricto, es el flujo radiante recogido por una superficie de  $1 \text{ m}^2$  normal a la dirección del sol, dentro de la extensión del disco solar. Sin embargo, la definición de la DNI siguiendo las normas ISO9050, ISO9060, ISO9488 e ISO9846, está relacionada con la irradiancia que se mide por medio de los pirheliómetros, que tienen un campo de visión que varía típicamente entre  $5$  y  $5.7^\circ$  (Kleissl, 2013).

El **índice de claridad** se define como el cociente entre la radiación global y la extraterrestre, y su valor oscila entre 0 y 1. La **fracción difusa de la radiación global** se define como el cociente entre la radiación difusa y la global. En el capítulo cinco se darán expresiones para obtener ambas magnitudes.

## 2.3. Factores geométricos que afectan a la radiación solar.

### 2.3.1. Movimiento de la Tierra.

La Tierra tiene dos movimientos: uno de rotación, alrededor de un eje que pasa por los polos (el eje polar), cuya duración media es de 24 horas; y un movimiento de traslación, por el cual describe una órbita elíptica llamada **eclíptica**, y en uno de los focos de dicha elipse se encuentra el Sol. La duración de una vuelta completa es de 365 días, 5 horas, 48 minutos y 46 segundos; y la velocidad de traslación es de  $29,8 \text{ km s}^{-1}$ . Dada su pequeña excentricidad ( $e = 0,0167$ ) la órbita puede considerarse circular y suponer que el Sol se encuentra en el centro de la misma.

El eje polar de la Tierra mantiene durante el movimiento una dirección aproximadamente constante y forma un ángulo de  $23,45^\circ$  con el eje de la eclíptica, llamado **oblicuidad de la eclíptica**. Este parámetro explica, por un lado, el distinto calentamiento de la Tierra al variar su posición a lo largo de la órbita y por otro lado, la diferente duración del día y la noche a lo largo del año. En verano, el ángulo que forman los rayos del Sol con la dirección norte del eje polar es menor de  $90^\circ$ . En cualquier lugar del hemisferio norte, los rayos inciden con un ángulo menor respecto a la normal a la superficie que en un lugar del hemisferio sur con la misma latitud. Por ello, la componente normal de los rayos solares a un plano horizontal es mayor en el hemisferio norte que en el sur. Esto produce un calentamiento mayor en el hemisferio norte durante el verano.

La distancia más corta entre la Tierra y el Sol es el perihelio y la mayor el afelio. La distancia media Tierra-Sol,  $r_0$ , es una unidad astronómica (UA) y su valor es  $1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$ . La rotación de la Tierra alrededor de su eje causa cambios en la distribución de la radiación solar a lo largo del día, y la posición de este eje respecto al Sol causa los cambios estacionales. Se utiliza la siguiente expresión (Duffie, *et al.* 2006) para evaluar la relación  $r_0$  y  $r$ , distancia Tierra-Sol, en función del día del año,  $d_n$ :

$$\varepsilon_{0 \text{ dm}} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (2.1)$$

### 2.3.2. Sistemas de coordenadas.

Para conocer de modo más preciso la influencia del Sol no basta con una descripción meramente cualitativa. Hacen falta obtener resultados numéricos. Para ello se van a introducir ciertos sistemas de coordenadas que permiten describir el movimiento aparente del Sol y conocer su posición en un instante dado.

Para estudiar las posiciones de los astros se consideran éstos proyectados sobre la **Esfera Celeste**, que se toma de radio unidad, de modo que el ángulo entre dos direcciones se mide directamente en unidades de arco, sobre círculos máximos de la esfera. Ahora bien, para determinar la posición de un punto en este sistema es necesario definir una referencia. Para ello se elige un círculo máximo llamado fundamental, determinado por la intersección con la esfera de un plano que pasa por su centro. La recta perpendicular al plano que contiene el círculo

fundamental pasando por el centro de la esfera se llama **eje polar** y los puntos  $P_1$  y  $P_2$  se llaman **polos**. Todos los círculos máximos que pasan por los polos son perpendiculares al fundamental y se llaman círculos secundarios.

Puesto que la dirección del Sol, en cada instante, depende del movimiento aparente de éste y del desplazamiento del observador, se ha de tener en cuenta el lugar de observación sobre la superficie terrestre y definir la posición de un observador sobre ella. Esto se hace mediante las llamadas **coordenadas geográficas**. Para definir estas coordenadas en un lugar de la superficie terrestre, se supone la esfera celeste centrada en el punto de observación de la Tierra. Una recta paralela a la vertical astronómica del lugar, que es la dirección de la gravedad, indicada por la plomada y que pasa por el centro de la esfera celeste, la corta en dos puntos: el **cenit astronómico celeste**  $Z$ , en la dirección situada encima del observador; y el **nadir**  $Z'$ , por abajo. El **Meridiano celeste del lugar**, es el círculo máximo que pasa por el cenit del observador y los polos celestes.

Una vez definidas las coordenadas que fijan un punto en la esfera celeste, se van a dar dos sistemas de representación para determinar la posición del Sol sobre esta esfera, considerando que el punto de observación se encuentra en el centro de la misma.

**a) Sistema de coordenadas horizontales.**

El plano fundamental en este sistema es el plano  $HH'$  del horizonte astronómico del lugar que pasa por el centro de la esfera celeste y se llama **horizonte astronómico celeste**. El eje fundamental es la vertical astronómica del lugar (dirección del hilo de la plomada) que pasa por el centro de la esfera celeste. Las coordenadas horizontales son (ver figura 2.2):

-*Acimut  $A_z$* , es el arco del horizonte celeste comprendido entre el punto Sur y el punto  $S'$  donde el círculo secundario que pasa por el Sol  $S$ , corta al horizonte. Se mide de 0 a  $360^\circ$  a partir del sur en sentido SWNE o bien de 0 a  $180^\circ$  hacia el Oeste y de 0 a  $-180^\circ$  hacia el Este.

-*Altura  $h$* , es el arco  $SS'$  del círculo secundario que pasa por  $S$ , comprendido entre este punto y el horizonte. Se mide a partir del horizonte de 0 a  $90^\circ$ , positivamente hacia el cenit y negativamente hacia el nadir. En lugar de la altura, se emplea la **distancia cenital  $\theta_z$** , que es el arco complementario de  $h$ , es decir:  $\theta_z = 90 - h$ .

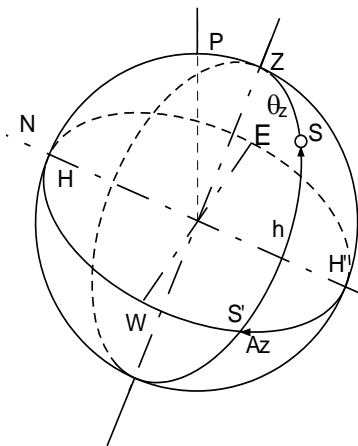


Figura 2.2. Coordenadas horizontales.

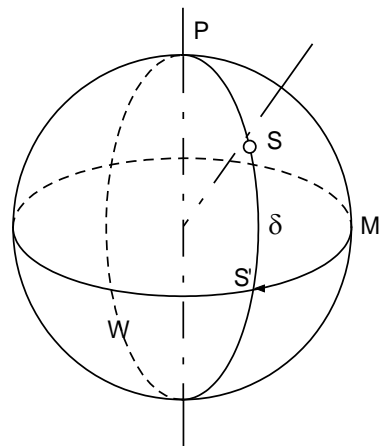


Figura 2.3. Coordenadas horarias.

## b) Sistema de coordenadas horarias.

El plano fundamental es el *ecuador celeste*, que se define como el plano paralelo al ecuador terrestre que pasa por el centro de la esfera celeste. El eje fundamental es el eje polar que pasa por los polos celestes (Norte y Sur); y se llaman **círculos horarios** a los círculos secundarios que pasan por los polos y **paralelos celestes** a los círculos menores paralelos al ecuador. Las coordenadas horarias son (ver figura 2.3):

-El *ángulo horario*  $\omega$ , de S (posición del Sol) es el arco  $MS'$  del ecuador celeste comprendido entre el meridiano del lugar y el círculo horario que pasa por S. Se cuenta sobre el ecuador a partir del punto de intersección M, entre el meridiano del lugar y el ecuador de 0 a 24 h, en sentido WNES. También se mide de 0 a  $180^\circ$  con signo positivo hacia el Oeste y con signo negativo hacia el Este.

-La *declinación*  $\delta$  es el arco  $SS'$  del círculo horario que pasa por S, comprendido entre la posición del Sol S y el ecuador. Se mide desde el ecuador de 0 a  $90^\circ$ , positivamente hacia el polo norte y negativamente hacia el polo sur.

Como consecuencia de la rotación de la Tierra alrededor de su eje polar, el Sol recorre en su movimiento aparente un paralelo celeste. Por tanto, se puede considerar que la declinación es constante a lo largo del día y que el ángulo horario varía proporcionalmente al tiempo. Los puntos de intersección de la órbita aparente del Sol con el plano del horizonte se llaman **orto** y **ocaso** y corresponden a la salida y puesta del Sol. Por efecto de la traslación de la Tierra y de la inclinación de su eje polar respecto al eje de la eclíptica, el arco diurno tiene una longitud variable, siendo máxima en el solsticio de verano y mínima en el de invierno.

El plano de giro de la Tierra alrededor del Sol se llama **plano de la eclíptica**. La Tierra gira alrededor de su eje polar, que está inclinado  $23,5^\circ$  respecto a la perpendicular al plano de la eclíptica. Este ángulo permanece constante a lo largo del año; sin embargo, el ángulo formado por una línea que una los centros de la Tierra y del Sol y el plano ecuatorial varía cada día. Este ángulo es, como ya se ha visto, la declinación solar  $\delta$ . La declinación es cero en los equinoccios y varía entre  $+23,5$  y  $-23,5^\circ$ . Es mayor que cero en verano para el hemisferio Norte.

### 2.3.3. Posición del Sol.

Mediante las coordenadas horizontales y horarias definidas se determina el triángulo astronómico PZS. Aplicando a este triángulo las relaciones trigonométricas de la resolución de triángulos esféricos (ver anexo 3), se obtiene:

$$\text{sen } h = \text{sen } \varphi \text{ sen } \delta + \text{cos } \varphi \text{ cos } \delta \text{ cos } \omega \quad (2.2)$$

$$\text{cos } \theta_z = \text{sen } \varphi \text{ sen } \delta + \text{cos } \varphi \text{ cos } \delta \text{ cos } \omega \quad (2.3)$$

El acimut del Sol,  $A_z$ , en función del ángulo horario, de la declinación y de la altura, viene dado por la expresión:

$$\text{sen } A_z = \frac{\text{sen } \omega \text{ cos } \delta}{\text{cos } h} \quad (2.4)$$

De la ecuación (2.2) se deducen los ángulos horarios correspondientes al orto y al ocaso, haciendo  $h = 0$ . Resulta la siguiente expresión:

$$\cos \omega_s = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta \quad (2.5)$$

El ángulo  $\omega_s$  se considera con signo negativo si corresponde a la salida del Sol y positivo si corresponde a la puesta.

Se puede usar la siguiente expresión para el cálculo de la declinación (en grados):

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left( \frac{360(284+d_n)}{365} \right) \quad (2.6)$$

en la que  $d_n$  es el día juliano.

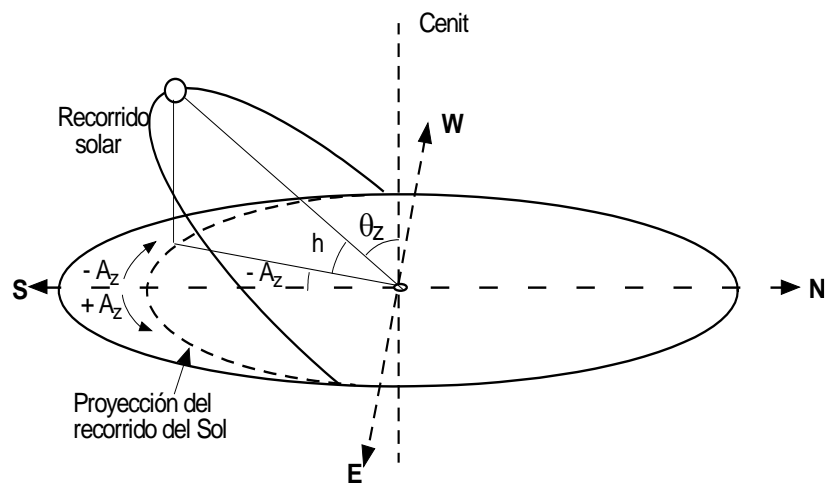


Figura 2.4. Posición del Sol.

## 2.4. Propiedades de la atmósfera que influyen en la radiación.

Desde el momento en el que la radiación solar atraviesa la cima de la atmósfera, la radiación comienza a experimentar fenómenos de absorción y dispersión por parte de los constituyentes atmosféricos, que van a determinar los niveles de radiación que alcanzarán la superficie. Los principales factores que actúan sobre la radiación son los siguientes:

### 2.4.1. Altura solar.

El factor que más influencia tiene sobre la radiación global es la altura solar, que se define como el ángulo formado por el plano del horizonte y la dirección al Sol. Este factor presenta un doble efecto modulador sobre la radiación que alcanza la superficie. Por un lado, el efecto geométrico de la conocida Ley del Coseno (ecuación 2.7), que establece que la irradiancia medida en una superficie horizontal es igual a la irradiancia de incidencia normal multiplicada por el coseno del ángulo que forman la dirección de propagación con la dirección normal a la superficie.



$$G_0 = G_{0n} \cos(\theta_z) \quad (2.7)$$

donde  $G_0$  es la irradiancia sobre una superficie horizontal,  $G_{0n}$  es la irradiancia extraterrestre en una superficie normal a los rayos del Sol y  $\theta_z$  es el ángulo cenital solar.

Por otro lado, la altura solar determina el camino óptico que recorre la radiación solar desde la cima de la atmósfera hasta que alcanza la superficie terrestre. Por tanto, a menores alturas solares mayor será el camino óptico que tiene que atravesar la radiación y, como consecuencia se acentuarán más los procesos de atenuación de la radiación por los componentes atmosféricos, como el ozono y los aerosoles.

La evolución anual de la altura solar depende de la geometría Tierra-Sol y de la latitud del lugar. Por otra parte, la altura solar es la responsable de la evolución diaria que presenta la radiación solar, siendo máxima en las horas centrales del día (cuando esta altura es mayor).

Para tener cuantificada la altura solar se usa el parámetro conocido como **masa óptica de aire relativa**, que se calcula a partir de la ecuación 2.8 (propuesta por Kasten and Young en 1989):

$$m = 1/\cos [\theta_z + 0,050572 (96,07995 - \theta_z)^{-1,6364}] \quad (2.8)$$

en la que  $\theta_z$  es el ángulo cenital del sol (complementario de la altura solar).

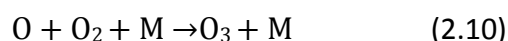
#### 2.4.2. Ozono.

El ozono se encuentra principalmente entre los 12 y 35 km de altitud. El parámetro más usado para medir la cantidad de ozono presente en la atmósfera es la columna total de ozono (TOC), definida como el grosor de la columna vertical de ozono sobre un área si se llevase a condiciones estándar de presión y temperatura (i.e., 0°C y 1 atm). Las unidades naturales de la TOC son atm-cm, pero normalmente se suele expresar en Unidades Dobson (UD), con la equivalencia 1atm-cm = 1000 UD.

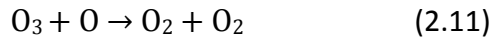
El ozono se forma y se destruye mediante una serie de reacciones fotoquímicas, conocidas como el ciclo de Chapman (Antón, 2007; Salvador, 2007). La formación del ozono ocurre a partir de la fotodisociación del oxígeno molecular por la absorción de radiación UV de longitud de onda inferior a 240 nm (ver la siguiente reacción).



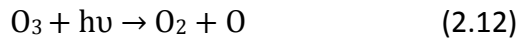
Estos átomos de oxígeno liberados, en combinación con las moléculas de oxígeno y en presencia de un catalizador M (generalmente nitrógeno) que actúa como receptor de la energía liberada, dan lugar a la formación de ozono ( $O_3$ ), como se puede ver en la siguiente reacción:



Simultáneamente a la formación, el ozono se destruye por dos mecanismos básicos. Puede reaccionar con el oxígeno atómico, buscando la configuración estable,



o también puede ser fotodisociado al incidir una radiación UV de longitud de onda comprendida entre 200 y 340 nm. (ver ecuación 2.12). Pero el oxígeno atómico tiene un tiempo de vida muy corto antes de reaccionar con el molecular, por medio de la ecuación 2.10. Con lo que el resultado neto de estas reacciones se traduce en una transformación de la radiación ultravioleta incidente en energía calorífica que es absorbida por la estratosfera.



Además de este ciclo, otro factor que determina la cantidad de ozono en un instante determinado sobre un área, es el transporte de este gas por parte de los vientos estratosféricos, descritos por la circulación de Brewer-Dobson. Estos vientos son debidos a la diferencia de temperatura en la estratosfera (debida, en parte, al aporte de energía explicado en el párrafo anterior). Estos vientos estratosféricos transportan el ozono desde zonas con producción neta (los trópicos, debido a que es la zona donde llega más radiación) a zonas de pérdida neta (los polos, donde las noches duran seis meses y, por lo tanto, prácticamente no existe producción de ozono).

Por último, la acción del hombre también influye en la cantidad de ozono sobre un lugar concreto. La utilización de compuestos CloroFluoroCarbonos (CFC's), halógenos, pruebas nucleares,... hacen que la destrucción del ozono se acentúe. También existen causas naturales, como erupciones volcánicas, que promueven una destrucción de ozono.

La sensibilidad de la irradiancia en superficie a variaciones de ozono de  $\pm 100$  UD es solo de aproximadamente  $1 \text{ Wm}^2$ , indicando que no es crítica la determinación precisa de la cantidad de ozono en los cálculos de irradiancia en superficie.

### 2.4.3. Nubosidad.

El estudio del efecto de la nubosidad en la radiación es complejo debido a la gran variabilidad temporal y espacial de las propiedades de las nubes y a las dificultades de caracterizar sus propiedades ópticas.

Para cuantificar la cantidad de nubes en un periodo de tiempo fijado se dispone de dos métodos. El primero, las octas de superficie de esfera celeste cubiertas por nubosidad. Se suelen establecer cuatro grupos: despejados (0 octas), parcialmente nublado (de 1 a 3 octas), nublado (de 4 a 7 octas) y cubierto (8 octas).

A parte de esta observación directa, existe otra variable que permite cuantificar la presencia de nubes: la transmitancia hemisférica global o **índice de claridad global** ( $k_t$ ). Y se define según la siguiente ecuación:

$$K_t = \frac{G}{G_0} \quad (2.13)$$

donde  $G$  es el valor medido de radiación global, y  $G_0$  el valor de la radiación solar extraterrestre para el mismo intervalo de tiempo (Iqbal, 1983). En el capítulo cinco se dará una expresión para la radiación solar extraterrestre  $y$ , en consecuencia, una manera de obtener el índice de claridad global.

#### 2.4.4. Aerosoles.

Los aerosoles atmosféricos son partículas y moléculas, en estado sólido o líquido, que se encuentran en suspensión en la atmósfera. Pueden ser de origen natural (esporas, polen, erupciones volcánicas,...) o bien de origen antropogénico (en su mayoría asociados a procesos de combustión).

Los aerosoles se caracterizan según sus propiedades ópticas. El parámetro más usado es el **espesor óptico de aerosoles** (AOT). Dicho parámetro varía suavemente con la longitud de onda, ajustándose a una función potencial (ver ecuación 2.14, dada por Ångström en 1929).

$$AOT_{\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2.14)$$

donde el parámetro  $\beta$  es el *parámetro de turbiedad de Ångström* y  $\alpha$  el *exponente de Ångström*.

La mayor parte de los aerosoles se concentra en la troposfera, debido a la abundancia de fuentes de éstos cerca de la superficie. Además, la tropopausa ejerce de barrera térmica e impide la ascensión de aerosoles a la estratosfera.

Los aerosoles tienen un efecto importante en la irradiancia en superficie, ya que absorben y difunden radiación solar. Es necesario disponer de información tanto del tipo como de la profundidad óptica de aerosoles. Para el cálculo de la irradiancia directa solo es importante la profundidad óptica de aerosoles (Aerosols Optical Depth; AOD), ya que este parámetro está directamente relacionado con la atenuación de la radiación directa. Sin embargo, para la determinación de la irradiancia global es importante disponer de información acerca del tipo de aerosoles debido a que este determina la relación entre la absorción y la difusión por partículas.

#### 2.4.5. Albedo superficial.

El albedo de una superficie se define como el cociente entre la radiación reflejada y la incidente. La influencia que ejerce sobre la radiación depende, principalmente, del tipo de superficie, de la rugosidad y de la longitud de onda de la radiación incidente. Por ejemplo, la mayor parte de superficies naturales (tales como hierba, tierra y agua) reflejan menos del 10% de la radiación incidente. Pero otras superficies, como por ejemplo la nieve y la arena, pueden reflejar gran parte de la radiación incidente, con lo que contribuyen de forma notoria a aumentar la radiación difusa  $y$ , por tanto, la dosis de radiación UV recibida en la superficie terrestre.

### 3. Instrumentación y medida de la radiación solar.

En este capítulo se explica el funcionamiento de los instrumentos de medida de la radiación solar directa, global y difusa. Después se dará una descripción general de las redes SIAR y AEMET y se explicarán las características de los equipos instalados en las estaciones de medida de dichas redes. Se hará lo mismo para la estación de Villalba de los Alcores.

#### 3.1. Instrumentos de medida de la irradiancia directa: pirheliómetros.

La irradiancia solar directa se mide con unos instrumentos llamados pirheliómetros, los cuales se colocan orientados al sol para seguir su movimiento (Iqbal, 1983). La luz del sol entra en dichos instrumentos a través de una ventana y es dirigida sobre una termopila, que convierte el calor en una señal eléctrica que se puede grabar. El voltaje de la señal es convertido, a través de una ecuación, a unidades de irradiancia ( $\text{W m}^{-2}$ ).

El primer pirheliómetro fue desarrollado en 1837 por el físico francés Claude Pouillet (1791-1868) para realizar las primeras medidas cuantitativas del calor emitido por el sol. El valor que obtuvo para la constante solar fue de  $1227 \text{ W m}^{-2}$ , lo suficientemente cercano de la estimación actual, que es  $1367 \text{ W m}^{-2}$  (Vignola, *et al.* 2012).



Figura 3.1. Ejemplo de pirheliómetro.

Las especificaciones de medición de los pirheliómetros están sujetas a los estándares de la Organización Internacional para la Normalización (ISO) y de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Las comparaciones entre pirheliómetros para su intercalibración se llevan a cabo con regularidad para medir la cantidad de energía solar recibida. El objetivo de esas comparaciones internacionales, que tienen lugar cada 5 años en el Centro Mundial de Radiación en Davos, es asegurar la transferencia mundial de la *World Radiometric Reference*. Durante ese evento todos los participantes llevan a Davos sus instrumentos, sistemas de seguimiento solar y de adquisición de datos para llevar a cabo mediciones de radiación solar simultáneas con el *World Standard Group* (Grupo mundial de normalización).

Las aplicaciones más comunes de las mediciones con pirheliómetros son las observaciones meteorológicas científicas y del clima, y la evaluación de la eficiencia de los captadores solares y dispositivos fotovoltaicos.

### **3.2. Instrumentos de medida de la irradiancia global y difusa: piranómetros.**

La irradiancia solar global se mide por medio de radiómetros con un campo de visión hemisférico, llamados piranómetros (Iqbal, 1983). Los elementos de detección de la mayoría de los piranómetros se basan en principios termoeléctricos o fotovoltaicos. A continuación se explican las características de cada uno de ellos.

#### **a) Piranómetro térmico.**

Un ejemplo de este tipo es el de *Kipp - Zonen*, que se constituye por una pila termoeléctrica contenida en un alojamiento con dos hemiesferas de cristal. La pila termoeléctrica está constituida por una serie de termopares colocados horizontalmente, cuyos extremos están soldados con unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El conjunto está pintado con un barniz negro, para absorber la radiación. El flujo de calor originado por la radiación se transmite a la termopila, generándose una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre los metales de los termopares.

Para medir solamente la componente difusa de la radiación solar es necesario tapar el sensor de radiación global mediante una pantalla o un sombreado.

El espectro de la radiación solar se extiende entre 300 y 2800 nm. Esto indica que un piranómetro debe cubrir ese espectro con una sensibilidad lo más «plana» posible. Para medir la radiación solar, se requiere que la respuesta al flujo de radiación varíe con el coseno del ángulo de incidencia. Por ejemplo, máxima respuesta cuando el flujo incide perpendicularmente sobre el sensor, respuesta nula cuando el Sol está en el horizonte o valores intermedios de respuesta, cuando el ángulo de incidencia está entre los anteriores.

La termopila, formada por sectores blancos y negros, es capaz de absorber la radiación solar en un rango entre los 300 y los 5000 nm, y tiene una respuesta casi perfecta al coseno del ángulo de incidencia. La cúpula de cristal limita la respuesta al rango de 300 a 2800 nm, preservando un campo de visión de 180 grados. Otra función de la cúpula es la de proteger la termopila de la convección. Las bandas negras del sensor (termopila) absorben la radiación solar, que se transforma en calor. Este calor fluye atravesando los sensores hacia el cuerpo del piranómetro, proporcionando una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente.

#### **b) Piranómetro fotovoltaico.**

En este tipo de piranómetros, el principio de funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico, descrito por Albert Einstein en 1905. El desarrollo de los dispositivos fotovoltaicos, también llamados células solares, está basado en el efecto fotoeléctrico (Vignola, et al. 2012). Los piranómetros fotovoltaicos constan de células solares (típicamente, fotodiodos de silicio),

las cuales producen un voltaje que es proporcional a la radiación incidente. Estos valores de voltaje son convertidos, mediante el factor de calibración de cada piranómetro, a unidades de irradiancia (en  $W m^{-2}$ ).

Dada su naturaleza, en este tipo de piranómetros es posible adosar filtros de ciertas bandas del espectro solar, por medio de algún domo de vidrio impregnado con el filtro deseado. Por otro lado, son más sensibles a pequeñas irregularidades y cambios debido a que no tienen la inercia térmica que sí tienen los piranómetros térmicos.

-Estandarización de los piranómetros.

Los piranómetros están estandarizados de acuerdo a la norma ISO 9060, que también es adoptada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Esta norma discrimina tres clases (Vignola, *et al.* 2012): la mejor es (confusamente) llamada "Standard secundario", la segunda mejor es la "primera clase" y la última "segunda clase". La calibración se realiza de acuerdo a la Referencia Radiométrica Mundial (WRR). Esta referencia ha sido adoptada y es controlada por el Centro Radiométrico Mundial en Davos, Suiza.

### **3.3. Estaciones de medida.**

En este apartado se da una descripción de las estaciones de medida consultadas, tanto de sus características generales como de sus instrumentos.

#### **3.3.1. La red SIAR.**

El Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) es una infraestructura creada en 1999 y perteneciente al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente que captura, registra y divulga los datos agroclimáticos necesarios para el cálculo de la demanda hídrica de las zonas de riego. Permite obtener información útil y rigurosa y contribuye a una mejor planificación, gestión, manejo y control de las explotaciones de regadío.

La red SIAR consta de 468 Estaciones Agroclimáticas, distribuidas por toda España, que capturan los datos climáticos y transmiten la información al Centro Zonal. Existe un Centro Zonal en cada Comunidad Autónoma vinculada a la red SIAR (doce en total), que está dotado del hardware y software necesario para la adquisición, almacenamiento y explotación de los datos obtenidos.

Las Comunidades Autónomas que están vinculadas a la red SIAR son: Andalucía, Aragón, Baleares, Canarias, Castilla-la Mancha, Castilla y León, Comunidad Valenciana, Extremadura, Galicia, Madrid, Murcia y Navarra.

En el caso de la estación agroclimática de la red SIAR, su configuración y ubicación se han elegido teniendo en cuenta las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Instituto Nacional de Meteorología (INM), la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), y la "American Society of Agricultural Engineers" (ASAE). Las estaciones agroclimáticas están diseñadas para recoger los valores necesarios para el cálculo de la Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ); para ello se las ha dotado de los instrumentos

adecuados para medir los siguientes parámetros: temperatura y humedad del aire, velocidad y dirección del viento, radiación (global) y precipitación. Una imagen de una estación de la red SIAR puede verse a continuación, obtenida de la siguiente dirección web:

<http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/sistema-informacion-agroclimatica-regadio/Red-Estaciones-Agroclimaticas.aspx>

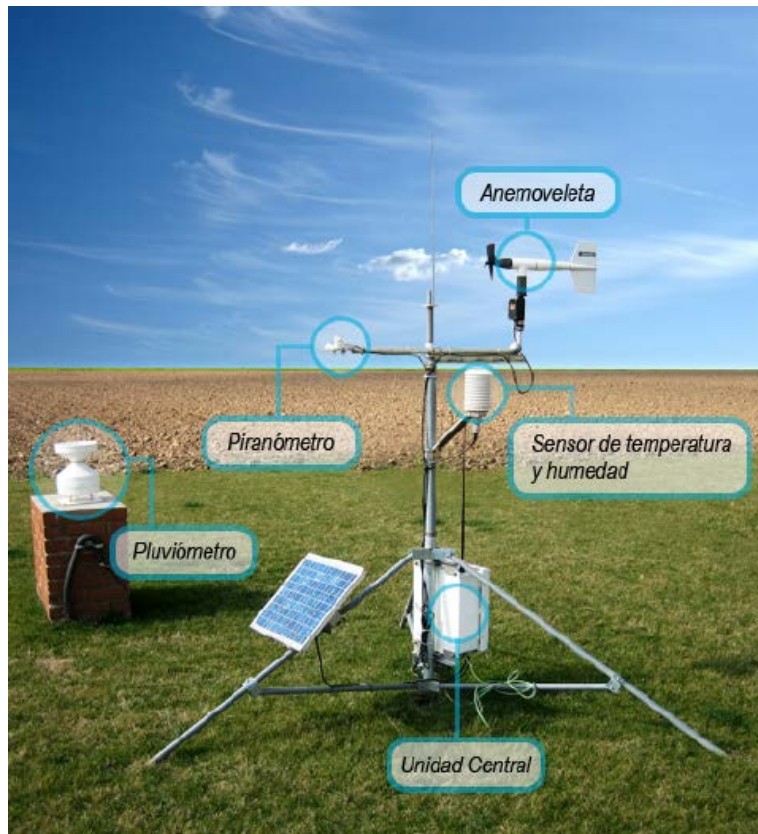


Figura 3.2. Imagen de una estación de la red SIAR.

En este trabajo solo se han consultado los datos proporcionados por el sensor que mide la radiación global (piranómetro). En concreto, el piranómetro que se tiene en las estaciones de la red SIAR es el “Skye SP1110”. También interesa conocer las características del datalogger, cuya misión es registrar los datos y controlar el funcionamiento de la estación. El datalogger de las estaciones de la red SIAR es el “Campbell Scientific CR10X”. Las características de ambos se muestran a continuación:

a) Piranómetro Skye SP1110

Mide la radiación solar global, en  $W m^{-2}$ . Es una fotocélula de silicio sensible a la radiación entre 350 y 1100 nm. Va montada sobre una base de nivelación y está orientada al sur. Sus características técnicas más importantes son las siguientes:

- **Principio de funcionamiento:** Fotocélula de silicio de baja fatiga.
- **Longitud de onda medida:** de 350 a 1100 nm (ver figura 3.3)
- **Rango de medida:** de 0 a  $1370 W m^{-2}$

- **Precisión absoluta:**  $\pm 5\%$
- **Rango de la señal:** 1mV por  $100 \text{ W m}^{-2}$
- **Rango sensibilidad:** 350-1100 nm
- **Corrección del coseno:** 0 para  $0-70^\circ$  y  $< 10\%$  para  $85-90^\circ$  (ver figura 3.4)
- **Temperatura de trabajo:** de  $-35$  a  $75^\circ\text{C}$

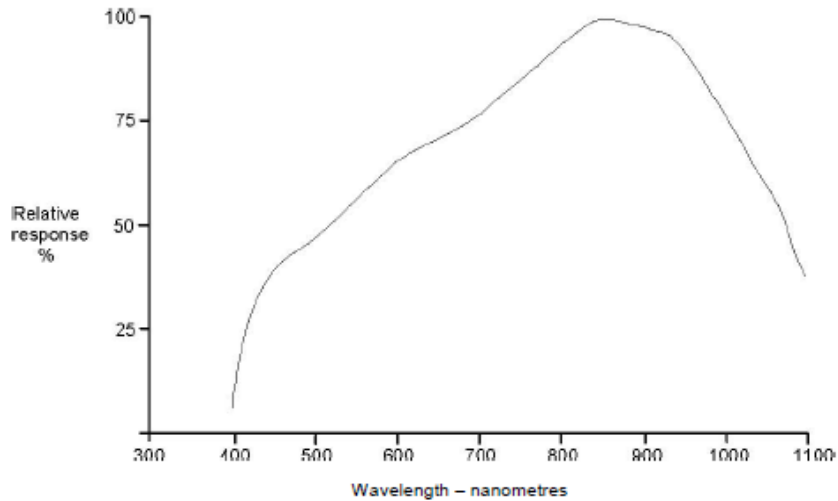


Figura 3.3. Respuesta espectral del piranómetro SP1110

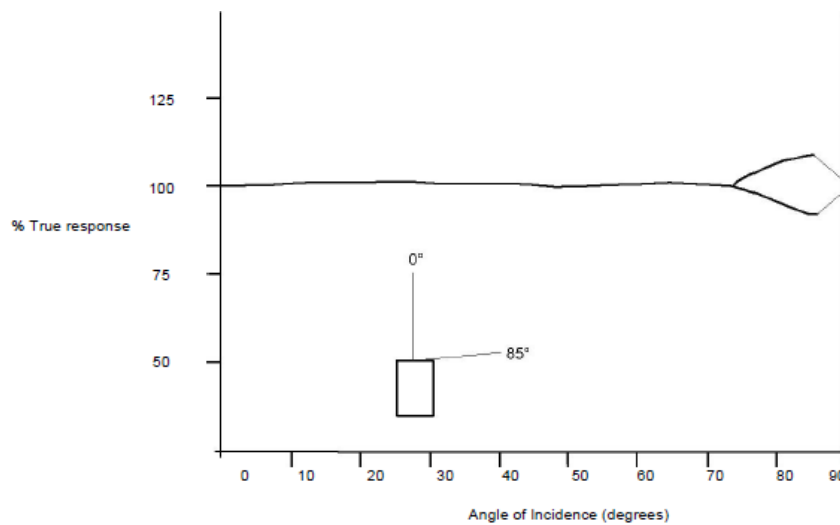


Figura 3.4. Corrección del coseno para el SP1110.

Los sensores instalados en las estaciones de la red SIAR se calibran anualmente en un laboratorio de calibración. Y se realiza, cada semestre, una revisión general de las estaciones. A continuación se puede observar una fotografía del piranómetro Skye SP1110:





Figura 3.5. Imagen del piranómetro Skye SP1110

b) Datalogger Campbell Scientific CR10X

El Datalogger sirve para registrar los datos y controlar el funcionamiento de la estación. Sus características técnicas son las siguientes:

- **Alimentación:** 9,6 V a 16 V
- **Consumo:** 1,3 mA en reposo, 13 mA en el proceso y 46 mA durante las medidas analógicas.
- **Temperatura de funcionamiento:** de -25 a 50°C
- Consta de una batería interna de litio para mantener los datos, el reloj y el programa en caso de que falle la alimentación.

Otras características del dispositivo son:

- **Procesador:** convertidor analógico-digital de 13 bits y 750 Hz de tiempo mínimo de ejecución de programas. El procesador es un Hitachi 3606.
- **Puertos de medida**
  - *Entradas analógicas:* 6 entradas diferenciales o 12 entradas single-ended. El rango de voltajes medidos es de 0 a  $\pm 2,5$  V
  - *Resolución y precisión:* puede verse en la siguiente tabla.

Rango (mV)	Resolución para medida en diferencial (mV)	Precisión Dif (mV)	Resolución para medidas en Single-Ended (mV)	Precisión SE (mV)
$\pm 2500$	0,333	5	0,667	5
$\pm 250$	0,033	0,5	0,067	0,5
$\pm 25$	0,003	0,05	0,007	0,05
$\pm 7,5$	0,001	0,015	0,002	0,015
$\pm 2,5$	0,0003	0,005	0,001	0,005

Tabla 3.1. Valores de la resolución y precisión del Datalogger Campbell Scientific CR10X

- *Entradas digitales:* ocho canales digitales configurables como entrada o salida de voltaje, medidas de frecuencia, contador de pulsos y control digital.
- *Entradas de pulsos:* dos entradas de pulsos que pueden contar pulsos de alto nivel (5V), de contacto, o de señales de bajo nivel.

- *Canales de alimentación de sensores o elementos auxiliares:* dos canales de 12 V, un canal de 12 V controlado por programa y dos canales de 5V
- *Canales de excitación:* 3 canales de excitación que dan voltajes programados de  $\pm 2,5$  V para puentes de medida.
- *Puertos de comunicaciones:* CS I/O, aislado eléctricamente.
- *Memoria:* 128 Kb SRAM, para uso del sistema operativo y guardado de datos.

Una fotografía del Datalogger Campbell Scientific CR10X puede verse a continuación:

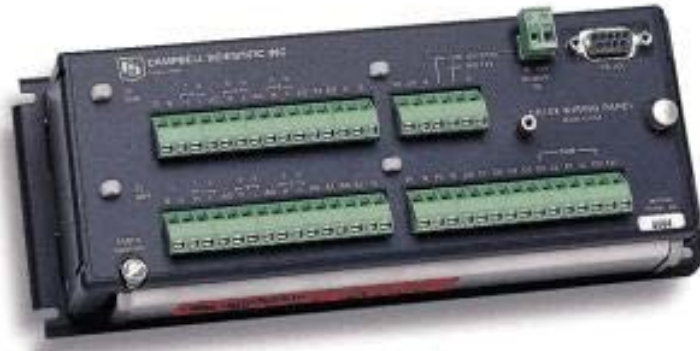


Figura 3.6. Imagen del Datalogger Campbell Scientific CR10X

### 3.3.2. La red AEMET.

#### a) Descripción general de la red AEMET.

La medida sistemática de la irradiancia en superficie en España comenzó en los años 60, aunque no fue hasta principios de los 70 cuando, siguiendo las directrices de la Organización Meteorológica Mundial, se creó el Centro Radiométrico Nacional. Hasta la década de los 90 no se puede hablar de una Red Radiométrica Nacional (RRN) propiamente dicha, si bien con muy pocas estaciones obteniendo únicamente datos de radiación global. Fue en los años 2005 y 2006 cuando se llevó a cabo el que podría considerarse el mayor proceso de actualización y modernización de la Red mediante la instalación de seguidores solares automáticos y nuevos sensores y adquirentes de datos, ampliándola a 25 estaciones radiométricas completas de medida de radiación en banda ancha. Desde entonces la evolución de los sensores y equipos ha sido constante tanto en su resolución espacial como temporal y espectral. ([http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas\\_radiacion\\_solar/atlas\\_de\\_radiacion\\_24042012.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf)).

La calibración de los piranómetros y pirheliómetros de la RRN se lleva a cabo por comparación al sol frente a patrones secundarios calibrados en el PMOD/WRC (Physikalisch – Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center) que trasladan la referencia radiométrica WRR (World Radiometric Reference) del grupo de mundial de normalización WSG (World Standard Group). El proceso de calibración conduce a la modificación, en su caso, de la constante del equipo o factor de calibración, es decir el factor de conversión de la señal en milivoltios a valores de irradiancia en  $W m^{-2}$ .

Según la OMM, los Centros Radiométricos Nacionales son los encargados de servir como centro de calibración, mantenimiento y revisión de los instrumentos de radiación, para cada una de las estaciones integrantes de la Red Radiométrica Nacional. Se deben cumplir, para ello, las siguientes condiciones:

- Debe poseer y mantener, al menos, un radiómetro absoluto, para su uso como patrón de referencia para la calibración de los instrumentos de la red radiométrica.
- Este radiómetro debe ser comparado con un patrón de referencia regional al menos cada cinco años.
- Debe tener las instalaciones y equipos necesarios para la revisión y calibración del instrumental de la red radiométrica.
- También es el responsable de tener al día y preparar toda la documentación necesaria para la operación y mantenimiento de la Red Radiométrica.
- Todo ello tiene como fin la recepción y el almacenamiento de todos los datos obtenidos en las estaciones de la red, asegurando su exactitud y fiabilidad.

En España, el Centro Radiométrico Nacional (CRN), se halla adscrito a la Agencia Estatal de Meteorología, dependiente del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. El CRN también es el responsable de la compra, instalación, calibración y mantenimiento de todos los equipos de la Red Radiométrica Nacional.

#### - **La Red Radiométrica Nacional.**

La Red Radiométrica de la Agencia Estatal de Meteorología tiene como finalidad la medida de la radiación solar en sus diferentes componentes (Global, difusa, directa y reflejada) y principales longitudes de onda (visible, infrarroja y ultravioleta). Está compuesta de 58 estaciones:

- 24 estaciones donde se mide radiación global, directa y difusa.
- 13 estaciones donde se mide radiación global y difusa.
- 22 estaciones donde se mide radiación infrarroja.
- 2 estaciones donde se mide además infrarroja reflejada.
- 26 estaciones donde se mide radiación ultravioleta B.
- 22 estaciones donde se mide solamente radiación global, de las cuales 21 son sensores integrados en estaciones automáticas en Aeropuertos.

La Red Radiométrica Nacional está equipada con piranómetros termoeléctricos (Radiación Global y Difusa), pirheliómetros (Radiación Directa), pirgeómetros (Radiación infrarroja), y piranómetros de banda ancha para medida de radiación ultravioleta, calibrados bianualmente por el Centro Radiométrico Nacional de la Agencia Estatal de Meteorología. Los equipos de global, directa, difusa e infrarroja, están montados sobre un seguidor solar automático y conectados a un sistema de adquisición de datos, que almacena datos minutales y con el que vía red, se conecta en tiempo real, revisándose y descargándose diariamente los datos. Una imagen de una estación tipo se puede ver a continuación, obtenida de la siguiente dirección web:

<http://www.aemet.es/documentos/es/el tiempo/observacion/radiacion/Radiacion Solar.pdf>

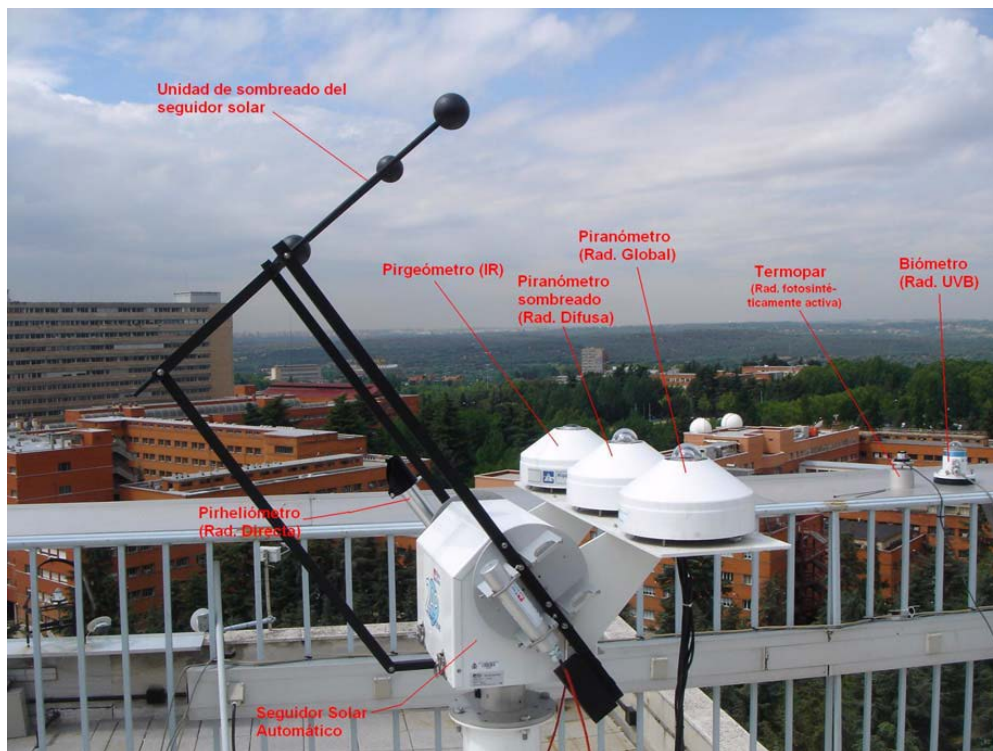


Figura 3.7. Instrumentación de una estación radiométrica tipo (CRN-Madrid)

b) Componentes principales de los piranómetros.

Las estaciones radiométricas de la red AEMET están equipadas, para las medidas de irradiancia global y difusa, con piranómetros Kipp-Zonen modelos CMP-11 y CMP-21. El detector del piranómetro CMP de Kipp-Zonen se basa en un elemento de detección térmica pasiva llamado termopila. Aunque la construcción del detector es diferente para los distintos modelos, el principio de funcionamiento fundamental se aplica a todos los radiómetros de las series CMP. Se pueden observar los componentes de estos piranómetros en la figura 3.8, obtenida de la web [http://www.lufft.com/dateianzeige.php?Dateiname=download\\_manual\\_CMP\\_serie\\_s.pdf](http://www.lufft.com/dateianzeige.php?Dateiname=download_manual_CMP_serie_s.pdf)

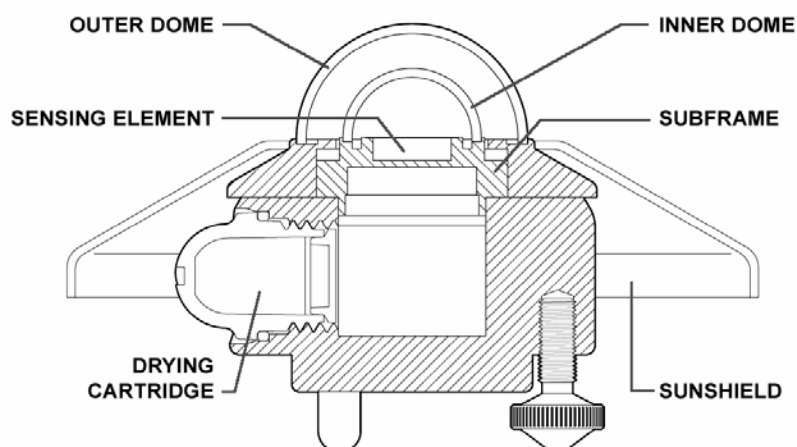


Figura 3.8. Detalle de la construcción de un piranómetro.

A continuación se explican las características de dichos componentes:

**-Cúpula:** El material de la cúpula del radiómetro define el rango de medición espectral del instrumento. En general, entre el 97 – 98 % del espectro de radiación solar se transmitirá a través de la cúpula y lo absorberá el detector. La irradiancia solar puede venir de cualquier dirección dentro del hemisferio de arriba del radiómetro y, por lo tanto, las cúpulas están diseñadas para minimizar los errores en la medición en todos los ángulos de incidencia. Los radiómetros de las series CMP tienen dos cúpulas hemisféricas de alto grado óptico, una cúpula interna y una cúpula externa.

**-Detector:** El elemento de detección de la termopila está construido con un gran número de pares de unión de termopar conectados eléctricamente en serie. La absorción de la radiación térmica por una de las uniones del termopar, llamada la unión activa (o «caliente»), aumenta su temperatura. La temperatura diferencial entre la unión activa y la unión de referencia («fría») mantenida en una temperatura fija, produce una fuerza electromotriz directamente proporcional a la temperatura diferencial creada. Este es un efecto termoeléctrico. La sensibilidad del piranómetro depende de las propiedades físicas individuales de la termopila y la construcción. La sensibilidad de cada termopila es única y, por lo tanto, cada radiómetro tiene un factor de calibración único, incluso con el mismo modelo de radiómetro.

En la superficie superior del sensor se deposita *pintura negra*, que tiene una estructura muy rugosa y que contiene muchas microcavidades que «atrapan» de forma eficaz más del 97 % de la radiación incidente en un amplio rango espectral. Además, la selectividad espectral es menor del 2 %. Esto implica que dentro del rango espectral del piranómetro, la absorción para cada longitud de onda es igual dentro del 2 %. El elemento de detección pintado de negro forma el detector. Considerando la estabilidad a largo plazo del instrumento, la pintura negra es una de las partes más importantes y delicadas del piranómetro.

**-Carcasa:** La carcasa del radiómetro contiene todas las piezas fundamentales del piranómetro. Las piezas de aluminio anodizado son ligeras y dan una estabilidad mecánica y térmica alta al instrumento. Debido a su construcción mecánica todos los piranómetros están virtualmente sellados y cumplen con la norma internacional IP 67. Cada modelo de piranómetro se puede nivelar usando el nivel de burbuja y dos patas de nivelado. Para facilitar el mantenimiento, el nivel de burbuja está situado cerca de la cúpula del instrumento y debido a la forma especial de la malla solar es visible desde arriba. La malla solar actúa para proteger todas las piezas externas de la radiación y para reducir el calentamiento de la carcasa por el sol.

**-Cartucho desecante:** En caso de que entre humedad en el cuerpo del radiómetro el desecante de gel de sílice regula el nivel de humedad dentro del piranómetro. Inicialmente el desecante tendrá color naranja. Cuando pase algo de tiempo se satura por la humedad y el color cambiará a claro (transparente). En este momento el contenido del cartucho de secado se tiene que

cambiar por otro nuevo, con desecante de color naranja insaturado tan pronto como sea posible.

A continuación se puede observar una imagen del piranómetro CMP-11, obtenida de la siguiente dirección web: <http://www.kippzonen.es/Product/210/CMP-11-Piranometro>



Figura 3.9. Piranómetro Kipp-zonen modelo CMP-11

c) Propiedades físicas de los piranómetros.

En esta sección se explican las propiedades físicas de los piranómetros Kipp-Zonen modelos CMP-11 y CMP-21. En la siguiente tabla se muestran las principales características de ambos, que luego se verán con más detalle:

Tabla 3.2. Características de los piranómetros CMP-11 y CMP-21 de Kipp-Zonen.

<b>Especificación</b>	<b>Unidad</b>	<b>CMP-11</b>	<b>CMP-21</b>
Rango espectral	$\mu\text{m}$	285 - 2800	285 - 2800
Sensibilidad	$\mu\text{V}/ \text{W m}^{-2}$	7 a 14	7 a 14
Impedancia	$\Omega$	10 a 100	10 a 100
Tiempo de respuesta	s	< 5	< 5
No linealidad	%	< 0,2	< 0,2
Error de inclinación	%	< 0,2	< 0,2
Offset cero A	$\text{W m}^{-2}$	< 7	< 7
Offset cero B	$\text{W m}^{-2}$	< 2	< 2
Error direccional (hasta 80° a 1000 $\text{W m}^{-2}$ )	$\text{W m}^{-2}$	< 10	< 10
Sensibilidad de dependencia a la temperatura	%	< 1 (de -10 a + 40°C)	< 1 (de -20 a + 5°C)
Rango de temperatura de operación	°C	-40 a +80	-40 a + 80
Irradiancia solar máxima	$\text{W m}^{-2}$	4000	4000
Campo de visión		180°	180°
No-estabilidad	%	< 0,5	< 0,5
Humedad	% RH	0 - 100	0 - 100
Incertidumbre	%	< 2	< 2

**-Rango espectral:** El espectro de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra está dentro del rango de longitudes de onda que va de 280 a 4000 nm, es decir, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, como se muestra en la figura 3.10. Debido a las propiedades físicas excelentes de la cúpula de cristal y la pintura que absorbe el negro, los radiómetros de las series CMP de Kipp - Zonen son igualmente sensibles a un amplio rango espectral. El 97- 98 % de la energía total la absorberá el detector térmico.

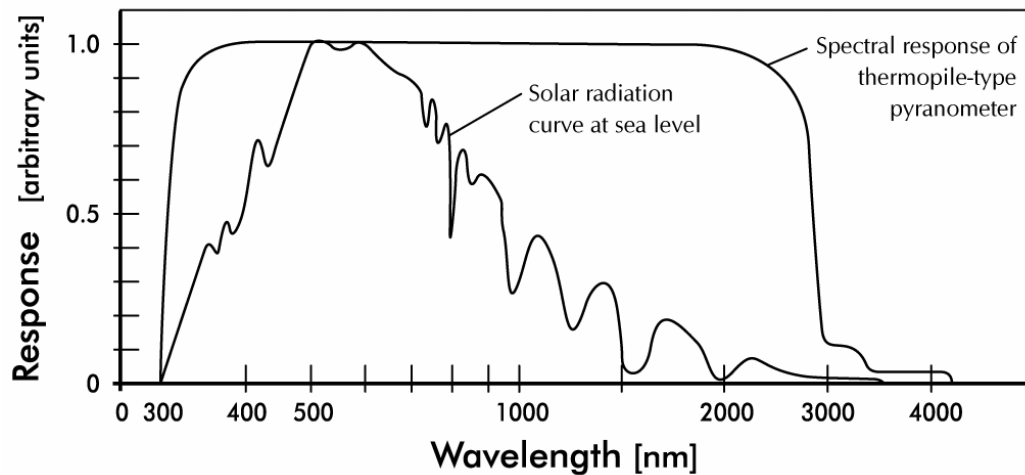


Figura 3.10. Espectro de irradiancia solar en la superficie de la Tierra y respuesta del piranómetro.

**-Sensibilidad:** La sensibilidad de la termopila del radiómetro está determinada principalmente por las propiedades físicas del detector en sí mismo. La alimentación termoeléctrica, la conductividad térmica de las uniones y las dimensiones generales del elemento de detección están relacionadas con su sensibilidad.

**-Impedancia:** La impedancia del radiómetro se define como la impedancia eléctrica total en el conector de salida del radiómetro que se ajusta a la carcasa. Surge desde la resistencia eléctrica en las uniones térmicas, cables y elementos electrónicos pasivos dentro del radiómetro.

**-Tiempo de respuesta:** Algunos dispositivos de medida requieren un cierto tiempo para reaccionar a un cambio en el parámetro que se está midiendo. El radiómetro requiere tiempo para responder a un cambio en la radiación incidente. El tiempo de respuesta se considera normalmente como el tiempo para que la salida alcance el 95 % (algunas veces el 63 %) del valor final después de un cambio de paso en la irradiancia. Lo determinan las propiedades físicas de la termopila y la construcción del radiómetro. Los radiómetros de las series CMP tienen una respuesta rápida, que los hace adecuados para medir radiación solar bajo condiciones meteorológicas variables.

**-No linealidad:** La no linealidad de un radiómetro es el porcentaje de desviación en la sensibilidad a lo largo del rango de irradiancia de 0 a  $1000 \text{ W m}^{-2}$  comparado con la sensibilidad de la irradiancia de calibración de  $500 \text{ W m}^{-2}$ . El efecto de no linealidad se debe a las pérdidas de calor por convección y radiación en la superficie absorbente negra.



**-Error de inclinación:** Es la desviación de la sensibilidad en una inclinación de  $0^\circ$  (exactamente horizontal) en el rango de inclinación de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  bajo una irradiancia de incidencia normal de  $1000 \text{ W m}^{-2}$ . La respuesta de inclinación es proporcional a la radiación incidente. El error se puede corregir, en aplicaciones en que sea necesario instalar el piranómetro en una superficie inclinada, pero normalmente es insignificante.

**-Offset cero A y offset cero B:** Por leyes físicas, cualquier objeto que tiene una cierta temperatura intercambiará radiación con su entorno. Las cúpulas de los radiómetros orientadas hacia arriba intercambian radiación principalmente con la atmósfera relativamente fría. En general, la atmósfera estará más fría que la temperatura ambiente en la superficie de la Tierra. Por ejemplo, un día despejado puede haber una temperatura efectiva de hasta  $50^\circ\text{C}$  más fría, mientras que un cielo cubierto tendrá aproximadamente la misma temperatura que la superficie de la Tierra. Debido a esto las cúpulas del piranómetro «perderán» energía hacia la atmósfera más fría por medio de la transferencia por radiación. Esto hace que la cúpula se enfríe más que el resto del instrumento. Esta diferencia de temperatura entre el detector y la carcasa del instrumento generará una señal de salida negativa pequeña que se llama normalmente Offset cero de tipo A. Este efecto se minimiza utilizando una cúpula interna, la cual actúa como un «amortiguador de radiación». Este efecto se puede minimizar aplicando la ventilación adecuada del instrumento.

Proporcionalmente a la temperatura ambiente, la temperatura del instrumento varía y causa corrientes de calor dentro del mismo. Esto causará un offset llamado normalmente Offset cero tipo B. Se cuantifica como la respuesta en  $\text{W m}^{-2}$  a un cambio de  $5 \text{ K/hora}$  en la temperatura ambiente.

**-Respuesta direccional:** La radiación que incide sobre una superficie horizontal plana, originada desde una fuente puntual con una posición cenit definida, tendrá un valor de intensidad proporcional al coseno del ángulo cenital. Esto se llama la «ley del coseno» o «respuesta del coseno». Lo ideal es que un piranómetro tenga una respuesta direccional que sea exactamente la misma que la ley del coseno. No obstante, en un piranómetro la respuesta direccional está influenciada por la calidad, dimensiones y construcción de las cúpulas. La desviación máxima de la respuesta del coseno ideal se da hasta un ángulo de incidencia de  $80^\circ$  con respecto a una irradiancia de  $1000 \text{ W m}^{-2}$  en incidencia normal ( $0^\circ$ ).

**-Irradiancia solar máxima:** se define como el nivel de irradiancia total más allá del cual se puede producir un daño físico en el instrumento.

**-Campo de visión:** se define como el ángulo de visión abierto sin obstrucción del radiómetro. La ISO y la OMM exigen que un piranómetro, para la medición de radiación solar global, tenga un campo de visión de  $180^\circ$  en todas las direcciones (es decir, un hemisferio). El campo de visión inherente del instrumento no se debe confundir con el campo de visión despejado de la posición de la instalación.



**-No estabilidad:** Es el cambio porcentual en la sensibilidad a lo largo de un periodo de un año. Este efecto se debe principalmente a la degradación que produce la radiación UV en la pintura absorbente negra de la superficie del elemento de detección.

**-Incertidumbre:** La incertidumbre de la medición se puede describir como la incertidumbre máxima esperada por hora o día con respecto a la «verdad absoluta». El nivel de confianza es del 95 %, lo que significa que el 95 % de los puntos de datos están dentro del intervalo de incertidumbre, dado que representa el valor absoluto. Kipp - Zonen determina empíricamente las cifras de incertidumbre basadas en muchos años de mediciones de campo.

#### d) Calibración de los piranómetros.

Un piranómetro ideal da un resultado de voltaje que es proporcional al nivel de irradiancia absoluto. Esta relación se puede expresar como un ratio constante llamado «sensibilidad».

La cifra de la sensibilidad de un piranómetro particular es única. Se determina en el laboratorio del fabricante por comparación con un radiómetro de referencia de un tipo similar. El radiómetro de referencia se calibra en exteriores con regularidad en el Centro Mundial de Radiación (CMR) en Davos, Suiza. El contenido espectral de la lámpara de calibración del laboratorio es distinto del espectro solar en el exterior en el Centro Mundial de Radiación. No obstante, esto no tiene consecuencias para la transferencia de calibración, porque los piranómetros estándar y de prueba tienen el mismo revestimiento negro y las mismas cúpulas.

El procedimiento de calibración en interiores, según el Apéndice III de la ISO 9847, se basa en la comparación colocándole junto con un piranómetro de referencia bajo un sol artificial estable. Kipp - Zonen utiliza una lámpara de descarga de gas de haluro de metal a alta presión de 150 W con estabilización de voltaje. Más allá de la lámpara hay un reflector con un diámetro de 16,2 cm. El reflector está 110 cm por encima de los piranómetros produciendo un rayo vertical. La irradiancia de los piranómetros es aproximadamente de  $500 \text{ W m}^{-2}$ . Para minimizar la desviación de la luz de las paredes y del operario, se limita la luz a un pequeño cono alrededor de los dos piranómetros. El piranómetro desconocido «a» y el piranómetro de referencia «b» se colocan uno junto al otro en una mesa pequeña. La mesa puede girar para intercambiar las posiciones (1 y 2) de ambos. La lámpara se centra en el eje de rotación de la mesa. Realmente no hay una incidencia normal de la radiación, sino que el ángulo de incidencia es el mismo para ambos piranómetros ( $3^\circ$ ), para que no pueda dar lugar a errores. Los dos piranómetros no se nivelan con los tornillos, sino que se colocan sobre sus bases. El efecto de la pequeña inclinación del rayo es insignificante (comparar  $\cos 3^\circ = 0,9986$  y  $\cos 4^\circ = 0,9976$ ).

Después de iluminar durante 30 segundos, los voltajes de salida de ambos piranómetros se integran durante 30 segundos. Luego, se cubren ambos. Después de 30 segundos se integran las señales de offset cero de ambos piranómetros, otra vez durante un periodo de 30 segundos. La irradiancia en la posición 1 (piranómetro «a») puede ser ligeramente distinta de la de la posición 2 (piranómetro «b») debido a la asimetría en las ópticas de la lámpara, etc. Por lo tanto, se intercambian los piranómetros girando la mesa y se repite todo el procedimiento.

La sensibilidad del piranómetro desconocido se calcula con la siguiente expresión:

$$S_a = \frac{A+A'}{B+B'} S_b$$

siendo:

$S_b$  = Sensibilidad del radiómetro de referencia a + 20 °C

A = Resultado del radiómetro de prueba en la posición 1

A' = Resultado del radiómetro de prueba en la posición 2

B = Resultado del radiómetro de referencia en la posición 2

B' = Resultado del radiómetro de referencia en la posición 1

$S_a$  = Sensibilidad del radiómetro de prueba a + 20 °C

Resultado = valor medio en respuesta del 100 % menos la señal de offset cero.

### 3.3.3. El centro de Investigación de la Baja Atmósfera (C.I.B.A.)

La creación, mantenimiento y explotación del Centro de Investigación de la Baja Atmósfera (C.I.B.A.) nació mediante un convenio de colaboración entre el Instituto Nacional de Meteorología (INM) y la Universidad de Valladolid en el año 1978. El centro se creó con el fin de conseguir un mayor nivel de conocimiento sobre los fenómenos de las capas atmosféricas. El CIBA (41°48'50"N; 4°55'48"O; 840 m sobre el nivel del mar), está situado en una zona no urbana, entre los municipios vallisoletanos de La Mudarra y Villalba de los Alcores (perteneciendo a este último), a 25 km en línea recta al noroeste de la ciudad de Valladolid. El centro se encuentra al aire libre ocupando una superficie de 4.2 ha en plena región de los Montes Torozos, que es un terreno completamente llano (se trata de un páramo elevado sobre los valles circundantes), de gran utilidad para la obtención de medidas meteorológicas. El clima de la zona es continental con inviernos muy fríos y veranos muy cálidos y secos.

Entre otras instalaciones, el CIBA posee una casa solar donde se computerizan los datos, una estación solar y una torre de 100 m con sensores de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento a cinco niveles diferentes de altura. La estación solar está compuesta por diferentes instrumentos y se pueden distinguir tres zonas: la plataforma horizontal estática, donde se llevan a cabo la mayor parte de medidas radiométricas; la torre de viento, donde se toman medidas de temperatura y de velocidad y dirección del viento; y el seguidor solar, que toma medidas de irradiancia SW (Short Wave) directa, global y difusa.

En el presente trabajo se han utilizado los valores proporcionados por uno de los piranómetros CMP21 (de Kipp-Zonen) instalados en el seguidor solar. Dicho piranómetro, cuyas características se han mostrado en la sección 3.3.2, mide irradiancia global sobre superficie horizontal. Los datos recogidos por el piranómetro se almacenan por medio de un datalogger, modelo "Campbell Scientific CR23X", el cual está programado para registrar la señal del piranómetro cada 10 segundos. Posteriormente, estos valores son promediados y almacenados en memoria cada 10 minutos. En la siguiente figura se puede observar una imagen del datalogger CR23X. Y en la Tabla 3.3 se muestran sus principales características.



Figura 3.11. Datalogger CM23X de Campbell Scientific.

Tabla 3.3. Características del datalogger CR23X de la casa Campbell Scientific.

Canales de entrada analógica	24 simples o 12 diferenciales
Rango de temperatura	-25 a 50°C
Resolución de las señales analógicas de salida	333 $\mu$ V
Voltaje	11 a 16 V de DC
Dimensiones	241mm x 178mm x 96mm

#### 4. Datos experimentales.

En este capítulo se enumeran las estaciones de medida consultadas, tanto para la red SIAR como para la red AEMET. Además, se indican las fechas del inicio y final de la toma de datos, los cuales son valores de la irradiación global diaria media mensual sobre superficie horizontal, en MJ m<sup>-2</sup>.

Las estaciones de la red SIAR que se han consultado (48 en total) se pueden ver en la Tabla 4.1 (para Castilla y León) y en la Tabla 4.2 (para el resto de Comunidades Autónomas). Dichas estaciones se han seleccionado teniendo en cuenta su localización geográfica (para cubrir la mayor parte de la península) y también el número de años con datos disponibles (en casi todas las estaciones el periodo es desde el uno de enero de 2005 hasta el uno de enero de 2015, es decir, diez años). Esto se ha hecho así para tener en cuenta las posibles variaciones climatológicas en una determinada estación de medida.

Tabla 4.1. Estaciones de la red SIAR consultadas en Castilla y León, y fechas de inicio y final de la toma de datos.

Estación	Fecha inicio	Fecha final
Barcial del Barco	01/01/2005	01/01/2015
Carracedelo	01/01/2005	01/01/2015
Ciudad Rodrigo	01/01/2005	01/01/2015
Condado de Treviño	01/07/2008	01/01/2015
Encinas de Esgueva	01/01/2005	01/01/2015
Gomezserracín	01/01/2005	01/01/2015
Herrera de Pisuerga	01/01/2005	01/01/2015
Hinojosa del Campo	01/01/2005	01/01/2015
Lerma	01/01/2005	01/01/2015
Nava de Arévalo	01/01/2005	01/01/2015
Olmedo	01/01/2005	01/01/2015
Sahagún	01/01/2005	01/01/2015
Santa Gadea del Cid	01/06/2007	01/01/2015
Santas Martas	01/01/2005	01/01/2015
Tordesillas	01/01/2005	01/01/2015
Torquemada	01/01/2005	01/01/2015
Zamadueñas	01/04/2006	01/01/2015

Tabla 4.2. Estaciones de la red SIAR consultadas en diferentes Comunidades Autónomas, y fechas de inicio y final de la toma de datos.

Comunidad Autónoma	Estación	Fecha inicio	Fecha final
Andalucía	Almería	01/01/2005	01/01/2015
	Baza	01/01/2005	01/01/2015
	Córdoba	01/01/2005	01/01/2015
	Jaén	01/01/2005	01/01/2015
	Jerez de la Frontera	01/01/2005	01/01/2015
	Málaga	01/01/2005	01/01/2015
	Moguer	01/01/2005	01/01/2015
	Osuna	01/01/2005	01/01/2015

Aragón	Ejea de los Caballeros	01/01/2005	01/01/2015
	Fraga	01/01/2005	01/01/2015
	Huesca	01/01/2005	01/01/2015
	Teruel	01/06/2005	01/01/2015
Balears	Es Mercadal	01/10/2005	01/01/2015
	Inca	01/01/2005	01/01/2015
	Santa Eulalia	01/01/2005	01/01/2015
Canarias	Arucas	01/01/2005	01/01/2015
	Puerto de la Cruz	01/01/2005	01/01/2015
Castilla-la Mancha	Albacete	01/01/2005	01/01/2015
	Almansa	01/01/2005	01/01/2015
	Cañete	01/01/2005	01/01/2015
	Jadraque	01/01/2005	01/01/2015
Comunidad Valenciana	Altea	01/01/2005	01/01/2015
	Campo Arcís	01/01/2005	01/01/2015
	Castelló-Benadresa	01/01/2005	01/01/2015
	Játiva	01/01/2005	01/01/2015
	Villena	01/01/2005	01/01/2015
Galicia	Castro de Rei	01/11/2005	01/01/2015
	Monforte de Lemos	01/11/2005	01/01/2015
Navarra	Adiós	01/01/2005	01/01/2015
	Bargota	01/01/2005	01/01/2015
	Fitero	01/01/2005	01/01/2015

Los valores de la irradiación global diaria media mensual se han obtenido en la siguiente dirección web: <http://eportal.magrama.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1>, que proporciona diez valores para cada mes (por ejemplo, un valor para febrero de 2005, un valor para febrero de 2006,..., y así hasta el año 2014). A continuación se obtiene, para cada mes, el promedio de los valores mensuales en esos diez años, junto con la desviación estándar. Todo ello se muestra en el capítulo 6, apartado 1 (desde la Tabla 6.1 hasta la 6.13).

En la siguiente figura se pueden observar los valores de la irradiación global diaria media mensual durante el periodo indicado en la Tabla 4.1, para la estación de Tordesillas.

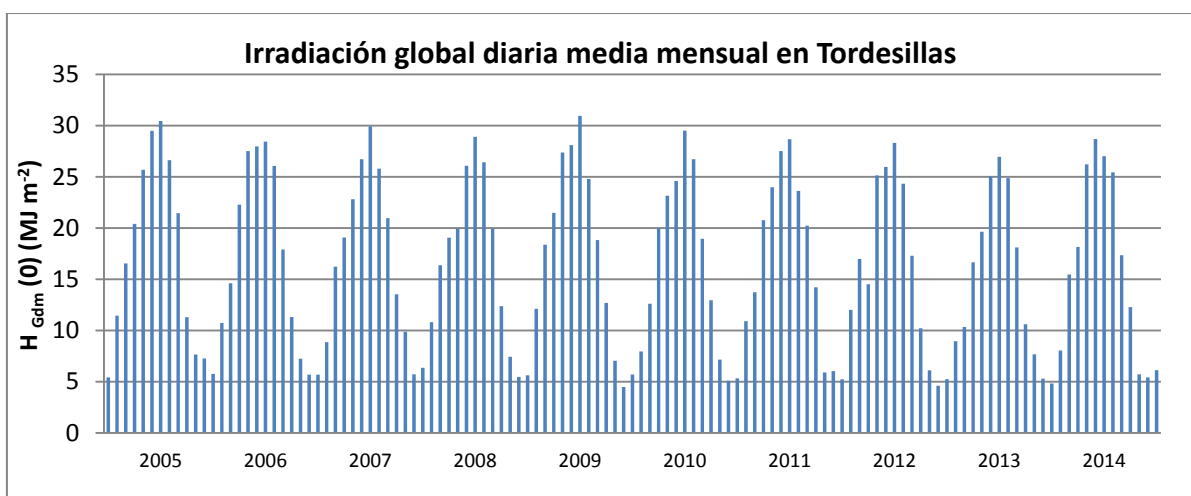


Figura 4.1. Valores de la irradiación global diaria media mensual en Tordesillas (MJ m<sup>-2</sup>), desde enero de 2005 hasta enero de 2015.

Se observa que en el verano del 2009 se alcanza el valor de  $31 \text{ MJ m}^{-2}$ , mientras que en el verano del 2006 se llega hasta  $28 \text{ MJ m}^{-2}$  o en el de 2013 hasta  $27 \text{ MJ m}^{-2}$ . Esto indica que hay variaciones en la irradiación global a lo largo de los años. Por ese motivo se han tomado los datos durante diez años, para poder mostrar un valor promedio de la irradiación global diaria media mensual.

En la Tabla 4.3 se muestran las diecinueve estaciones de la red AEMET que se han consultado, junto con la estación de Villalba de los Alcores. Se indican las fechas de inicio y final de la toma de datos. El procedimiento es igual que en el caso de la red SIAR: se calcula, para cada mes, el promedio de los valores mensuales medidos durante el periodo indicado en la Tabla 4.3, junto con la desviación estándar. Todos estos resultados se muestran en el capítulo 6, apartado 1 (desde la Tabla 6.14 hasta la 6.16).

Tabla 4.3. Estaciones de la red AEMET consultadas y fechas de inicio y final de la toma de datos.

<b>Estación</b>	<b>Fecha inicio</b>	<b>Fecha final</b>
Badajoz	07/03/1985	31/10/2007
Bilbao	01/03/1985	30/09/2007
Cáceres	01/01/1984	29/02/2012
Ciudad Real	11/03/1983	29/02/2012
La Coruña	01/01/1985	29/02/2012
León	05/09/1997	31/10/2007
Logroño	07/06/1995	31/10/2007
Madrid	11/07/1973	29/02/2012
Murcia	01/04/1984	29/02/2012
Oviedo	01/01/1984	31/10/2007
Salamanca	01/04/2001	31/10/2007
San Sebastián	01/04/1983	29/02/2012
Santander	03/04/1997	31/10/2007
Soria	19/02/2000	31/10/2007
Talavera de la Reina	01/01/1984	31/12/1984
Tortosa	01/01/1980	29/02/2012
Valladolid	10/05/1991	31/10/2007
Villalba de los Alcores	01/07/2010	31/12/2012
Villanubla	01/01/1984	28/07/1993
Vitoria	01/04/2000	31/10/2007

## 5. Método utilizado: evaluación de la irradiación solar directa a partir de la global.

En este capítulo se explica el método utilizado para obtener la irradiación solar directa normal. En lo que sigue, de acuerdo con W.A. Beckman *et al.* (1978) y con M.K. Selçuk (1984), se usará la letra G para indicar la irradiancia (o el poder incidente en una superficie por unidad de área), cuyas unidades son  $W m^{-2}$ ; y se usará la letra H para indicar la irradiación (energía incidente sobre una superficie en un periodo de tiempo por unidad de área), en  $Wh m^{-2}$ .

Los valores iniciales requeridos para realizar los cálculos son la latitud del lugar,  $\varphi$ , y los doce valores de la irradiación global diaria media mensual sobre superficie horizontal,  $H_{G\ dm}(0)$ , que se convierten de  $MJ m^{-2}$  a  $Wh m^{-2}$ . Los resultados que se obtienen al aplicar el método son la irradiancia directa normal media mensual en intervalos de una hora para los doce meses del año,  $G_{B\ hm}(S)$ ; los doce valores de irradiación directa normal diaria media mensual,  $H_{B\ dm}(S)$ , y el valor de la irradiación directa normal anual,  $H_{B\ a}(S)$ . Todos los cálculos se han realizado con una hoja Excel.

El método se basa en utilizar ecuaciones propuestas por diferentes autores (Iqbal, 1983) que proporcionan una buena aproximación para un amplio rango de latitudes. Otras ecuaciones más precisas y diferentes tipos de correlaciones (Liu, *et al.* 1960; Iqbal, 1979; Louche, *et al.* 1991) no se han utilizado debido a su complejidad o a que sólo son válidas para una zona específica.

El método utilizado se basa en el siguiente procedimiento:

1. La declinación solar (en radianes) correspondiente a los días 15 de cada mes,  $\delta_{dn}$ , se calcula mediante la siguiente expresión (Cooper, 1969):

$$\delta_{dn} = \frac{23,45 \pi}{180} \text{sen} \left( \frac{2\pi(d_n+284)}{365} \right) \quad (5.1)$$

donde  $d_n$  es el día juliano, es decir, el día 1 de enero es el número 1 y el 31 de diciembre es el número 365.

2. La excentricidad de la órbita de la Tierra los días 15 de cada mes,  $\epsilon_{0\ dm}$ , se calcula con la expresión de Duffie, *et al.* (2006):

$$\epsilon_{0\ dm} = 1 + 0,033 \cos \left( \frac{2\pi d_n}{365} \right) \quad (5.2)$$

3. El ángulo horario de la salida del sol los días 15 de cada mes,  $\omega_{s\ dm}$ , en radianes, se obtiene con la ecuación de Walraven (1978):

$$\omega_{s\ dm} = -\text{arc cos}(-\tan \delta_{dn} \tan \varphi) \quad (5.3)$$

4. La irradiación extraterrestre diaria media mensual sobre superficie horizontal para cada mes,  $H_{B0\ dm}(0)$ , se calcula con la expresión de Klein (1977):

$$H_{B0\ dm}(0) = \frac{24}{\pi} B_0 \epsilon_{0\ dm} (\cos \varphi \cos \delta_{dn}) (\omega_{s\ dm} \cos \omega_{s\ dm} - \text{sen} \omega_{s\ dm}) \quad (5.4)$$

donde  $B_0$  es la constante solar, cuyo valor es:  $B_0 = 1367 \text{ W m}^{-2}$  (Allen, 1954).

5. El índice de claridad medio mensual,  $K_{Tm}$ , se obtiene dividiendo la irradiación global diaria media mensual entre la irradiación extraterrestre diaria media mensual:

$$K_{Tm} = \frac{H_{G \text{ dm}}(0)}{H_{B0 \text{ dm}}(0)} \quad (5.5)$$

Los valores de  $K_{Tm}$  se pueden agrupar de la siguiente forma: meses nublados ( $K_{Tm} = 0 - 0.2$ ); meses parcialmente nublados ( $K_{Tm} = 0.2 - 0.6$ ); meses soleados ( $K_{Tm} = 0.6 - 0.75$ ) y meses muy soleados ( $K_{Tm} = 0.75 - 1$ )

6. La fracción difusa media mensual de la radiación global,  $K_{Dm}$ , se obtiene a partir de la expresión de Page (1961):

$$K_{Dm} = 1 - 1,13 K_{Tm} \quad (5.6)$$

La fracción difusa  $K_{Dm}$  ofrece una visión de los cambios atmosféricos que afectan a la radiación solar, como pueden ser las nubes, el humo, el polvo o el polen.

7. La irradiación difusa diaria media mensual sobre superficie horizontal,  $H_{D \text{ dm}}(0)$ , se obtiene multiplicando la irradiación global y la fracción difusa de la radiación global:

$$H_{D \text{ dm}}(0) = H_{G \text{ dm}}(0) K_{Dm} \quad (5.7)$$

8. La irradiación directa diaria media mensual sobre superficie horizontal,  $H_{B \text{ dm}}(0)$ , se calcula como la diferencia entre la irradiación global y la difusa:

$$H_{B \text{ dm}}(0) = H_{G \text{ dm}}(0) - H_{D \text{ dm}}(0) \quad (5.8)$$

9. La irradiancia difusa horaria media mensual sobre superficie horizontal,  $G_{D \text{ hm}}(0)$ , viene dada por la ecuación de Whillier (1956):

$$G_{D \text{ hm}}(0) = H_{D \text{ dm}}(0) \frac{\pi}{24} \left( \frac{\cos \omega - \cos \omega_{s \text{ dm}}}{\omega_{s \text{ dm}} \cos \omega_{s \text{ dm}} - \sin \omega_{s \text{ dm}}} \right) \quad (5.9)$$

donde  $\omega$  es el ángulo horario del sol en radianes ( $-\pi$  para las 0:00 horas y  $+\pi$  para las 24:00 horas). Los valores de la irradiancia se calculan a intervalos de una hora ( $\Delta\omega = 2\pi/24 \text{ rad}$ ).

10. La irradiancia global horaria media mensual sobre superficie horizontal,  $G_{G \text{ hm}}(0)$ , se obtiene con el modelo de Collares-Pereira, *et al.* (1979):



$$G_{G\text{ hm}}(0) = H_{G\text{ dm}}(0) \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \left( \frac{\cos \omega - \cos \omega_{s\text{ dm}}}{\omega_{s\text{ dm}} \cos \omega_{s\text{ dm}} - \sin \omega_{s\text{ dm}}} \right) \quad (5.10)$$

donde a y b son los parámetros del modelo que se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$a = 0,4090 - 0,5016 \sin(\omega_{s\text{ dm}} + 1,047) \quad (5.11)$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \sin(\omega_{s\text{ dm}} + 1,047) \quad (5.12)$$

11. La irradiancia directa horaria media mensual sobre superficie horizontal,  $G_{B\text{ hm}}(0)$ , viene dada por la diferencia entre la irradiancia global y la difusa:

$$G_{B\text{ hm}}(0) = G_{G\text{ hm}}(0) - G_{D\text{ hm}}(0) \quad (5.13)$$

12. La irradiancia directa normal horaria media mensual,  $G_{B\text{ hm}}(S)$ , se obtiene con el modelo propuesto por Lorenzo, *et al.* (1994):

$$G_{B\text{ hm}}(S) = \frac{G_{B\text{ hm}}(0)}{\sin \delta_{\text{dn}} \sin \varphi + \cos \delta_{\text{dn}} \cos \varphi \cos \omega} \quad (5.14)$$

Obsérvese que el denominador de esta última expresión es el coseno del ángulo cenital (ver ecuación 2.3)

13. La irradiación directa normal diaria media mensual,  $H_{B\text{ dm}}(S)$ , se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_{B\text{ dm}}(S) \approx \sum_{j=1}^{24} G_{B\text{ hmj}}(S) \Delta t \quad (5.15)$$

donde  $G_{B\text{ hmj}}$  es la irradiancia directa normal horaria media mensual en la hora "j" y  $\Delta t = 1$  h

14. Finalmente, la irradiación directa normal anual,  $H_{B\text{ a}}(S)$ , expresada en  $\text{kWh m}^{-2}$ , se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$H_{B\text{ a}}(S) = \sum_{i=1}^{12} dm_i H_{B\text{ dmi}}(S) \quad (5.16)$$

donde  $dm_i$  es el número de días del mes "i" y  $H_{B\text{ dmi}}(S)$  es la irradiación directa normal diaria media mensual del mes "i".

Un esquema del procedimiento que se ha seguido puede verse en las siguientes figuras:

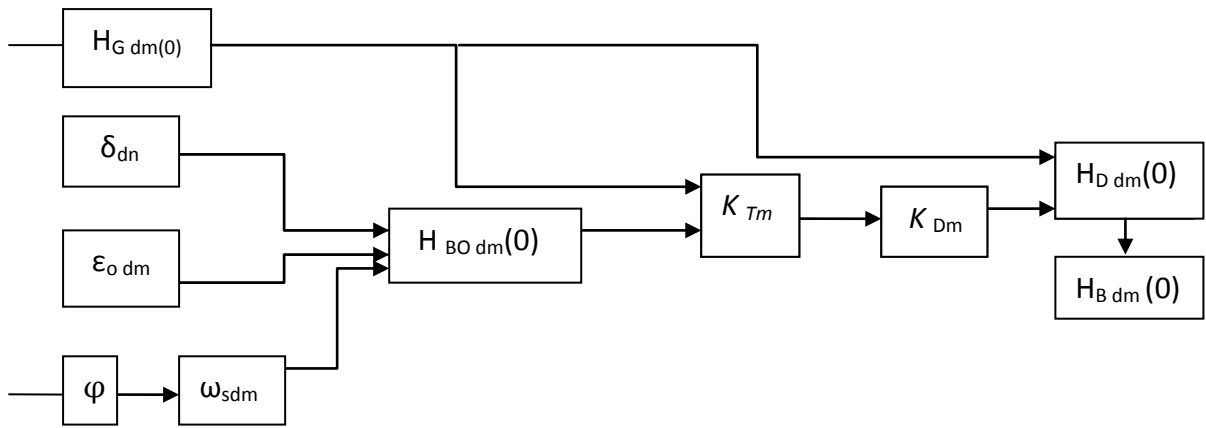


Figura 5.1. Diagrama que muestra los apartados 1-8 del método propuesto.

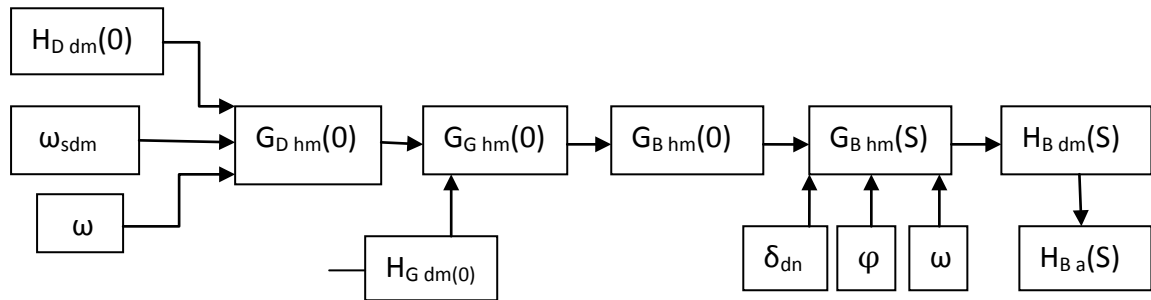


Figura 5.2. Diagrama que muestra los apartados 9-14 del método propuesto.

Se han utilizado las siguientes expresiones para el cálculo del RMSE (Root Mean Square Error) y del MBE (Mean Bias Error):

$$RMSE = \frac{100}{\bar{D}} \left[ \sum_{i=1}^N (D_{im} - D_{ir})^2 / N \right]^{0.5} \quad (5.17)$$

$$MBE = \frac{100}{\bar{D}} \left[ \sum_{i=1}^N (D_{im} - D_{ir}) / N \right] \quad (5.18)$$

donde:

$D_{im}$  es el valor “i” calculado,  $D_{ir}$  es el valor “i” medido,  $\bar{D}$  es el promedio de los valores medidos y  $N$  es el número de datos de la serie.

## 6. Resultados y discusión.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos. En primer lugar, se muestran los valores de la irradiación global diaria media mensual,  $H_{G\ dm}(0)$ , para las estaciones de las redes SIAR y AEMET y para la estación de Villalba de los Alcores. En segundo lugar, se muestran los valores obtenidos tras aplicar el modelo; es decir, los valores de la irradiación directa normal anual,  $H_{B\ a}(S)$ , para las redes SIAR y AEMET y para la estación de Villalba de los Alcores.

### 6.1. Valores de la irradiación global diaria media mensual.

A continuación se muestran los valores de la irradiación global diaria media mensual, en  $\text{MJ m}^{-2}$ , junto con su desviación estándar, en  $\text{MJ m}^{-2}$ . También se incluye el valor anual de la irradiación global (el promedio de todos los meses), junto con su desviación estándar. Para la red SIAR, los valores se dan separados por Comunidades Autónomas (y, en las Comunidades que tengan varias provincias, se han separado los valores por provincias). Las Comunidades Autónomas y, en su caso, las provincias, se muestran por orden alfabético. Asimismo, se dan los valores en las diecinueve estaciones de la red AEMET y en la estación de Villalba de los Alcores. Estas últimas estaciones se muestran por orden alfabético. En algunas de ellas también se incluye la insolación (número de horas de sol) diaria media mensual (Román, 2014).

#### 6.1.1. Red SIAR.

##### a) Andalucía.

##### *-Provincias de Almería, Cádiz, Córdoba y Granada.*

Tabla 6.1. Valores de la irradiación global diaria media mensual en las provincias de Almería, Cádiz, Córdoba y Granada ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

Estación	Almería	Jerez de la Frontera	Córdoba	Baza
<b>Mes</b>				
<b>E</b>	9.8 (1.2)	9.0 (1.0)	8.5 (1.3)	9.1 (1.2)
<b>F</b>	13.3 (1.9)	12.4 (1.9)	11.6 (2.1)	12.4 (1.5)
<b>M</b>	18.2 (2.5)	16.9 (1.6)	16.1 (2.4)	17.1 (2.5)
<b>A</b>	22.2 (2.8)	21.3 (1.6)	20.7 (1.6)	21.1 (2.5)
<b>M</b>	25.7 (1.9)	25.7 (1.5)	25.0 (1.8)	25.4 (2.1)
<b>J</b>	28.4 (2.3)	28.0 (1.0)	27.6 (1.3)	28.3 (1.0)
<b>J</b>	27.8 (1.1)	28.5 (0.8)	28.3 (1.3)	29.0 (1.0)
<b>A</b>	25.0 (1.0)	25.2 (1.1)	25.4 (0.8)	25.5 (1.0)
<b>S</b>	19.9 (0.9)	19.2 (0.9)	19.2 (1.1)	19.7 (1.2)
<b>O</b>	14.9 (0.7)	14.4 (0.9)	14.0 (0.9)	14.6 (1.3)
<b>N</b>	10.5 (1.4)	10.2 (1.0)	9.8 (1.1)	9.9 (1.5)
<b>D</b>	9.1 (1.1)	8.3 (0.6)	7.9 (1.2)	8.5 (0.7)
<b>Anual</b>	18.7 (1.5)	18.3 (1.2)	17.9 (1.4)	18.4 (1.4)

##### *-Provincias de Huelva, Jaén, Málaga y Sevilla.*

Tabla 6.2. Valores de la irradiación global diaria media mensual en las provincias de Huelva, Jaén, Málaga y Sevilla ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

Estación	Moguer	Jaén	Málaga	Osuna
<b>Mes</b>				
<b>E</b>	9.1 (1.1)	8.1 (1.0)	9.5 (1.1)	9.1 (1.0)
<b>F</b>	12.7 (1.9)	11.7 (1.8)	12.7 (1.6)	12.3 (1.8)
<b>M</b>	17.0 (1.7)	16.4 (1.9)	16.9 (2.4)	16.9 (1.9)
<b>A</b>	21.7 (1.7)	21.0 (2.0)	21.2 (2.1)	21.1 (2.2)
<b>M</b>	26.0 (1.5)	25.3 (1.7)	25.2 (2.1)	25.8 (2.3)
<b>J</b>	28.2 (1.2)	28.7 (0.7)	28.3 (1.4)	28.8 (1.1)
<b>J</b>	28.9 (1.3)	29.4 (0.9)	28.2 (1.1)	29.7 (1.2)
<b>A</b>	25.5 (1.3)	26.1 (1.0)	24.9 (0.8)	26.4 (1.3)
<b>S</b>	19.7 (1.0)	20.0 (1.1)	19.5 (0.9)	20.0 (1.1)
<b>O</b>	14.4 (1.3)	14.3 (1.1)	14.7 (1.0)	14.9 (1.1)
<b>N</b>	10.1 (1.3)	9.5 (1.3)	10.4 (1.1)	10.3 (1.2)
<b>D</b>	8.3 (0.9)	7.8 (0.9)	8.8 (1.0)	8.2 (0.8)
<b>Anual</b>	18.5 (1.4)	18.2 (1.3)	18.4 (1.4)	18.6 (1.4)

En Andalucía se observa que los valores más altos de la irradiación global corresponden a julio (excepto en Málaga y Almería, donde los valores más altos se registran en junio), y los más bajos a diciembre. Los valores máximos son los de Osuna y Baza en julio ( $29.7 \text{ MJ m}^{-2}$  y  $29 \text{ MJ m}^{-2}$ , respectivamente). La irradiación global anual más elevada es la de Almería ( $18.7 \text{ MJ m}^{-2}$ ), y la menor es la de Córdoba ( $17.9 \text{ MJ m}^{-2}$ ).

#### b) Aragón.

Tabla 6.3. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Aragón ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

Estación	Ejea de los Caballeros	Fraga	Huesca	Teruel
<b>Mes</b>				
<b>E</b>	6.7 (0.7)	5.7 (0.5)	6.6 (0.8)	7.2 (0.8)
<b>F</b>	10.5 (1.3)	10.4 (1.1)	10.8 (1.4)	10.5 (1.3)
<b>M</b>	15.3 (1.6)	15.4 (1.1)	16.2 (1.0)	14.9 (1.6)
<b>A</b>	19.7 (1.3)	18.7 (2.1)	20.2 (1.6)	18.5 (2.7)
<b>M</b>	23.4 (1.9)	23.2 (1.7)	24.0 (1.8)	22.4 (2.5)
<b>J</b>	26.1 (1.0)	25.6 (0.7)	26.3 (0.6)	25.2 (1.6)
<b>J</b>	27.0 (0.7)	26.3 (0.7)	27.3 (1.0)	27.0 (1.3)
<b>A</b>	23.8 (0.8)	22.9 (0.8)	24.0 (0.8)	23.1 (1.0)
<b>S</b>	18.5 (0.7)	17.5 (0.9)	18.3 (0.9)	17.6 (1.0)
<b>O</b>	12.4 (0.9)	12.0 (0.9)	12.4 (0.9)	12.4 (1.1)
<b>N</b>	7.6 (1.1)	7.3 (1.1)	7.7 (1.0)	7.8 (1.0)
<b>D</b>	5.9 (0.6)	5.0 (0.7)	6.0 (0.5)	6.5 (0.6)
<b>Anual</b>	16.4 (1.1)	15.8 (1.0)	16.7 (1.0)	16.1 (1.4)

En la Comunidad de Aragón los valores son inferiores a los de Andalucía durante todo el año. Los valores máximos se alcanzan en julio y los más bajos en diciembre. El valor máximo es el de Huesca en julio,  $27.3 \text{ MJ m}^{-2}$ . En Andalucía los valores de la irradiación global anual se

encuentran entre 17.9 y 18.7 MJ m<sup>-2</sup>, mientras que en Aragón se encuentran en el intervalo comprendido entre 15.8 y 16.4 MJ m<sup>-2</sup>.

### c) Baleares.

Tabla 6.4. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Baleares (MJ m<sup>-2</sup>)

Estación	Es Mercadal	Inca	Santa Eulalia
<b>Mes</b>			
E	6.4 (0.7)	7.9 (0.7)	7.8 (0.8)
F	9.4 (1.2)	10.8 (0.9)	10.8 (0.7)
M	13.7 (1.0)	15.3 (1.5)	14.7 (2.2)
A	18.0 (1.3)	20.0 (1.6)	19.7 (2.1)
M	22.1 (1.8)	23.9 (2.0)	23.3 (2.3)
J	25.1 (1.7)	26.3 (1.6)	25.8 (1.6)
J	24.6 (1.8)	26.2 (1.6)	25.4 (0.9)
A	20.6 (1.3)	22.6 (1.1)	21.4 (0.9)
S	15.0 (0.6)	17.2 (0.6)	16.4 (1.0)
O	11.1 (1.4)	12.5 (1.4)	11.8 (1.4)
N	7.0 (0.8)	8.1 (0.8)	8.3 (0.7)
D	5.2 (0.4)	7.0 (0.6)	6.9 (0.6)
Anual	14.8 (1.2)	16.5 (1.2)	16.0 (1.4)

En Baleares se observan valores muy diferentes en cada una de las tres estaciones seleccionadas. La estación con irradiación global anual más elevada es Inca, situada en la isla de Mallorca, seguida de Santa Eulalia (Ibiza) y Es mercadal (Menorca). Se observa que los valores más altos corresponden a junio (a diferencia de lo que ocurría en las Comunidades anteriores, Tablas 6.1-6.3, donde los valores más elevados se registraban en julio), y los más bajos a diciembre.

### d) Canarias

Tabla 6.5. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Canarias (MJ m<sup>-2</sup>)

Estación	Arucas	Puerto de la Cruz
<b>Mes</b>		
E	10.8 (1.4)	10.7 (1.1)
F	13.2 (0.6)	12.7 (1.0)
M	17.4 (1.8)	16.3 (1.8)
A	18.7 (1.7)	18.5 (2.0)
M	21.0 (2.8)	19.9 (2.9)
J	21.0 (2.6)	20.7 (2.2)
J	18.7 (2.6)	20.6 (2.4)
A	18.5 (1.8)	18.8 (1.4)
S	18.4 (1.6)	17.7 (1.7)
O	14.4 (1.2)	14.5 (1.1)
N	10.9 (1.5)	10.3 (1.3)
D	9.5 (1.2)	9.9 (0.6)
Anual	16.0 (1.7)	15.9 (1.6)

En Canarias, los valores de la irradiación global anual son semejantes en las dos estaciones seleccionadas, y son claramente inferiores a los de Andalucía y a los de algunas estaciones de Aragón. Al igual que en las Islas Baleares, los valores más altos se registran en junio y los más bajos en diciembre.

#### e) Castilla-la Mancha.

Tabla 6.6. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Castilla-la Mancha ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

Estación	Albacete	Almansa	Cañete	Jadraque
<b>Mes</b>				
<b>E</b>	8.2 (1.1)	8.7 (1.1)	7.9 (1.4)	7.2 (1.2)
<b>F</b>	11.5 (1.3)	11.6 (1.5)	10.9 (2.0)	10.5 (1.8)
<b>M</b>	16.3 (2.0)	16.6 (1.7)	15.6 (2.4)	15.3 (2.7)
<b>A</b>	20.8 (2.5)	20.5 (2.0)	19.3 (1.7)	19.5 (2.5)
<b>M</b>	24.3 (1.8)	24.1 (2.0)	23.5 (1.9)	23.4 (2.8)
<b>J</b>	26.9 (1.2)	26.8 (1.2)	26.4 (1.7)	26.9 (1.5)
<b>J</b>	28.4 (1.3)	27.7 (1.5)	28.5 (1.3)	28.3 (1.4)
<b>A</b>	24.7 (1.5)	24.1 (1.4)	24.3 (1.7)	24.6 (1.3)
<b>S</b>	18.9 (1.2)	18.6 (1.0)	18.0 (1.5)	18.7 (1.1)
<b>O</b>	13.7 (1.2)	13.9 (1.2)	13.2 (1.0)	12.7 (0.9)
<b>N</b>	8.9 (1.9)	9.3 (1.4)	8.6 (1.5)	7.8 (1.7)
<b>D</b>	7.7 (0.8)	7.9 (0.6)	7.3 (0.9)	6.7 (1.0)
<b>Anual</b>	17.5 (1.5)	17.5 (1.4)	17.0 (1.6)	16.8 (1.7)

En Castilla-la Mancha sucede al igual que en otras Comunidades de la península: los valores más elevados se registran en julio y los más bajos en diciembre. La irradiación global anual en Albacete y Almansa es la misma,  $17.5 \text{ MJ m}^{-2}$ , y superior a la de Cañete (provincia de Cuenca) y Jadraque (provincia de Guadalajara).

#### f) Castilla y León.

##### *-Provincias de Ávila y Burgos.*

Tabla 6.7. Valores de irradiación global diaria media mensual en las provincias de Ávila y Burgos ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

Estación	Nava de Arévalo	Condado de Treviño	Lerma	Santa Gadea del Cid
<b>Mes</b>				
<b>E</b>	6.8 (0.9)	5.0 (0.5)	6.0 (0.9)	5.3 (0.7)
<b>F</b>	10.7 (1.1)	7.9 (0.5)	9.5 (1.7)	8.2 (0.9)
<b>M</b>	15.5 (2.0)	13.0 (1.8)	14.5 (2.3)	12.9 (1.7)
<b>A</b>	19.9 (2.1)	16.1 (2.2)	18.5 (2.1)	16.7 (2.0)
<b>M</b>	24.1 (2.3)	19.9 (2.3)	23.3 (2.4)	20.1 (2.2)
<b>J</b>	26.9 (1.3)	21.7 (1.4)	25.8 (1.4)	22.3 (1.7)
<b>J</b>	28.7 (1.3)	23.7 (1.6)	27.6 (1.7)	23.7 (2.0)
<b>A</b>	25.4 (0.6)	20.7 (0.7)	24.4 (0.7)	20.9 (1.0)
<b>S</b>	19.1 (1.3)	15.5 (1.1)	18.3 (1.2)	15.9 (0.8)
<b>O</b>	12.8 (1.0)	10.3 (0.9)	12.0 (1.4)	10.3 (1.0)
<b>N</b>	7.7 (0.9)	5.2 (0.8)	6.8 (1.1)	5.8 (1.2)

<b>D</b>	6.3 (0.7)	4.4 (0.5)	5.5 (0.8)	4.7 (0.6)
Anual	17.0 (1.3)	13.6 (1.2)	16.0 (1.5)	13.9 (1.3)

**-Provincias de León y Palencia.**

Tabla 6.8. Valores de irradiación global diaria media mensual en las provincias de León y Palencia (MJ m<sup>-2</sup>)

Estación	Carracedelo	Sahagún	Santas Martas	Herrera de Pisuerga	Torquemada
<b>Mes</b>					
<b>E</b>	4.9 (0.5)	5.7 (0.7)	6.2 (0.9)	5.3 (0.7)	5.6 (0.6)
<b>F</b>	9.3 (1.8)	9.9 (1.7)	10.5 (1.7)	9.4 (1.4)	9.5 (1.6)
<b>M</b>	13.9 (2.4)	14.7 (2.4)	15.2 (2.3)	14.3 (2.1)	14.5 (2.3)
<b>A</b>	18.3 (2.2)	19.3 (1.9)	19.8 (1.4)	18.2 (1.5)	18.6 (1.8)
<b>M</b>	22.6 (1.7)	23.6 (2.1)	24.4 (1.8)	22.6 (1.8)	23.4 (2.1)
<b>J</b>	25.0 (1.9)	26.2 (1.4)	26.9 (1.3)	25.3 (1.6)	26.1 (1.5)
<b>J</b>	26.2 (1.7)	27.4 (1.0)	28.5 (1.2)	26.9 (0.8)	27.9 (1.2)
<b>A</b>	23.8 (1.3)	24.2 (0.9)	25.1 (0.7)	23.5 (0.8)	24.8 (0.8)
<b>S</b>	17.9 (2.0)	18.5 (1.1)	18.9 (1.5)	17.7 (1.4)	18.3 (1.2)
<b>O</b>	10.8 (1.9)	11.3 (1.6)	11.7 (1.7)	11.2 (1.3)	11.7 (1.2)
<b>N</b>	5.9 (1.5)	7.0 (1.4)	7.4 (1.4)	6.4 (0.8)	6.8 (1.0)
<b>D</b>	4.3 (0.4)	5.4 (0.6)	5.8 (0.7)	5.1 (0.6)	5.3 (0.7)
Anual	15.3 (1.6)	16.1 (1.4)	16.7 (1.4)	15.5 (1.2)	16.0 (1.3)

**-Provincias de Salamanca, Segovia, Soria y Zamora.**

Tabla 6.9. Valores de la irradiación global diaria media mensual en las provincias de Salamanca, Segovia, Soria y Zamora (MJ m<sup>-2</sup>)

Estación	Ciudad Rodrigo	Gomezserracín	Hinojosa del campo	Barcial del Barco
<b>Mes</b>				
<b>E</b>	6.7 (1.0)	5.9 (0.9)	6.8 (0.9)	6.0 (0.5)
<b>F</b>	10.9 (2.0)	9.7 (1.6)	9.9 (1.5)	10.6 (1.5)
<b>M</b>	15.1 (2.8)	14.5 (2.5)	14.8 (2.1)	15.3 (2.2)
<b>A</b>	19.2 (2.2)	18.5 (2.4)	18.9 (1.8)	19.9 (1.7)
<b>M</b>	23.8 (2.5)	22.9 (2.4)	23.1 (2.1)	25.0 (2.2)
<b>J</b>	27.0 (1.4)	26.0 (1.1)	26.1 (1.1)	27.6 (1.3)
<b>J</b>	28.6 (1.2)	26.8 (2.4)	27.9 (1.3)	29.1 (1.2)
<b>A</b>	25.3 (0.8)	24.6 (0.5)	24.7 (0.9)	25.2 (0.9)
<b>S</b>	18.9 (1.2)	18.4 (1.3)	18.6 (1.1)	18.9 (1.1)
<b>O</b>	12.6 (1.3)	12.1 (1.2)	12.7 (1.1)	12.2 (1.2)
<b>N</b>	7.4 (1.4)	6.9 (1.1)	7.3 (1.2)	7.5 (1.4)
<b>D</b>	6.2 (0.6)	5.6 (0.7)	6.3 (0.7)	5.8 (0.6)
Anual	16.8 (1.5)	16.0 (1.5)	16.4 (1.3)	16.9 (1.3)

**-Provincia de Valladolid.**

Tabla 6.10. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la provincia de Valladolid (MJ m<sup>-2</sup>)

Estación	Zamadueñas	Tordesillas	Olmedo	Encinas de Esgueva
<b>Mes</b>				
<b>E</b>	5.5 (0.5)	5.6 (0.4)	5.9 (0.6)	5.7 (0.7)

<b>F</b>	9.6 (1.8)	10.2 (1.6)	10.4 (1.5)	9.3 (1.4)
<b>M</b>	14.6 (2.7)	15.1 (2.4)	15.1 (2.4)	14.2 (1.9)
<b>A</b>	18.4 (1.8)	19.2 (2.3)	19.4 (2.1)	17.8 (1.7)
<b>M</b>	23.3 (2.6)	24.1 (2.8)	23.9 (2.4)	21.7 (2.1)
<b>J</b>	25.7 (1.3)	27.0 (1.6)	26.8 (1.4)	23.6 (1.4)
<b>J</b>	27.2 (1.3)	28.9 (1.3)	28.5 (1.3)	25.3 (1.2)
<b>A</b>	24.3 (0.9)	25.5 (1.0)	25.2 (0.5)	22.6 (0.8)
<b>S</b>	18.4 (0.8)	19.1 (1.5)	18.9 (1.2)	17.3 (1.1)
<b>O</b>	11.8 (1.3)	12.1 (1.3)	12.6 (1.1)	11.1 (0.9)
<b>N</b>	6.9 (1.1)	7.2 (1.2)	7.4 (1.0)	6.7 (0.8)
<b>D</b>	5.2 (0.5)	5.5 (0.8)	5.7 (0.7)	5.3 (0.6)
Anual	15.9 (1.4)	16.6 (1.5)	16.7 (1.3)	15.0 (1.2)

En todas las estaciones de Castilla y León se observa que los valores máximos corresponden a julio y los mínimos a diciembre. En Nava de Arévalo (provincia de Ávila, Tabla 6.7) se alcanza la irradiación anual global más elevada ( $17 \text{ MJ m}^{-2}$ ), y la más baja se registra en el Condado de Treviño ( $13.6 \text{ MJ m}^{-2}$ ). En la provincia de Burgos (Tabla 6.7) se observa una gran diferencia entre el norte de la misma (estaciones de Santa Gadea del Cid y Condado de Treviño, con una irradiación global anual inferior a  $14 \text{ MJ m}^{-2}$ ) y el sur (estación de Lerma, con  $16 \text{ MJ m}^{-2}$ ). También se observa una gran variabilidad en los valores de irradiación global anual dentro de las provincias de León y Palencia (Tabla 6.8). En Carracedelo, situado al oeste de la provincia de León (cerca de Galicia), la irradiación global anual es menor que en Santas Martas y Sahagún, situadas al sur de dicha provincia, en la zona norte de la meseta. En Herrera de Pisuerga, situada al norte de Palencia, los valores son inferiores a los de Torquemada, situada al sur. En Barcial del Barco (provincia de Zamora, en la zona de Tierra de Campos), Ciudad Rodrigo (Salamanca, cerca de Portugal), Hinojosa del Campo (Soria) y Gomezserracín (Segovia) se alcanzan valores elevados de irradiación global anual (entre  $16.0$  y  $16.9 \text{ MJ m}^{-2}$ , ver la Tabla 6.9). En la provincia de Valladolid (Tabla 6.10) también se observan valores diferentes en cada una de las estaciones seleccionadas. La estación con menor irradiación global anual es Encinas de Esgueva (situada al norte de la provincia). Tordesillas y Olmedo (situadas más al sur) son las que tienen mayor irradiación ( $16.6$  y  $16.7 \text{ MJ m}^{-2}$ , respectivamente). Zamadueñas, cerca de Valladolid capital, muestra un valor intermedio,  $15.9 \text{ MJ m}^{-2}$ .

### g) Comunidad Valenciana.

Tabla 6.11. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad Valenciana ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

Estación	Altea	Campo Arcís	Castelló-Benadresa	Villena	Játiva
<b>Mes</b>					
<b>E</b>	8.6 (0.8)	7.9 (1.3)	7.9 (1.0)	8.6 (1.1)	7.5 (1.6)
<b>F</b>	11.2 (0.9)	10.9 (1.6)	10.9 (0.8)	11.6 (1.3)	10.9 (1.3)
<b>M</b>	16.4 (1.4)	15.7 (1.5)	15.5 (1.4)	16.1 (1.6)	16.0 (2.5)
<b>A</b>	20.2 (1.5)	19.7 (1.8)	19.1 (1.7)	20.0 (2.1)	20.1 (3.1)
<b>M</b>	23.9 (2.2)	23.9 (2.0)	22.7 (1.7)	23.9 (2.0)	23.7 (2.3)



<b>J</b>	26.2 (1.2)	26.3 (1.2)	25.0 (1.2)	26.7 (0.9)	26.3 (1.4)
<b>J</b>	26.0 (1.6)	27.3 (1.1)	24.3 (2.2)	27.2 (1.2)	26.5 (1.6)
<b>A</b>	22.7 (0.9)	23.5 (0.8)	21.0 (1.6)	23.3 (1.0)	23.1 (1.6)
<b>S</b>	17.8 (1.2)	17.8 (1.4)	16.2 (1.0)	17.8 (1.7)	17.8 (1.3)
<b>O</b>	13.0 (0.9)	13.0 (1.6)	12.4 (1.0)	13.6 (1.3)	12.9 (1.1)
<b>N</b>	9.1 (0.8)	8.6 (1.4)	8.8 (1.4)	9.2 (1.1)	8.1 (1.2)
<b>D</b>	7.7 (0.5)	7.2 (0.6)	7.2 (0.6)	7.9 (0.8)	6.6 (1.0)
Anual	16.9 (1.2)	16.8 (1.4)	15.9 (1.3)	17.2 (1.4)	16.6 (1.7)

En la Comunidad Valenciana se observa que el mes con menor radiación es siempre diciembre, mientras que el mes con mayor radiación es julio (en algunas estaciones) o junio (en otras). Villena (situada en Alicante) es la estación con irradiación global anual más elevada, 17.2 MJ m<sup>-2</sup>, seguida de Altea (también en Alicante), Campo Arcís y Játiva (ambas en Valencia) y Castelló-Benadresa, siendo ésta última la estación con irradiación global anual más baja, 15.9 MJ m<sup>-2</sup>.

#### h) Galicia.

Tabla 6.12. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Galicia (MJ m<sup>-2</sup>)

Estación	Castro de Rei	Monforte de Lemos
<b>Mes</b>		
<b>E</b>	4.3 (0.6)	4.4 (0.8)
<b>F</b>	7.6 (1.2)	8.0 (1.6)
<b>M</b>	11.9 (2.4)	11.9 (2.4)
<b>A</b>	15.7 (1.7)	16.4 (2.1)
<b>M</b>	18.6 (1.8)	20.0 (2.4)
<b>J</b>	20.8 (1.1)	21.8 (1.2)
<b>J</b>	21.3 (1.3)	22.7 (1.0)
<b>A</b>	19.5 (1.0)	20.8 (1.2)
<b>S</b>	15.0 (1.3)	15.5 (1.2)
<b>O</b>	9.5 (1.1)	9.7 (1.5)
<b>N</b>	5.0 (0.9)	4.9 (0.9)
<b>D</b>	3.8 (0.5)	3.6 (0.3)
Anual	12.7 (1.2)	13.3 (1.4)

En Galicia se obtienen valores de irradiación global muy inferiores a los de otras Comunidades Autónomas. En Castro de Rei (provincia de Lugo), solo se registran 12.7 MJ m<sup>-2</sup> al año, y en Monforte de Lemos (situada al sur de la provincia de Lugo), 13.3 MJ m<sup>-2</sup>, aunque ocurre lo que en otras muchas Comunidades: los valores más elevados corresponden a julio y los menores a diciembre.

#### i) Navarra.

Tabla 6.13. Valores de la irradiación global diaria media mensual en la Comunidad de Navarra (MJ m<sup>-2</sup>)

Estación	Adiós	Bargota	Fitero
<b>Mes</b>			
<b>E</b>	5.6 (0.7)	5.9 (0.7)	6.4 (0.7)
<b>F</b>	9.2 (1.1)	9.0 (0.9)	9.4 (1.2)

<b>M</b>	13.8 (2.3)	13.9 (1.6)	14.0 (1.9)
<b>A</b>	17.8 (2.0)	17.9 (1.7)	17.6 (1.7)
<b>M</b>	21.9 (2.3)	21.3 (2.2)	21.2 (2.0)
<b>J</b>	24.8 (1.5)	24.4 (1.1)	24.5 (0.9)
<b>J</b>	25.8 (1.1)	25.3 (1.3)	25.7 (1.3)
<b>A</b>	22.5 (0.9)	22.1 (1.0)	22.8 (1.0)
<b>S</b>	17.2 (0.9)	16.8 (0.9)	17.4 (0.8)
<b>O</b>	11.3 (0.9)	11.1 (0.8)	11.9 (1.0)
<b>N</b>	6.4 (1.0)	6.5 (0.9)	6.9 (0.9)
<b>D</b>	5.1 (0.6)	5.2 (0.5)	5.7 (0.6)
Anual	15.1 (1.3)	15.0 (1.1)	15.3 (1.2)

En Navarra se observan valores de irradiación anual en torno a  $15 \text{ MJ m}^{-2}$  en Adiós y Bargota (situadas en el centro de la Comunidad) y de  $15.3 \text{ MJ m}^{-2}$  en Fitero (situada al sur). En las tres estaciones el valor más elevado es el de julio (entre  $25.3$  y  $25.8 \text{ MJ m}^{-2}$ ) y el más bajo el de diciembre (entre  $5.1$  y  $5.7 \text{ MJ m}^{-2}$ ).

#### 6.1.2. Red AEMET y estación de Villalba de los Alcores.

Tabla 6.14. Valores de la irradiación global y de la insolación diaria media mensual en las estaciones de medida de la red AEMET ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) (I)

Estación	Badajoz	Bilbao	Cáceres	Ciudad Real	La Coruña	León	Logroño
<b>Mes</b>							
<b>E</b>	8.1 (3.2)	4.8 (2.5)	7.8 (3.0)	7.4 (3.1)	5.2 (2.4)	6.1 (3.1)	5.5 (2.7)
<b>F</b>	10.4 (3.9)	7.2 (3.5)	11.4 (4.0)	11.5 (3.9)	8.3 (3.6)	10.6 (4.3)	9.0 (3.8)
<b>M</b>	16.2 (4.6)	11.0 (4.9)	16.3 (4.7)	16.1 (4.7)	12.6 (5.1)	14.0 (5.4)	13.9 (4.9)
<b>A</b>	18.8 (6.5)	13.8 (6.2)	20.0 (5.7)	20.0 (5.5)	16.6 (6.2)	18.1 (6.6)	17.3 (6.4)
<b>M</b>	24.0 (5.7)	17.3 (7.2)	23.6 (5.9)	22.9 (6.1)	20.0 (7.0)	22.7 (6.4)	20.8 (7.1)
<b>J</b>	26.4 (5.2)	18.2 (7.7)	26.8 (4.9)	26.8 (4.3)	22.3 (7.6)	26.5 (5.3)	23.7 (6.2)
<b>J</b>	27.6 (3.1)	17.9 (7.2)	27.7 (3.2)	27.4 (3.1)	22.5 (6.7)	26.3 (5.0)	24.2 (5.4)
<b>A</b>	24.0 (3.7)	16.6 (6.1)	24.2 (3.6)	24.0 (3.2)	19.9 (5.7)	22.9 (4.8)	20.5 (5.1)
<b>S</b>	18.4 (4.3)	13.0 (5.1)	18.6 (4.2)	18.3 (4.4)	15.3 (4.8)	17.2 (5.3)	16.0 (4.9)
<b>O</b>	12.2 (4.1)	8.5 (3.9)	12.7 (4.2)	12.6 (4.1)	9.6 (4.0)	10.5 (4.6)	10.1 (4.0)
<b>N</b>	8.6 (3.2)	5.3 (2.8)	8.4 (3.2)	8.2 (3.2)	5.8 (2.6)	7.1 (3.1)	6.3 (3.1)
<b>D</b>	7.0 (2.6)	4.0 (2.2)	6.4 (2.7)	6.5 (2.7)	4.5 (2.0)	5.7 (2.6)	4.7 (2.3)
Anual	17.2 (8.4)	11.8 (7.4)	17.3 (8.4)	16.9 (8.3)	13.6 (8.3)	15.5 (8.7)	14.1 (8.3)
n (horas)	-	-	8.0 (2.7)	7.4 (2.5)	5.5 (1.7)	-	-

Tabla 6.15. Valores de la irradiación global y de la insolación diaria media mensual en las estaciones de medida de la red AEMET ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) (II)

Estación	Madrid	Murcia	Oviedo	Salamanca	San Sebastián	Santander
<b>Mes</b>						
<b>E</b>	7.3 (3.0)	8.8 (2.9)	5.6 (2.4)	6.8 (2.9)	5.0 (2.8)	5.0 (2.4)
<b>F</b>	10.7 (4.0)	12.0 (4.0)	7.9 (3.4)	10.1 (3.7)	7.8 (4.2)	7.56 (3.5)
<b>M</b>	15.7 (4.9)	16.3 (5.2)	12.0 (4.7)	14.1 (4.5)	12.1 (5.6)	12.3 (5.1)
<b>A</b>	19.7 (6.0)	20.9 (5.4)	14.9 (6.2)	18.8 (5.7)	15.5 (7.1)	16.1 (6.3)

<b>M</b>	23.1 (6.3)	23.7 (5.9)	16.7 (7.1)	22.9 (6.4)	17.8 (7.8)	18.8 (7.3)
<b>J</b>	26.5 (5.2)	26.3 (4.5)	17.6 (7.9)	26.6 (4.5)	19.8 (8.1)	20.5 (7.9)
<b>J</b>	27.5 (3.6)	26.5 (3.0)	17.9 (7.5)	26.5 (4.5)	19.2 (8.0)	20.0 (7.3)
<b>A</b>	24.2 (3.6)	23.2 (3.5)	15.7 (6.3)	22.8 (4.2)	16.4 (6.9)	17.6 (6.4)
<b>S</b>	18.6 (4.2)	18.2 (4.1)	13.2 (5.1)	17.9 (4.3)	14.0 (5.7)	14.7 (5.3)
<b>O</b>	12.2 (4.2)	13.3 (3.9)	9.0 (3.8)	11.0 (4.4)	9.3 (4.3)	9.4 (3.9)
<b>N</b>	8.1 (3.2)	9.4 (3.2)	6.0 (2.7)	7.2 (3.0)	5.6 (3.0)	5.6 (3.0)
<b>D</b>	6.0 (2.7)	7.7 (2.5)	4.8 (2.0)	6.0 (2.4)	4.3 (2.3)	4.4 (2.1)
Anual	16.7 (8.6)	17.2 (7.8)	11.9 (7.1)	16.2 (8.5)	12.3 (8.1)	12.9 (7.9)
n (horas)	7.7 (2.6)	8.1 (2.0)	-	-	4.8 (1.4)	-

Tabla 6.16. Valores de la irradiación global y de la insolación diaria media mensual en las estaciones de medida de la red AEMET ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) (III) y en la estación de Villalba de los Alcores.

Estación	Soria	Talavera de la Reina	Tortosa	Valladolid	Villalba de los Alcores	Villanubla	Vitoria
<b>Mes</b>							
<b>E</b>	7.0 (3.1)	7.7 (2.8)	7.3 (2.7)	5.9 (2.8)	6.6 (3.2)	6.3 (2.6)	5.0 (2.9)
<b>F</b>	9.8 (4.0)	11.9 (3.5)	10.1 (4.0)	10.3 (3.6)	10.7 (3.9)	9.7 (3.0)	7.5 (3.9)
<b>M</b>	14.2 (5.2)	14.5 (4.1)	14.7 (5.0)	15.3 (4.8)	15.5 (5.0)	14.2 (4.2)	12.1 (5.6)
<b>A</b>	18.0 (6.6)	19.0 (4.1)	18.2 (6.4)	19.4 (5.7)	19.9 (5.8)	18.1 (6.0)	14.8 (6.7)
<b>M</b>	22.2 (6.8)	21.0 (5.9)	21.4 (6.5)	22.7 (6.0)	24.5 (6.1)	23.2 (5.7)	19.1 (7.3)
<b>J</b>	25.9 (5.6)	23.9 (5.8)	24.2 (5.7)	26.4 (5.2)	27.5 (5.3)	25.9 (5.4)	21.2 (7.1)
<b>J</b>	25.7 (4.3)	27.5 (1.9)	24.0 (4.9)	26.9 (4.1)	28.8 (3.7)	27.2 (4.0)	21.5 (6.1)
<b>A</b>	22.1 (5.1)	24.7 (2.6)	20.7 (4.7)	23.5 (4.0)	25.1 (3.5)	23.3 (3.8)	18.2 (6.1)
<b>S</b>	17.4 (4.8)	20.0 (2.7)	16.2 (4.5)	17.8 (4.3)	19.1 (4.3)	17.7 (4.2)	14.9 (5.2)
<b>O</b>	11.4 (4.3)	13.5 (3.8)	12.1 (3.8)	11.1 (4.4)	12.3 (4.4)	11.3 (3.7)	9.5 (4.4)
<b>N</b>	6.6 (3.2)	7.4 (2.7)	7.6 (2.9)	7.0 (3.0)	7.7 (3.1)	7.2 (2.7)	5.8 (3.3)
<b>D</b>	5.8 (2.4)	6.5 (2.0)	6.5 (2.5)	5.1 (2.4)	6.2 (2.6)	5.4 (2.1)	4.4 (2.5)
Anual	15.7 (8.4)	16.2 (7.9)	15.4 (7.9)	16.1 (8.8)	16.9 (9.0)	16.1 (8.7)	13.2 (8.1)
n (horas)	-	-	7.2 (1.8)	7.1 (3.0)	7.3 (3.0)	-	-

En todas las estaciones de la red AEMET se observa que los valores menores de la irradiación global son los de diciembre. Los valores mayores de la irradiación global se alcanzan, en general, en el mes de julio. Sin embargo, en muchas ciudades de la costa Cantábrica (Bilbao, San Sebastián, Santander), en algunas ciudades de Castilla y León (Soria, Salamanca, León) y en Tortosa, los valores mayores son los del mes de junio. La irradiación global anual más elevada ( $17.3 \text{ MJ m}^{-2}$ ) es la de Cáceres, y la más baja es la de Bilbao ( $11.8 \text{ MJ m}^{-2}$ ). Otros valores elevados se alcanzan en Badajoz, Ciudad Real o Murcia, con una irradiación global anual en torno a los  $17 \text{ MJ m}^{-2}$  o superior. En Madrid, Salamanca y Talavera de la Reina, la irradiación global anual es superior a  $16 \text{ MJ m}^{-2}$  pero inferior a  $17 \text{ MJ m}^{-2}$ . En Soria, Tortosa y León, se alcanzan valores de irradiación global anual superiores a  $15 \text{ MJ m}^{-2}$  (pero inferiores a  $16 \text{ MJ m}^{-2}$ ). Se observa que los valores más bajos de la irradiación global anual son, claramente, los de las ciudades del norte de la península (San Sebastián, Oviedo y Santander), con una irradiación global anual inferior a  $13 \text{ MJ m}^{-2}$ , aunque en La Coruña y Vitoria se alcanzan valores superiores ( $13.6$  y  $13.2 \text{ MJ m}^{-2}$ , respectivamente). En Valladolid y Villanubla (ver la Tabla 6.16) el valor de la irradiación global

anual es el mismo ( $16.1 \text{ MJ m}^{-2}$ ), y semejante a los  $15.9 \text{ MJ m}^{-2}$  en la estación de Zamadueñas de la red SIAR (ver la Tabla 6.10). Sin embargo, en Villalba de los Alcores, se obtiene un valor superior al de las otras estaciones de la provincia de Valladolid.

## 6.2. Valores de la irradiación directa normal anual.

En este apartado se presentan los valores de la irradiación directa normal anual,  $H_{Ba}$  (S), en  $\text{kWh m}^{-2}$ . También se muestran las características geográficas de las estaciones (latitud y longitud), así como la altura a la que se encuentran. Las estaciones de la red AEMET y Villalba de los Alcores se han ordenado por orden alfabético, y el valor de la DNI anual que se ha obtenido se muestra en la Tabla 6.17. En la Tabla 6.18 se muestran las características geográficas y el valor de la irradiación directa normal anual en las estaciones de la red SIAR en la Comunidad de Castilla y León y, a continuación, en el resto de las Comunidades Autónomas (Tabla 6.19).

### 6.2.1. Red AEMET y estación de Villalba de los Alcores.

Tabla 6.17. Coordenadas geográficas e irradiación directa normal anual calculada en las estaciones de medida de la red AEMET de la península Ibérica y en la estación de Villalba de los Alcores.

Estación	Altura (m)	Longitud (°)	Latitud (°)	$H_{Ba}$ (S) ( $\text{kWh m}^{-2}$ )
Badajoz	175	-7.02	38.88	2048.08
Bilbao	39	-2.93	43.30	1024.90
Cáceres	405	-6.34	39.47	2121.13
Ciudad Real	628	-3.91	38.98	2041.57
La Coruña	58	-8.41	43.36	1452.39
León	916	-5.65	42.59	1927.60
Logroño	352	-2.33	42.45	1594.06
Madrid	664	-3.72	40.45	2074.46
Murcia	61	-1.17	38.00	2103.69
Oviedo	336	-5.86	43.35	1113.40
Salamanca	790	-5.50	40.95	1903.20
San Sebastián	251	-2.03	43.30	1174.98
Santander	52	-3.80	43.48	1269.27
Soria	1082	-2.50	41.77	1861.99
Talavera de la Reina	185	-6.83	38.88	1976.04
Tortosa	44	0.49	40.82	1771.09
Valladolid	735	-4.77	41.65	1943.62
Villalba de los Alcores	847	-4.77	41.86	2251.02
Villanueva	846	-4.85	41.70	1914.58
Vitoria	508	-2.72	42.88	1279.06

Se observa que los valores más altos de la DNI anual se alcanzan en las ciudades del sur de la península (Cáceres, Badajoz y Ciudad Real), con valores superiores a los  $2000 \text{ kWh m}^{-2}$  (lo mismo sucede en Madrid). En cambio, los valores más bajos son los de las ciudades del norte (Oviedo, Santander, Bilbao, San Sebastián y Vitoria), con una DNI anual inferior a  $1300 \text{ kWh m}^{-2}$ . En La Coruña se tiene un valor más alto,  $1452 \text{ kWh m}^{-2}$ ; y nótese que el valor en Bilbao es

extremadamente bajo, 1024 kWh m<sup>-2</sup>. En Castilla y León el valor de la DNI anual está en torno a los 1900 kWh m<sup>-2</sup> (ver Valladolid, Villanubla, León, Salamanca y Soria), excepto en Villalba de los Alcores, donde llega hasta 2251 kWh m<sup>-2</sup>. En Talavera de la Reina el valor de la DNI anual es superior al de Castilla y León pero inferior al de Badajoz, Cáceres o Ciudad Real. En Tortosa la DNI anual es 1771 kWh m<sup>-2</sup>, superior a la de las ciudades del norte pero inferior a las del centro o el sur. Lo mismo sucede en Logroño.

### 6.2.2. Red SIAR.

Tabla 6.18. Coordenadas geográficas e irradiación directa normal anual calculada en las estaciones de la red SIAR en Castilla y León.

Estación	Altura (m)	Longitud (°)	Latitud (°)	H <sub>Ba</sub> (S) (kWh m <sup>-2</sup> )
Barcial del Barco	695	-5.67	41.93	2231.26
Carracedelo	463	-6.72	42.57	1812.15
Ciudad Rodrigo	635	-6.54	40.59	2131.70
Condado de Treviño	562	-2.78	42.74	1436.41
Encinas de Esgueva	800	-4.10	41.78	1737.16
Gomezerracín	812	-4.30	41.30	1946.82
Herrera de Pisuerga	810	-4.25	42.49	1876.07
Hinojosa del Campo	1043	-2.10	41.73	2099.42
Lerma	840	-3.77	42.04	1996.55
Nava de Arévalo	921	-4.76	40.97	2198.81
Olmedo	740	-4.69	41.31	2123.47
Sahagún	839	-5.02	42.38	2005.25
Santa Gadea del Cid	532	-3.06	42.71	1504.45
Santas Martas	879	-5.26	42.44	2170.96
Tordesillas	671	-5.00	41.49	2121.17
Torquemada	741	-4.30	42.05	1997.26
Zamadueñas	714	-4.70	41.71	1925.26

En Castilla y León, los valores calculados de la DNI anual están comprendidos entre 1436 y 2231 kWh m<sup>-2</sup>. Los valores más bajos se obtienen en las estaciones situadas al norte de la provincia de Burgos (Condado de Treviño y Santa Gadea del Cid), con 1436 y 1504 kWh m<sup>-2</sup>, respectivamente. Sin embargo, al sur de dicha provincia (Lerma), se llega hasta 1996 kWh m<sup>-2</sup>. Esta variabilidad también se da en la provincia de León (comparar los 1812 kWh m<sup>-2</sup> en Carracedelo con los valores en Sahagún y Santas Martas, superiores a 2000 kWh m<sup>-2</sup>). Lo mismo sucede en Palencia, donde en Herrera de Pisuerga la DNI anual es 1876 kWh m<sup>-2</sup> y en Torquemada es casi 2000 kWh m<sup>-2</sup>. En la provincia de Valladolid también se tienen valores muy dispares. En Encinas de Esgueva la DNI es 1737 kWh m<sup>-2</sup>, en Zamadueñas 1925 kWh m<sup>-2</sup> (valor semejante al de las estaciones de Valladolid y Villanubla de la red AEMET), y en Tordesillas y Olmedo se tienen valores superiores (en torno a 2120 kWh m<sup>-2</sup>). Los valores más altos en Castilla y León son los de Barcial del Barco, Ciudad Rodrigo o Nava de Arévalo, con una DNI anual que está comprendida entre 2100 y 2200 kWh m<sup>-2</sup>.

Tabla 6.19. Coordenadas geográficas e irradiación directa normal anual calculada en las estaciones de la red SIAR en Andalucía, Aragón Baleares, Canarias, Castilla-la Mancha, Comunidad Valenciana, Galicia y Navarra.

Estación	Altura (m)	Longitud (°)	Latitud (°)	H <sub>Ba</sub> (S) (kWh m <sup>-2</sup> )
Adiós	444	-1.74	42.69	1777.86
Albacete	677	-1.86	38.99	2241.76
Almansa	698	-1.10	38.87	2235.45
Almería	22	-2.46	36.84	2439.22
Altea	210	-0.05	38.60	2067.17
Arucas	251	-15.52	28.12	1484.28
Bargota	375	-2.31	42.54	1751.50
Baza	814	-2.77	37.49	2391.98
Campo Arcís	584	-1.17	39.43	2081.13
Cañete	1053	-1.65	40.04	2160.61
Castro de Rei	424	-7.39	43.20	1261.17
Castelló-Benadresa	95	-0.13	40.02	1904.59
Córdoba	117	-4.78	37.89	2270.45
Ejea de los Caballeros	317	-1.20	42.10	2101.54
Es Mercadal	41	4.09	39.99	1605.71
Fitero	450	-1.86	42.06	1824.58
Fraga	81	0.20	41.48	1916.17
Huesca	420	-0.38	42.11	2180.29
Inca	42	2.91	39.72	2005.02
Jadraque	808	-2.93	40.93	2153.66
Jaén	299	-3.80	37.78	2350.22
Jerez de la Frontera	32	-6.12	36.69	2305.41
Málaga	68	-4.45	36.72	2328.79
Moguer	87	-6.84	37.28	2401.57
Monforte de Lemos	340	-7.52	42.52	1350.36
Osuna	214	-5.11	37.24	2423.59
Puerto de la Cruz	142	-16.54	28.41	1457.25
Santa Eulalia	120	1.54	38.98	1855.62
Teruel	928	-1.17	40.35	1970.48
Villena	495	-0.86	38.64	2136.83
Játiva	124	-0.52	38.99	1999.56

Los valores menores de la DNI anual calculada son los de Galicia (1260 kWh m<sup>-2</sup> en Castro de Rei y 1350 kWh m<sup>-2</sup> en Monforte de Lemos). Por el contrario, los valores más elevados son los de las estaciones de Andalucía (Málaga, Moguer, Osuna, Jaén, Jerez de la Frontera, Baza) con una DNI anual superior a 2300 kWh m<sup>-2</sup> y en algunos casos superior a 2400 kWh m<sup>-2</sup>. En Castilla-la Mancha también se obtiene valores elevados (2241 kWh m<sup>-2</sup> en Albacete, 2153 kWh m<sup>-2</sup> en Jadraque, 2160 kWh m<sup>-2</sup> en Cañete). En la Comunidad Valenciana la DNI menor es la de Castelló-Benadresa (1904 kWh m<sup>-2</sup>), mientras que en Játiva se alcanzan casi 2000 kWh m<sup>-2</sup> y en Villena más de 2100 kWh m<sup>-2</sup>. En Canarias la DNI anual calculada es muy baja (1484 kWh m<sup>-2</sup> en Arucas y 1457 kWh m<sup>-2</sup> en Puerto de la Cruz). En Baleares se obtienen valores muy diferentes en cada una de sus tres islas: 2005 kWh m<sup>-2</sup> en Inca (Mallorca), 1855 kWh m<sup>-2</sup> en Santa Eulalia (Ibiza) y 1605 kWh m<sup>-2</sup> en Es Mercadal (Menorca). En Aragón los valores más elevados son los de Huesca

(2180 kWh m<sup>-2</sup>) y Ejea de los Caballeros (2101 kWh m<sup>-2</sup>), mientras que en Teruel y Fraga se obtienen valores inferiores (1970 y 1916 kWh m<sup>-2</sup>, respectivamente). En Navarra la DNI anual calculada es del orden de 1750 kWh m<sup>-2</sup> en Bargota y Adiós (estaciones situadas en el centro de dicha Comunidad), mientras que en Fitero (situada al sur) la DNI es superior (1824 kWh m<sup>-2</sup>).

### 6.3. Comparación de los resultados con los proporcionados por tres bases de datos.

En este apartado se comparan los resultados obtenidos tras aplicar el modelo con los proporcionados por tres bases de datos: NASA-SSE, Climate - SAF PVGIS y SoDa. Estas bases de datos usan distintos tipos de datos de entrada (de satélites, mediciones realizadas en tierra) y diferentes procedimientos para estimar los valores de la DNI. Son una herramienta muy útil en el diseño y evaluación de los sistemas de generación de energía mediante concentradores (Pérez-Higueras, *et al.* 2012). Sin embargo, hay una gran diferencia entre los valores de la DNI proporcionados por las distintas bases de datos, tal y como se muestra en las Tablas 6.20, 6.21 y 6.22. A continuación se describen las principales características de dichas bases de datos.

Los datos del NASA-SSE son valores mensuales y valores medios anuales para todo el planeta, tomados desde julio de 1983 hasta junio de 2005. Los datos de entrada (Súri, *et al.* 2009) son valores de irradiancia tomados por los satélites NASA ISCCP y CERES MODIS, parámetros de superficie y de nubes, datos de aerosoles del modelo NCAR-MATCH (National Center for Atmospheric Research - Model of Atmospheric Transport and Chemistry) y datos de ozono del TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) y TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder).

Los datos del Climate-SAF PVGIS se basan en cálculos de imágenes de satélite realizadas por el CM-SAF (Climate Monitoring–Satellite Application Facilities), creado en 1992 por EUMETSAT. Dichos datos, tomados durante doce años, corresponden a valores mensuales y anuales de la DNI. La primera generación del satélite Meteosat (Meteosat 5-7), conocido como MFG, contiene datos desde 1998 hasta 2005, y la segunda generación del satélite Meteosat (conocido como MSG) contiene datos desde junio de 2006 hasta mayo de 2010. La cobertura se extiende desde 0° N (ecuador) hasta 58° N y de 15° W hasta 35° E, con una resolución espacial de 1.5 minutos de arco. Los datos del Climate SAF PVGIS son más representativos del clima de los últimos años.

SoDa difunde los datos tomados por las bases del HelioClim (HC), que contienen valores de radiación a nivel de tierra obtenidos del procesamiento de imágenes tomadas por el satélite Meteosat. En el presente trabajo se han utilizado los datos mensuales y anuales de la DNI del HC3 (HelioClim-3) que son desde enero de 2004 hasta diciembre de 2005, con 15 minutos de resolución temporal. El área que cubre es la del Meteosat (de -66 a 66° tanto en latitud como en longitud).

Para realizar la comparación entre los valores calculados de la DNI anual y los proporcionados por las bases de datos, se ha calculado el error (de dispersión) mediante la siguiente expresión:

$$\text{error (\%)} = \frac{H_{Ba}(S)_{\text{calculado}} - H_{Ba}(S)_{\text{medido}}}{H_{Ba}(S)_{\text{medido}}} 100 \quad (6.1)$$

donde  $H_{Ba}(S)_{calculado}$  es el valor de la DNI anual que se ha obtenido con el método propuesto, y  $H_{Ba}(S)_{medido}$  es el valor de la DNI anual suministrado por la correspondiente base de datos.

Los valores de la DNI anual proporcionados por las bases de datos se han obtenido en las siguientes direcciones web: NASA-SSE (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>), Climate – SAF PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>) y SoDa ([http://www.soda-is.com/eng/services/service\\_invoke/gui.php?xml\\_descript=hc3v3\\_invoke\\_hour\\_dni\\_demo.xml&Submit=HC3v3hourDNI](http://www.soda-is.com/eng/services/service_invoke/gui.php?xml_descript=hc3v3_invoke_hour_dni_demo.xml&Submit=HC3v3hourDNI)). Los resultados de la DNI anual calculada y los proporcionados por las tres bases de datos se muestran, para la red AEMET, en la Tabla 6.20; y para la red SIAR, en las Tablas 6.21 (Castilla y León) y en la Tabla 6.22 (el resto de Comunidades Autónomas). En dichas tablas se incluye, además, el error (en %).

Tabla 6.20. Comparación entre la DNI anual calculada con el método propuesto y la DNI anual proporcionada por las bases de datos NASA-SSE, Climate-SAF PVGIS y SoDa, para las estaciones de la red AEMET en la Península Ibérica ( $\text{kWh m}^{-2}$ )

Estación	Calculado	NASA-SSE		Climate – SAF PVGIS		SoDa	
	$H_{Ba}(S)$	$H_{Ba}(S)$	Error (%)	$H_{Ba}(S)$	Error (%)	$H_{Ba}(S)$	Error (%)
Badajoz	2048.1	2200.9	-6.9	2251.1	-9.0	1996.6	2.6
Bilbao	1024.9	1693.6	-39.5	1233.7	-16.9	1205.0	-15.0
Cáceres	2121.1	2135.3	-0.7	2171.8	-2.3	2189.5	-3.1
Ciudad Real	2041.6	2044.0	-0.1	2087.8	-2.2	2070.5	-1.4
La Coruña	1452.4	1408.9	3.1	1533.0	-5.3	1345.0	7.9
León	1927.6	1806.8	6.7	1927.2	0.02	1923.0	0.2
Logroño	1594.1	1615.3	-1.3	1580.5	0.9	1560.5	2.2
Madrid	2074.5	1981.9	4.7	2095.1	-1.0	2050.5	1.2
Murcia	2103.7	1916.3	9.8	2168.1	-3.0	2086.5	0.8
Oviedo	1113.4	1295.8	-14.1	1332.3	-16.4	1135.0	-1.9
Salamanca	1903.2	1941.8	-2.0	1919.9	-0.9	1960.5	-2.9
San Sebastián	1175.0	1646.2	-28.6	1281.2	-8.3	1287.0	-8.7
Santander	1269.3	1671.2	-24.1	1226.4	3.5	1285.0	-1.2
Soria	1862.0	1764.8	5.5	1861.5	0.03	2022.5	-7.9
Talavera reina	1976.0	2197.3	-10.1	2138.9	-7.6	2254.0	-12.3
Tortosa	1771.1	1978.3	-10.5	1912.6	-7.4	1667.0	6.2
Valladolid	1943.6	1840.5	5.6	1872.5	3.8	1936.5	0.4
Villanubla	1914.6	1845.1	3.8	1825.0	4.9	1875.5	2.1
Vitoria	1279.1	1651.4	-22.6	1427.2	-10.4	1398.5	-8.5

Las mayores discrepancias entre los valores calculados y los proporcionados por las bases de datos se dan en algunas ciudades del norte (Bilbao, San Sebastián, Vitoria), y especialmente con los valores de la NASA-SSE. Por ejemplo, en Vitoria, el error de NASA-SSE es del -22%, pero los errores del Climate-SAF PVGIS y SoDa son del -10% y -8% (respectivamente). Lo mismo sucede en San Sebastián. Especialmente llamativo es el caso de Bilbao, donde el error de la NASA-SSE es del -39%, aunque los errores del Climate-SAF PVGIS y SoDa son inferiores (-16 y -15%, respectivamente). La principal causa de estas discrepancias es que la DNI calculada para Bilbao es extremadamente baja. En otras ciudades del norte, como La Coruña, se obtiene un buen



acuerdo entre el valor calculado y el proporcionado por las tres bases de datos. Lo mismo sucede en Santander (excepto para la NASA-SSE). En Logroño y en las estaciones de Castilla y León (Valladolid, Villanubla, Salamanca, Soria, León), hay un buen acuerdo entre los valores calculados y los de las tres bases de datos. Idéntica situación se tiene en Cáceres, Ciudad Real, Madrid, Murcia o Badajoz. En Talavera de la Reina, sin embargo, las tres bases de datos dan un valor superior al calculado. En Tortosa, NASA-SSE y Climate-SAF PVGIS proporcionan un valor superior al calculado, mientras que SoDa suministra un valor inferior. De todo ello se puede concluir que los valores de la DNI anual obtenidos con el método propuesto son semejantes a los proporcionados por las tres bases de datos, excepto para algunas ciudades del norte de la península y otras localidades como Tortosa o Talavera de la Reina.

En la siguiente figura se puede observar el error de la DNI anual que se ha obtenido al comparar los valores calculados con los proporcionados por las tres bases de datos. Se han seleccionado para ello tres estaciones de la red AEMET: Madrid, Cáceres y Valladolid.

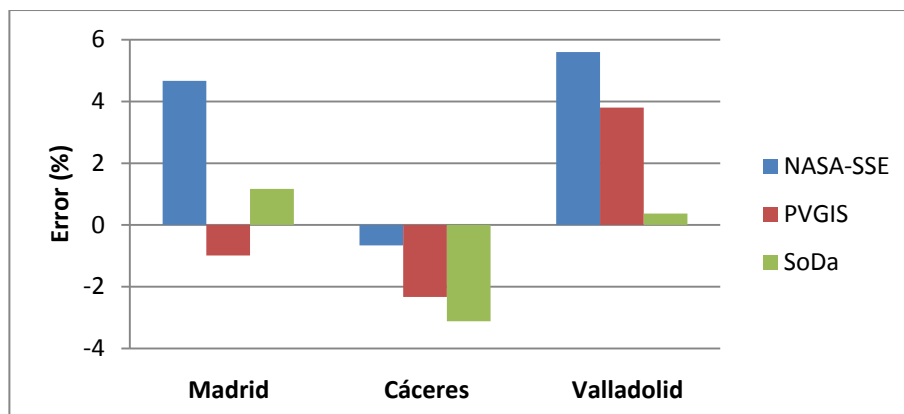


Figura 6.1. Error de la DNI anual para tres estaciones de la red AEMET.

A continuación se muestran los valores calculados de la DNI anual y los proporcionados por las tres bases de datos, para las estaciones de la red SIAR.

Tabla 6.21. Comparación entre la DNI anual calculada con el método propuesto y la DNI anual proporcionada por las bases de datos NASA-SSE, Climate-SAF PVGIS y SoDa, para las estaciones de la red SIAR en Castilla y León ( $\text{kWh m}^{-2}$ )

Estación	Calculado	NASA-SSE		Climate – SAF PVGIS		SoDa	
	$H_{Ba}(S)$	$H_{Ba}(S)$	Error (%)	$H_{Ba}(S)$	Error (%)	$H_{Ba}(S)$	Error (%)
<b>Barcial del Barco</b>	2231.3	1806.8	23.5	1930.9	15.6	1867.0	19.5
<b>Carracedelo</b>	1812.2	1726.5	5.0	1752.0	3.4	1674.5	8.2
<b>Ciudad Rodrigo</b>	2131.7	2038.9	4.6	2018.5	5.6	1980.0	7.7
<b>Condado Treviño</b>	1436.4	1565.9	-8.3	1372.4	4.7	1410.5	1.8
<b>Encinas Esgueva</b>	1737.2	1728.1	0.5	1803.1	-3.7	1891.5	-8.2
<b>Gomezerracín</b>	1946.8	1857.1	4.8	1843.3	5.6	1901.5	2.4
<b>Herrera Pisuegra</b>	1876.1	1715.5	9.4	1792.2	4.7	1800.5	4.2
<b>Hinojosa del Campo</b>	2099.4	1905.3	10.2	1795.8	16.9	1973.0	6.4
<b>Lerma</b>	1996.6	1693.6	17.9	1784.9	11.9	1818.5	9.8
<b>Nava de Arévalo</b>	2198.8	1872.5	17.4	1799.5	22.2	1914.0	14.9

<b>Olmedo</b>	2123.5	1865.7	13.8	1868.8	13.6	1886.5	12.6
<b>Sahagún</b>	2005.3	1781.2	12.6	1890.7	6.1	1854.0	8.2
<b>Santa Gadea del Cid</b>	1504.5	1606.4	-6.3	1438.1	4.6	1441.0	4.4
<b>Santas Martas</b>	2170.9	1800.4	20.6	1949.1	11.4	1878.0	15.6
<b>Tordesillas</b>	2121.2	1872.5	13.3	1916.3	10.7	1892.5	12.1
<b>Torquemada</b>	1997.3	1781.2	12.1	1854.2	7.7	1839.5	8.6
<b>Zamadueñas</b>	1925.3	1845.1	4.4	1890.7	1.8	1913.0	0.6

En la Tabla 6.21 se observa que en la mayoría de las estaciones los errores que se obtienen son positivos, lo cual indica que los valores calculados de la DNI anual son superiores a los proporcionados por las bases de datos. En Castilla y León se observan discrepancias entre los valores calculados y los proporcionados por las tres bases de datos en las siguientes estaciones: Barcial del Barco, Hinojosa del Campo, Lerma, Nava de Arévalo, Olmedo, Santas Martas y Tordesillas. Ello es debido a que los valores calculados de la DNI son demasiado altos en comparación con los valores de las tres bases de datos. Por el contrario, se observa un buen acuerdo en las siguientes estaciones: Carracedelo, Ciudad Rodrigo, Condado de Treviño, Encinas de Esgueva, Gomezserracín, Herrera de Pisuerga, Santa Gadea del Cid y Zamadueñas. En estaciones como Sahagún y Torquemada, NASA-SSE da un valor muy diferente al calculado, mientras que Climate-SAF PVGIS y SoDa dan valores más próximos. Se puede concluir que los valores calculados y los de las bases de datos son semejantes, excepto para aquellas estaciones en las que los valores calculados son demasiado elevados.

Tabla 6.22. Comparación entre la DNI anual calculada con el método propuesto y la DNI anual proporcionada por las bases de datos NASA-SSE, Climate-SAF PVGIS y SoDa, para las estaciones de la red SIAR en Andalucía, Aragón, Baleares, Castilla-la Mancha, Comunidad Valenciana, Galicia y Navarra ( $\text{kWh m}^{-2}$ )

<b>Estación</b>	<b>Calculado</b>	<b>NASA-SSE</b>		<b>Climate – SAF PVGIS</b>		<b>SoDa</b>	
	$H_{Ba}(S)$	$H_{Ba}(S)$	Error (%)	$H_{Ba}(S)$	Error (%)	$H_{Ba}(S)$	Error (%)
<b>Adiós</b>	1777.9	1762.0	0.9	1722.8	3.2	1604.0	10.8
<b>Albacete</b>	2241.8	2014.5	11.3	1971.5	13.7	1970.5	13.8
<b>Almansa</b>	2235.5	2022.1	10.6	2007.5	11.4	1939.5	15.3
<b>Almería</b>	2439.2	2374.1	2.7	2387.1	2.2	2306.5	5.8
<b>Altea</b>	2067.2	2004.1	3.2	2131.6	-3.0	1934.5	6.9
<b>Bargota</b>	1751.5	1637.0	7.0	1606.0	9.1	1605.0	9.1
<b>Baza</b>	2392.0	2076.9	15.2	2190.0	9.2	2334.5	2.5
<b>Campo Arcís</b>	2081.1	1967.4	5.8	1992.9	4.4	1860.5	11.9
<b>Cañete</b>	2160.6	1960.1	10.2	1887.1	14.5	2129.0	1.5
<b>Castro de Rei</b>	1261.2	1354.2	-6.9	1346.9	-6.4	1297.0	-2.8
<b>Castelló-Benadresa</b>	1904.6	1905.3	-0.04	1927.2	-1.2	1661.5	14.6
<b>Córdoba</b>	2270.5	2215.6	2.5	2219.2	2.3	2237.5	1.5
<b>Ejea de los Caballeros</b>	2101.5	1814.1	15.9	1912.6	9.9	1830.0	14.8
<b>Es Mercadal</b>	1605.7	2237.5	-28.2	1985.6	-19.1	1621.0	-0.9
<b>Fitero</b>	1824.6	1788.0	2.1	1777.6	2.7	1714.0	6.5
<b>Fraga</b>	1916.2	1899.8	0.9	2011.2	-4.7	1800.5	6.4

<b>Huesca</b>	2180.3	1814.1	20.2	2062.3	5.7	1853.0	17.7
<b>Inca</b>	2005.0	2119.3	-5.4	1912.6	4.8	1589.5	26.1
<b>Jadraque</b>	2153.7	1907.2	12.9	1894.4	13.7	1999.0	7.7
<b>Jaén</b>	2350.2	2219.2	5.9	2186.5	7.5	2289.0	2.7
<b>Jerez de la Frontera</b>	2305.4	2281.3	1.1	2372.5	-2.8	2390.0	-3.5
<b>Málaga</b>	2328.8	2177.8	6.9	2325.1	0.2	2264.0	2.9
<b>Moguer</b>	2401.6	2277.8	5.4	2419.9	-0.8	2446.5	-1.8
<b>Monforte de Lemos</b>	1350.4	1522.9	-11.3	1609.7	-16.1	1495.5	-9.7
<b>Osuna</b>	2423.6	2232.5	8.6	2200.9	10.1	2309.5	4.9
<b>Santa Eulalia</b>	1855.6	2398.1	-22.6	2025.8	-8.4	1874.0	-1.0
<b>Teruel</b>	1970.5	1912.6	3.0	1856.2	6.2	1977.0	-0.3
<b>Villena</b>	2136.8	2080.5	2.7	2050.2	4.2	1945.5	9.8
<b>Játiva</b>	1999.6	2022.1	1.1	1978.3	1.1	1772.0	12.8

Al igual que en la Tabla 6.21, se observa que en la mayor parte de las estaciones los errores son positivos, lo cual indica que los valores calculados de la DNI anual son superiores a los de las bases de datos. Las diferencias más elevadas entre la DNI anual calculada y la de las bases de datos se dan en Albacete y Almansa, donde los valores calculados son superiores a  $2200 \text{ kWh m}^{-2}$  y los de las tres bases de datos son del orden de  $2000 \text{ kWh m}^{-2}$  o inferiores. También hay discrepancias en Ejea de los Caballeros, donde la DNI anual calculada es  $2101 \text{ kWh m}^{-2}$  y las bases de datos dan valores entre  $1814$  y  $1912 \text{ kWh m}^{-2}$ . En Monforte de Lemos sucede lo mismo, el valor calculado de la DNI anual es  $1350 \text{ kWh m}^{-2}$ , mientras que las bases de datos dan valores superiores. Por el contrario, se observa un buen acuerdo entre los valores calculados y los de las bases de datos en las estaciones de Navarra (Adiós, Bargota y Fitero), en las siguientes estaciones de Aragón (Fraga y Teruel), en estaciones de la Comunidad Valenciana como Altea y Villena, y en la mayoría de las estaciones de Andalucía (Almería, Córdoba, Jaén, Jerez de la Frontera, Málaga, Moguer y Osuna). En otras estaciones, lo que sucede es que algunas bases de datos dan valores próximos al calculado y otras no. Tal es el caso de Baza, donde NASA-SSE da un valor inferior al calculado, mientras que Climate-SAF PVGIS y SoDa dan valores más próximos. Lo mismo sucede en Játiva y Campo Arcís, donde NASA-SSE y Climate-SAF PVGIS dan un valor muy parecido al calculado y, sin embargo, SoDa da un valor inferior. En las estaciones de las Islas Baleares, también se observa una gran diferencia entre la DNI anual calculada y la de las bases de datos. Por ejemplo, en Santa Eulalia, NASA-SSE da un valor muy superior al calculado, mientras que Climate-SAF PVGIS y SoDa dan valores más próximos. En Inca, NASA-SSE y Climate-SAF PVGIS dan valores semejantes al calculado, pero SoDa da un valor muy inferior. Por último, en Es Mercadal, NASA-SSE y Climate-SAF PVGIS dan valores muy superiores al calculado, mientras que SoDa da un valor muy parecido.

En la siguiente figura se observa el error que se ha obtenido al comparar los valores de la DNI calculados y los proporcionados por las tres bases de datos. Se han seleccionado tres estaciones de la red SIAR: Zamadueñas, Córdoba y Teruel.

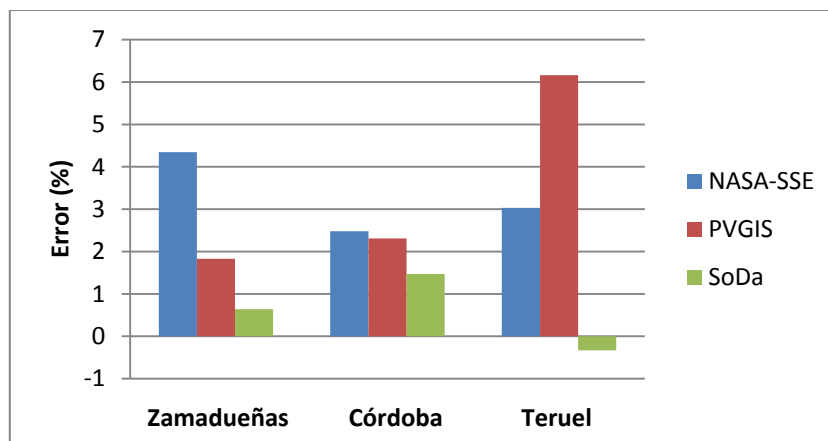


Figura 6.2. Error de la DNI anual para tres estaciones de la red SIAR.

#### 6.4. Comparación de los valores calculados con valores medidos.

En este apartado se comparan los valores de la irradiación directa normal anual obtenidos tras aplicar el modelo con valores medidos de la misma. Dicha comparación se ha realizado para las estaciones de la red AEMET que se indican en la Tabla 6.23 y para la estación de Villalba de los Alcores. El error se calcula con la expresión 6.1. Los resultados se muestran en la Tabla 6.23. También se han calculado los estimadores estadísticos RMSE y el MBE, con las expresiones 5.17 y 5.18, y los resultados han sido 10.72 y 9.13 kWh m<sup>-2</sup> (respectivamente).

Tabla 6.23. Comparación entre valores calculados y medidos de la DNI anual en las estaciones de la red AEMET en la península Ibérica y en la estación de Villalba de los Alcores.

Estación	$H_{Ba}(S)_{calculado}$ (kWh m <sup>-2</sup> )	$H_{Ba}(S)_{medido}$ (kWh m <sup>-2</sup> )	Error (%)
<b>Badajoz</b>	2048.1	1993.5	2.7
<b>Cáceres</b>	2121.1	2062.0	2.9
<b>León</b>	1927.6	1712.0	12.6
<b>Madrid</b>	2074.5	1917.3	8.2
<b>Oviedo</b>	1113.4	1060.0	5.0
<b>Salamanca</b>	1903.2	1636.3	16.3
<b>Santander</b>	1269.3	1113.0	14.0
<b>Soria</b>	1862.0	1666.0	11.8
<b>Valladolid</b>	1943.6	1742.0	11.6
<b>Villalba de los Alcores</b>	2251.0	1720.6	30.8

Obsérvese que los valores medidos de la DNI anual son inferiores a los calculados (para todas las estaciones de la Tabla). Se tiene un buen acuerdo entre los valores calculados y medidos en Cáceres y Badajoz (con errores inferiores al 3 %) y en Oviedo (con un error del 5 %). Sin embargo, el acuerdo no es tan bueno en las estaciones de Castilla y León, con errores mayores del 10 %, ni en Santander (donde el error es del 14 %). En Madrid, la situación es intermedia (el error es del 8 %). Estos resultados están de acuerdo con la cantidad de horas de sol que se reciben en una determinada estación (ver los valores de insolación en las tablas 6.14, 6.15 y 6.16): la DNI medida es mayor en aquellas estaciones con más horas de sol (y menor en caso contrario).

En la figura 6.3 se muestra la curva de dispersión de los valores calculados y medidos de la DNI anual para las estaciones indicadas en la Tabla 6.23 (excepto la de Villalba de los Alcores). La línea continua corresponde a la ecuación de ajuste de dichos valores, N es el número de pares de datos y R es el coeficiente de correlación.

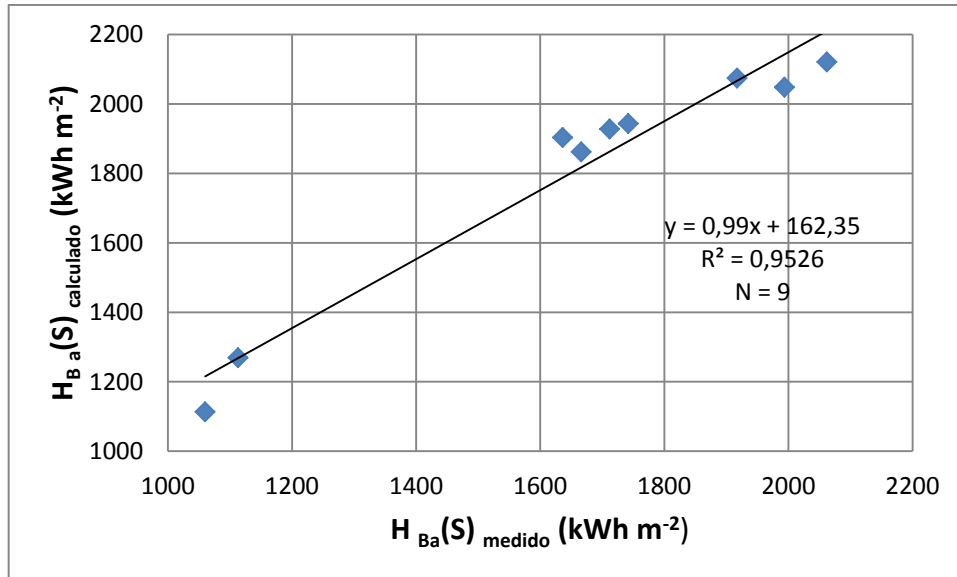


Figura 6.3. Valores calculados de la DNI anual en función de los valores medidos (kWh m<sup>-2</sup>)

En la figura 6.3 se observa un buen acuerdo entre los valores calculados y medidos de la DNI anual, ya que el coeficiente de correlación es:  $R = 0.98$

### 6.5. Mapas de irradiación directa normal anual.

En este apartado se muestran los mapas de isolíneas de la DNI anual calculada con el método propuesto, en las estaciones de la red AEMET y SIAR, y también para los valores de la DNI medidos. Dichos mapas se han realizado mediante la aplicación informática Surfer. Para obtener estos mapas primero hay que introducir los valores obtenidos de la DNI anual en cada una de las estaciones, junto con su ubicación geográfica (latitud y longitud). A continuación, se realiza el gráfico de las isolíneas, con el intervalo geográfico adecuado para cubrir la península Ibérica (latitud de 35 a 44° y longitud de -10 a 4°). Dicho mapa hay que superponerlo a un mapa mudo de España, con el mismo intervalo geográfico. Una vez hecho esto, se selecciona el color y se incluye la barra de significación de colores. Los resultados se muestran en la figura 6.4 (para la red AEMET), en la figura 6.5 (para la red SIAR), y en la figura 6.6 (para los valores medidos).

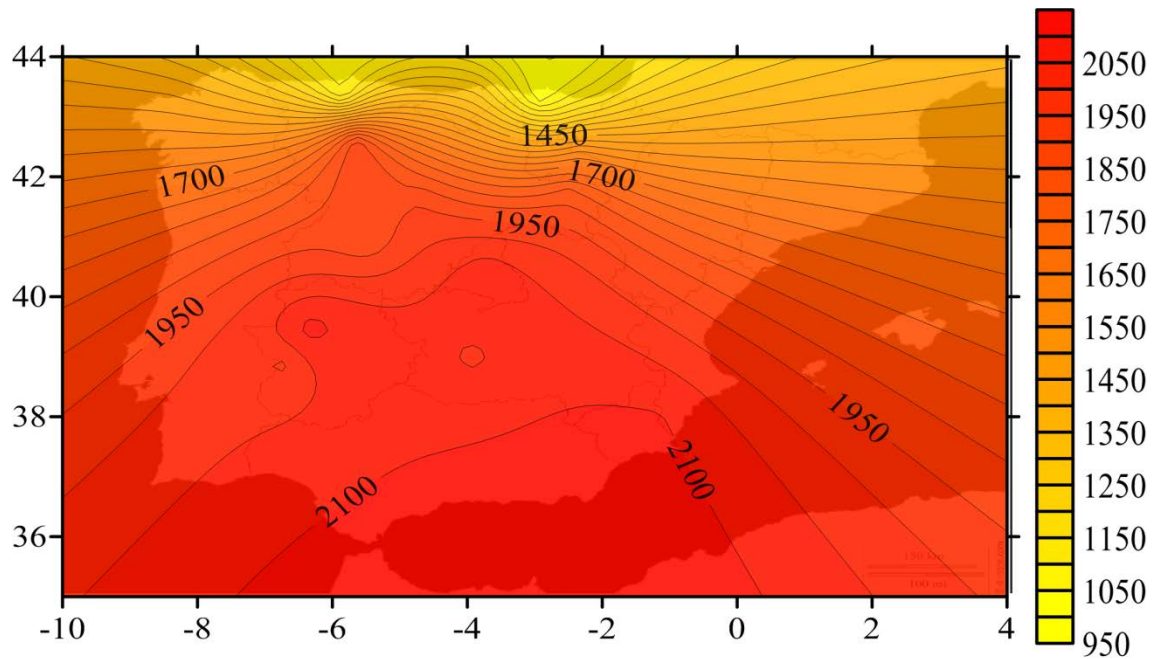


Figura 6.4. Mapa de la DNI anual (en  $\text{kWh m}^{-2}$ ) calculada con el método propuesto, para las estaciones de la red AEMET. En los ejes de abscisas y ordenadas se representan la longitud y la latitud (respectivamente), en grados.

En la figura 6.4 se muestran las isolíneas de la DNI anual para las estaciones de la red AEMET. El incremento entre isolíneas es de  $50 \text{ kWh m}^{-2}$ . La separación entre isolíneas es más elevada en el sur de la península que en el norte. Los valores máximos (más de  $2000 \text{ kWh m}^{-2}$ ) se alcanzan en el sur de la península (Extremadura, Andalucía, Murcia, Castilla-la Mancha). Los valores más bajos ( $1000 - 1100 \text{ kWh m}^{-2}$ ) corresponden a algunas zonas del norte de la península (Bilbao, Oviedo). En Castilla y León hay una gran diferencia en energía entre el norte de la Comunidad ( $1500 \text{ kWh m}^{-2}$ ) y el sur ( $1950 - 2000 \text{ kWh m}^{-2}$ ). En el centro de la península (Madrid) el valor es de  $2050 \text{ kWh m}^{-2}$ . Se observan pequeñas isolíneas cerradas en Cáceres ( $2100 \text{ kWh m}^{-2}$ ), Badajoz ( $2050 \text{ kWh m}^{-2}$ ) y Ciudad Real ( $2050 \text{ kWh m}^{-2}$ ). En dicha figura existe un gradiente de (aproximadamente)  $1050 \text{ kWh m}^{-2}$  entre el norte y el sur de la península. También se observa un gradiente de  $1000 \text{ kWh m}^{-2}$  entre el norte y el centro de la península (Madrid), y un gradiente de  $50 \text{ kWh m}^{-2}$  entre el centro y el sur. La isolínea más frecuente es la de  $1950 \text{ kWh m}^{-2}$ .

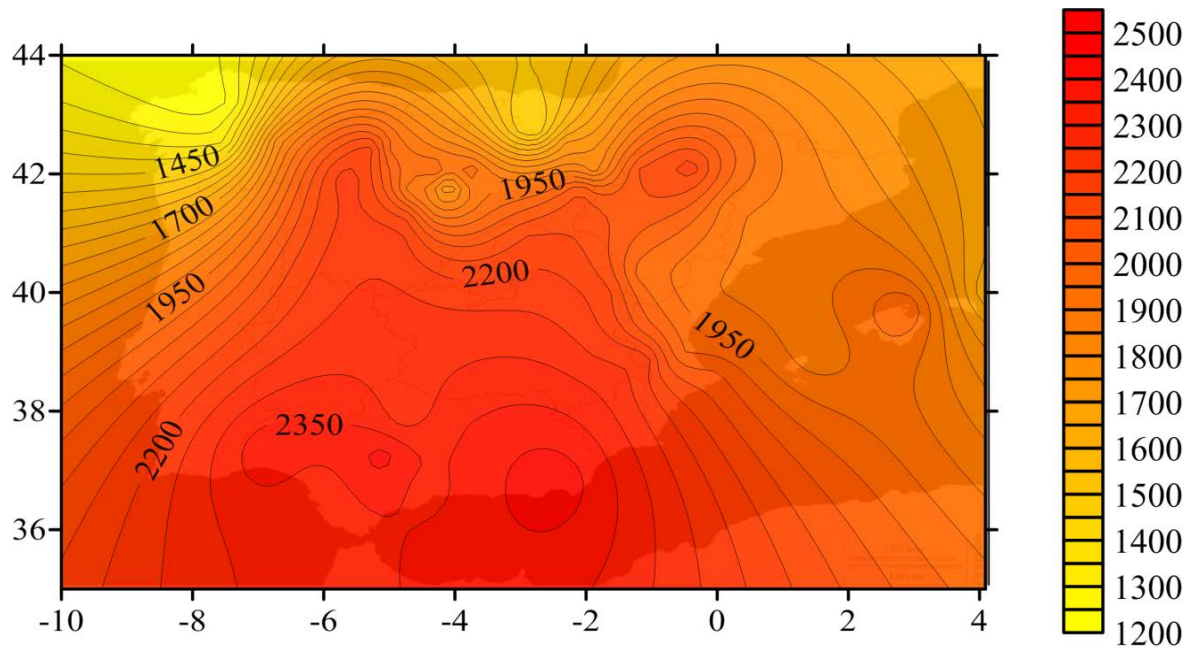


Figura 6.5. Mapa de la DNI anual (en  $\text{kWh m}^{-2}$ ) calculada con el método propuesto, para las estaciones de la red SIAR. En los ejes de abscisas y ordenadas se representan la longitud y la latitud (respectivamente), en grados.

En la figura 6.5 se muestran las isótopas de la DNI anual para las estaciones de la red SIAR. Se observa que las isótopas están más juntas en el norte de la península que en el sur. El incremento entre isótopas es de  $50 \text{ kWh m}^{-2}$ . Los valores máximos ( $2350 - 2450 \text{ kWh m}^{-2}$ ) se alcanzan en algunas provincias de Andalucía (Sevilla, Huelva, Almería); mientras que los valores más bajos ( $1250 \text{ kWh m}^{-2}$ ) son los de La Coruña. Otros valores bajos ( $1400 \text{ kWh m}^{-2}$ ) se dan en Galicia y en el País Vasco. Al igual que en la figura 6.4, en Castilla y León se observa una gran diferencia entre el norte y el sur. En Aragón se tienen valores altos ( $2000 - 2100 \text{ kWh m}^{-2}$ ), especialmente en zonas de Zaragoza y Huesca. En Baleares se observan valores distintos en cada una de las tres islas:  $1700 \text{ kWh m}^{-2}$  en Menorca,  $2000 \text{ kWh m}^{-2}$  en Mallorca y  $1900 \text{ kWh m}^{-2}$  en Ibiza. Se observan una serie de isótopas cerradas en Aragón, en concreto en la zona de Huesca y Zaragoza ( $2100-2150 \text{ kWh m}^{-2}$ ). Lo mismo ocurre en algunas zonas de Andalucía, como Almería (donde hay una isótopa de  $2450 \text{ kWh m}^{-2}$ ) y Osuna (donde hay una pequeña isótopa de  $2400 \text{ kWh m}^{-2}$ ). También se tiene una gran isótopa cerrada (de  $2350 \text{ kWh m}^{-2}$ ) que engloba a las provincias de Huelva, Sevilla y parte de Málaga. Otros lugares donde se observan isótopas cerradas son la isla de Mallorca y zonas de Castilla y León, como el sur de la provincia de Burgos. Se ha observado que en general existe un gradiente de  $1200 \text{ kWh m}^{-2}$  entre el norte y el sur de la península Ibérica. También se observa un gradiente de  $950 \text{ kWh m}^{-2}$  entre el norte y el centro de la península (Madrid), y un gradiente de  $250 \text{ kWh m}^{-2}$  entre el centro y el sur. Las isótopas más frecuentes son las de  $1950$  y  $2200 \text{ kWh m}^{-2}$ .

Así mismo se ha construido el mapa de isótopas con los valores medidos de la DNI anual, cuyos resultados se muestran en la figura 6.6.



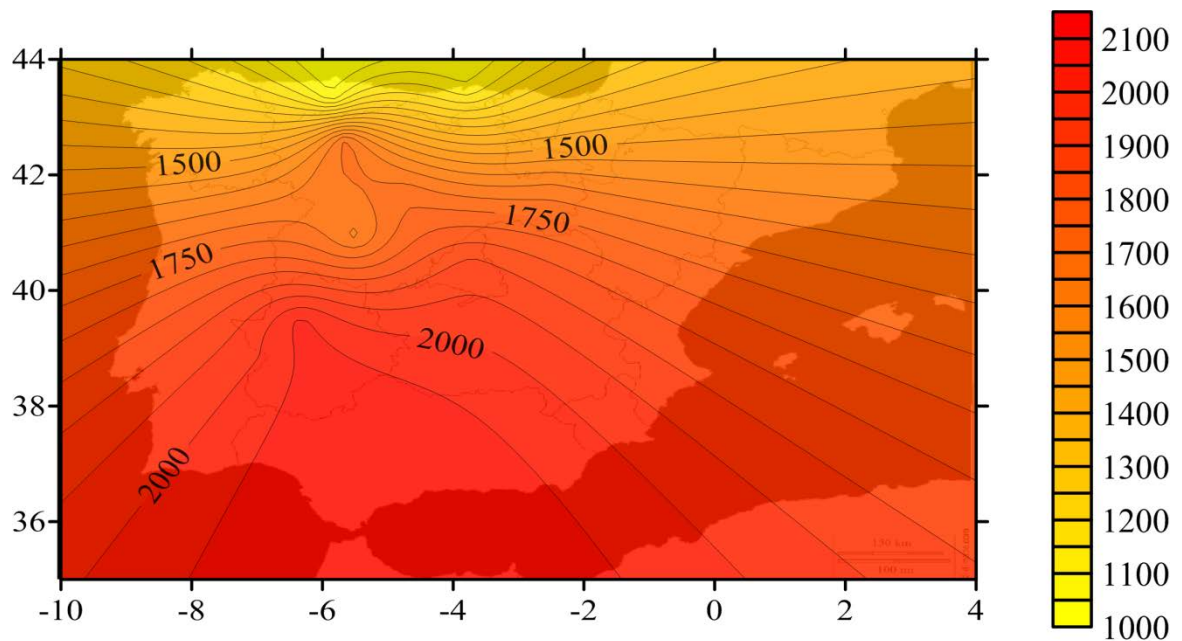


Figura 6.6. Mapa de la DNI anual (en  $\text{kWh m}^{-2}$ ) para los valores medidos. En los ejes de abscisas y ordenadas se representan la longitud y la latitud (respectivamente), en grados.

En la figura 6.6 se observa que los valores más bajos de la DNI son los del norte de la península y los más altos los del sur. El incremento entre isolíneas es de  $50 \text{ kWh m}^{-2}$ . Se observa un gradiente de  $1050 \text{ kWh m}^{-2}$  entre el norte de la península y el sur. Este valor coincide con el obtenido en la figura 6.4 (red AEMET), y es menor que el obtenido en la figura 6.5 (red SIAR), que es  $1250 \text{ kWh m}^{-2}$ . También se observa un gradiente de  $850 \text{ kWh m}^{-2}$  entre el norte y el centro de la península, y un gradiente de  $150 \text{ kWh m}^{-2}$  entre el centro y el sur. Las isolíneas más frecuentes son las de  $1750$  y  $1500 \text{ kWh m}^{-2}$ .

En la figura 6.7 se puede observar un mapa de la DNI anual en Europa, realizado por Sári, *et al.* (2009) promediando los valores de la DNI anual proporcionados por cinco bases de datos: Meteonorm, PVGIS, NASA-SSE, Satel-Light y SOLEMI (SOLar Energy Mining).

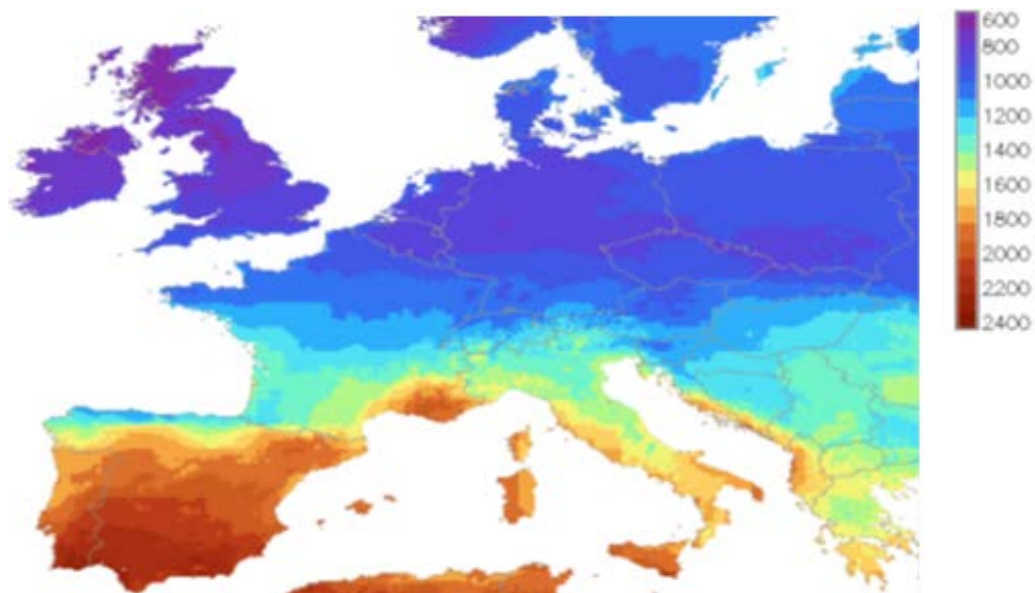


Figura 6.7. Mapa de la DNI anual en Europa ( $\text{kWh m}^{-2}$ )



En la figura 6.7 se observa que en España los valores de la DNI anual coinciden con los de las figuras 6.4, 6.5 y 6.6: en el norte la DNI anual está comprendida entre 1200 y 1400 kWh m<sup>-2</sup>, en el centro (Madrid) el valor es 2000 kWh m<sup>-2</sup> y en el sur la DNI anual llega hasta 2200 kWh m<sup>-2</sup> (o incluso valores superiores en algunas zonas de Andalucía). Esto confirma que los mapas de isolíneas de la DNI anual mostrados en las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 son semejantes a los obtenidos por otros autores.

## 7. Conclusiones.

En este capítulo se resumen los resultados obtenidos en el presente trabajo y se enumeran las conclusiones.

Se ha propuesto un método para calcular la DNI a partir de medidas de la irradiación global diaria media mensual sobre superficie horizontal. Esto se ha hecho así debido a que existen más datos registrados de radiación global horizontal que de radiación directa normal. El objetivo ha sido poder proporcionar valores de la DNI en España, usando como parámetros de entrada la latitud y los valores medidos de la irradiación global sobre superficie horizontal. Además, se ha indicado que el conocimiento de la DNI es importante en el diseño y análisis de los sistemas de concentradores fotovoltaicos (CPV).

Para obtener valores de la DNI, se han seleccionado numerosas estaciones de medida en la península, pertenecientes a las redes SIAR y AEMET. Se ha dado una descripción de los equipos de medida instalados en dichas estaciones, y se han mostrado las fechas de inicio y final de la toma de datos. De dichas estaciones se han tomado valores de la irradiación global diaria media mensual sobre superficie horizontal, observando que el mes con mayor irradiación es julio (en la mayoría de las estaciones) y el mes con menor irradiación es diciembre.

Se han logrado calcular valores de la DNI en la península, aplicando el método propuesto. Hay una gran variación entre la DNI anual del norte de la península (valores del orden de 1200-1400 kWh m<sup>-2</sup>, y en algunos casos inferiores) y la del sur (valores entre 2200 y 2400 kWh m<sup>-2</sup>). En la meseta norte de la península (Castilla y León) el valor de la DNI está en torno a 1900 kWh m<sup>-2</sup>, en Madrid es del orden de 2050 kWh m<sup>-2</sup>, y en Comunidades como Castilla-la Mancha o Extremadura la DNI anual está dentro del intervalo 2050-2200 kWh m<sup>-2</sup>. En Baleares se obtienen valores diferentes en cada una de sus tres islas. En Navarra el valor de la DNI está entre 1750 y 1800 kWh m<sup>-2</sup>, en Aragón la DNI anual en Huesca y algunas zonas de Zaragoza (del orden de 2100 kWh m<sup>-2</sup>) es superior a la de Teruel (1970 kWh m<sup>-2</sup>), y en la Comunidad Valenciana la DNI está comprendida entre 2000 y 2150 kWh m<sup>-2</sup>.

De lo expuesto en el párrafo anterior, se puede concluir que las Comunidades Autónomas del sur de España (Andalucía, Extremadura o Castilla-la Mancha) son las que más irradiación reciben a lo largo del año, y son, por tanto, las más adecuadas para la instalación de dispositivos fotovoltaicos basados en el uso de concentradores.

Se ha mostrado la precisión del método propuesto comparando los valores calculados con el mismo y los valores proporcionados por tres bases de datos: NASA-SSE, Climate-SAF PVGIS y SoDa. Se ha visto que estas bases de datos dan valores diferentes a los calculados, en especial la NASA-SSE. En general, las mayores diferencias entre los valores calculados y los de las bases de datos se dan en las ciudades del norte de la península, en las Islas Baleares y en algunas estaciones de la red SIAR en Castilla y León. Por el contrario, los valores calculados y los de las bases de datos son semejantes en muchas localidades del centro y sur peninsular. Así mismo, también se han comparado valores de la DNI calculados y medidos, observando que los valores medidos son siempre inferiores a los calculados.

Por último, se han obtenido mapas de isóneas de la DNI anual en la península, tanto para las estaciones de la red SIAR como para las de AEMET. Se ha visto que existe una gran diferencia entre el norte y el sur de la península, ya que en el norte la DNI anual está comprendida entre 1000 y 1300 kWh m<sup>-2</sup> y en el sur se alcanzan hasta 2350 kWh m<sup>-2</sup> (o incluso valores superiores en algunas estaciones).

Del estudio realizado en el presente trabajo se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El mes con mayor irradiación solar global es julio en la mayor parte de las estaciones del centro y sur peninsular. Sin embargo, en las ciudades del Mar Cantábrico, en las Islas Baleares, en Canarias y en algunas localidades del Mar Mediterráneo, el mes con mayor irradiación solar global es junio.
- El mes con menor irradiación global es siempre diciembre (tanto para el norte, el centro y sur peninsular como para las Islas Baleares y Canarias).
- Los valores máximos de la DNI anual se encuentran en el intervalo 2200-2400 kWh m<sup>-2</sup> y se alcanzan en el sur de la península Ibérica (Andalucía). En Extremadura, Castilla-la Mancha, Murcia o Madrid se han observado valores superiores a 2000 kWh m<sup>-2</sup>.
- Los valores menores de la DNI anual se encuentran en el intervalo 1000-1300 kWh m<sup>-2</sup> y corresponden al norte de la península: Asturias, Cantabria, País Vasco y Galicia.
- Castilla y León es la Comunidad Autónoma con mayor variabilidad de la DNI anual: en el norte, en las zonas de la Cordillera Cantábrica, el valor está en torno a 1500 kWh m<sup>-2</sup>; en ciudades como Salamanca, Valladolid o León el valor es próximo a 1900 kWh m<sup>-2</sup>, y en algunas estaciones de las provincias de Salamanca o Ávila se alcanzan valores superiores a 2000 kWh m<sup>-2</sup>.
- Los valores calculados de la DNI anual son, en general, superiores a los proporcionados por las tres bases de datos consultadas: NASA-SSE, Climate-SAF PVGIS y SoDa.
- Se ha observado que los valores medidos de la DNI anual son siempre inferiores a los calculados con el método propuesto.
- En los mapas de isóneas de la DNI se observan gradientes del orden de 1050 kWh m<sup>-2</sup> (o superiores) entre el norte y el sur de la península Ibérica. Se observa que la separación entre las isóneas es menor en las zonas del norte que en el sur de la península.

## Referencias

- Allen, C.W. "Solar radiation". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **84**, 307–318, 1954
- Antón, M. "Modelos empíricos para la estimación de la irradiancia solar ultravioleta". Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura (2007).
- Beckman, W.A., Bugler, J.W., Cooper, P.I., Duffie, J.A., Dunkle, R.V., Glaser, P.E., *et al.* "Units and symbols in solar energy". *Solar Energy* **21**, 65–68, 1978
- Collares-Pereira, M., Rabl A. "The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values". *Solar Energy* **22**, 155–164, 1979
- Cooper, P.I. "The absorption of solar radiation in solar stills". *Solar Energy* **12**, 333–346, 1969
- De Miguel, A., Bilbao, J., Salsón, S., Lage, A. "Solar radiation and sunshine hour maps in Castilla and León region". *Renewable Energy* **8**, 933-940, 1994
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. "Solar engineering of thermal processes". New York, Wiley; 2006.
- Ineichen, P., Perez, R., Kmiecik, M., Renne, D. "Modeling direct irradiance from GOES visible channel using generalized cloud indices". *Proceedings of AMS annual meeting, Long Beach, CA*, 133–136, 2000
- Iqbal, M. "A study of Canadian diffuse and total solar radiation data". *Solar Energy* **22**, 81–90, 1979
- Iqbal, M. "An introduction to solar radiation". Toronto, Academic Press; 1983.
- Janjai, S. "A method for estimating direct normal solar irradiation from satellite data for a tropical environment". *Solar Energy* **84**, 1685–1695, 2010
- Kambezidis, H., Psiloglou, B., Kavadias, K., Paliatsos, A., Bartzokas, A. "Development of a Greek solar map based on solar model estimations". *Seventh Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere"* Sunny Beach, Bulgaria, 1-5 June 2015
- Klein, S.A. "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces". *Solar Energy* **19**, 325–329, 1977
- Kleissl, J. "Solar energy forecasting and resource assessment". Academic Press, 2013.
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C. "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation". *Solar Energy* **4**, 1–19, 1960
- Lorenzo, E., Araujo, G., Cuevas, A., Egido, M., Miñano, J., Zilles, R. "Solar electricity, Engineering of photovoltaic systems". Earthscan Publications Ltd (1994).

- Louche, A., Notton, G., Poggi, P., Simonnot, G. "Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site". *Solar Energy* **46**, 261–266, 1991
- Martins, F.R., Pereira, E.B., Abreu, S.L. "Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project". *Solar Energy* **81**, 517–528, 2007
- Page, J.K. "The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N–40°S". *Proceedings of U. N. Conf. New Sources of Energy, Rome, Italy*, 378–390, 1961
- Pérez-Burgos, A., Bilbao, J., de Miguel, A., Román, R. "Analysis of solar direct irradiance in Spain". *Energy procedia* **57**, 1070-1076, 2014
- Pérez-Burgos, A., Román, R., Bilbao, J., de Miguel, A., Oteiza, P. "Reconstruction of long-term direct solar irradiance data series using a model based on the Cloud modification factor". *Renewable energy* **77**, 115-124, 2015
- Peréz-Higueras, P.J., Muñoz, E., Almonacid, G., Vidal, P.G. "High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: present status and forecast". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15**, 1810-1815, 2011
- Pérez-Higueras, P.J., Rodrigo, P., Fernández, E.F., Almonacid, F., Hontoria, L. "A simplified method for estimating direct normal solar irradiation from global horizontal irradiation useful for CPV applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**, 5529-5534, 2012
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmieciak, M., Chain, C., George, R., *et al.* "A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation". *Solar Energy* **73**, 307–317, 2002
- Polo, J., Bernardos, A., Navarro, A.A., Fernández-Peruchena, C.M., Ramírez, L., Guisado, M., Martínez, S. "Solar resources and power potential mapping in Vietnam using satellite-derived and GIS-based information". *Energy Conversion and Management* **98**, 348–358, 2015
- Román, R. "Reconstrucción y análisis de la radiación ultravioleta eritemática en la Península Ibérica desde 1950". PhD, Universidad de Valladolid, 2014.
- Sala, G., Pachón, D., Antón, I. "Test, rating and specification of PV concentrator components and systems". C-rating project, book 1: classification of PV concentrators, contract NNE-1999-00588 (2003)
- Salvador, P. "Radiación solar ultravioleta B: Medida y modelización. Variabilidad de la columna de ozono". PhD Tesis. Universidad de Valladolid (2007).
- Selçuk, M.K. "Glossary of terms used in solar energy". *Solar Energy* **33**, 97–114, 1984
- Schillings, C., Mannstein, H., Meyer, R. "Operational method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data". *Solar Energy* **76**, 475–484, 2004

Súri, M., Remund, J., Cebecauer, T., Hoyer-Klick, C., Dumortier, D., Huld, T., Ineichen, P., Stackhouse, P. "Comparison of direct normal irradiation spatial products for Europe". Solar paces conference, Berlin, Germany, 2009.

Vignola, F, Michalsky, J, Stoffel, T. "Solar and infrared radiation measurements". CRC press, 2012.

Walraven, R. "Calculating the position of the sun". Solar Energy **20**, 393–397, 1978

Whillier, A. "The determination of hourly values of total solar radiation from daily summations". Archiv fur Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie Serie B 7, 197–204, 1956

## **Direcciones web consultadas**

<http://eportal.magrama.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1>

<http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/sistema-informacion-agroclimatica-regadio/Red-Estaciones-Agroclimaticas.aspx>

<http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion Solar.pdf>

[http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas\\_radiacion\\_solar/atlas\\_de\\_radiacion\\_24042012.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf)

<http://www.kippzonen.es/Product/211/CMP-21-Piranometro>

<http://www.kippzonen.es/Product/210/CMP-11-Piranometro>

[http://www.lufft.com/dateianzeige.php?Dateiname=download\\_manual\\_CMP\\_serie\\_s.pdf](http://www.lufft.com/dateianzeige.php?Dateiname=download_manual_CMP_serie_s.pdf)

<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

[http://www.soda-is.com/eng/services/service\\_invoke/gui.php?xml\\_descript=hc3v3\\_invoke\\_hourdni\\_demo.xml&Submit=HC3v3hourDNI](http://www.soda-is.com/eng/services/service_invoke/gui.php?xml_descript=hc3v3_invoke_hourdni_demo.xml&Submit=HC3v3hourDNI)

## Anexo 1: Nomenclatura

$A_z$ : acimut del sol (radianes).

$B_0$ : constante solar ( $W m^{-2}$ )

$d_n$ : día juliano (adimensional).

$\delta_{dn}$ : declinación solar correspondiente a los días 15 de cada mes (radianes).

$\epsilon_{0dm}$ : excentricidad de la órbita de la Tierra los días 15 de cada mes (adimensional).

$\varphi$ : latitud ( $^\circ$ ) ó (radianes).

$\lambda$ : longitud ( $^\circ$ )

$\theta_z$ : ángulo cenital solar (radianes).

$\omega$ : ángulo horario solar (radianes).

$\omega_{sdm}$ : ángulo horario de la salida del sol los días 15 de cada mes (radianes).

$H_{Gdm}(0)$ : irradiación global diaria media mensual sobre superficie horizontal ( $Wh m^{-2}$ ) ó ( $MJ m^{-2}$ )

$H_{BOdm}(0)$ : irradiación extraterrestre diaria media mensual sobre superficie horizontal ( $Wh m^{-2}$ )

$H_{Bdm}(0)$ : irradiación directa diaria media mensual sobre superficie horizontal ( $Wh m^{-2}$ )

$H_{Ddm}(0)$ : irradiación difusa diaria media mensual sobre superficie horizontal ( $Wh m^{-2}$ )

$H_{Bdm}(S)$ : irradiación directa normal diaria media mensual ( $Wh m^{-2}$ )

$H_{Ba}(S)$ : irradiación directa normal anual ( $kWh m^{-2}$ )

$K_{Tm}$ : índice de claridad (adimensional).

$K_{Dm}$ : fracción difusa de la radiación global (adimensional).

$G_{Ghm}(0)$ : irradiancia global horaria media mensual sobre superficie horizontal ( $W m^{-2}$ )

$G_{Bhm}(0)$ : irradiancia directa horaria media mensual sobre superficie horizontal ( $W m^{-2}$ )

$G_{Dhm}(0)$ : irradiancia difusa horaria media mensual sobre superficie horizontal ( $W m^{-2}$ )

$G_{Bhm}(S)$ : irradiancia directa normal horaria media mensual ( $W m^{-2}$ )

## Anexo 2: Acrónimos

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología.

AOD: Aerosol Optical Depth.

AOT: Aerosol Optical Thickness.

ASAE: American Society of Agricultural Engineers.

CIBA: Centro de Investigación de la Baja Atmósfera.

CMR: Centro Mundial de Radiación.

CM-SAF: Climate Monitoring–Satellite Application Facilities.

CPV: Concentrator PhotoVoltaic.

CRN: Centro Radiométrico Nacional.

DNI: Direct Normal Irradiance.

FAO: Food and Agriculture Organization.

HC: HelioClim.

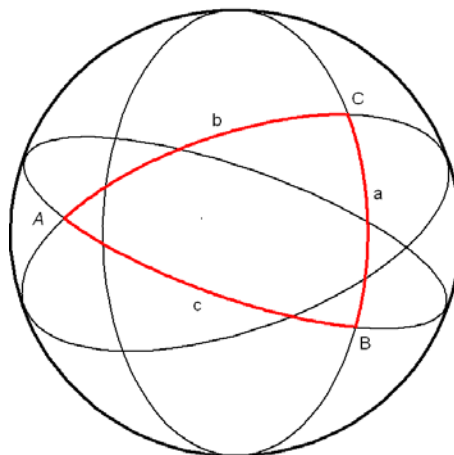
INM: Instituto Nacional de Meteorología.

ISO: International Standards Organization.

MBE: Mean Bias Error.

MFG: Meteosat First Generation.  
 MSG: Meteosat Second Generation.  
 NASA ISCCP: NASA International Satellite Cloud Climatology Project.  
 NASA-SSE: NASA Surface Meteorology and Solar Energy.  
 NCAR-MATCH: National Center for Atmospheric Research - Model of Atmospheric Transport and Chemistry.  
 OMM: Organización Meteorológica Mundial.  
 PMOD: Physikalisches – Meteorologisches Observatorium Davos.  
 PVGIS: PhotoVoltaic Geographical Information System.  
 RMSE: Root Mean Square Error.  
 RRN: Red Radiométrica Nacional.  
 SIAR: Sistema de Información Agroclimática para el Regadío.  
 SRAM: Static Random Access Memory.  
 SoDa: Solar radiation Data.  
 SOLEMI: SOLar Energy MIning.  
 TOC: Total Ozone Column.  
 TOMS: Total Ozone Mapping Spectrometer.  
 TOVS: Tiros Operational Vertical Sounder.  
 UA: Unidad Astronómica.  
 UD: Unidades Dobson.  
 WRC: World Radiation Center  
 WRR: World Radiometric Reference.  
 WSG: World Standard Group.

### Anexo 3: Relaciones trigonométricas de la resolución de triángulos esféricos



Relaciones trigonométricas de la suma y diferencia de ángulos:

$$\text{sen } (a + b) = \text{sen } a \cos b + \cos a \text{ sen } b$$

$$\text{sen } (a - b) = \text{sen } a \cos b - \cos a \text{ sen } b$$

$$\cos (a + b) = \cos a \cos b - \text{sen } a \text{ sen } b$$

$$\cos (a - b) = \cos a \cos b + \text{sen } a \text{ sen } b$$



Teorema del coseno:  $\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$

Teorema del seno:

$$\frac{\text{sen } a}{\text{sen } A} = \frac{\text{sen } b}{\text{sen } B} = \frac{\text{sen } c}{\text{sen } C}$$