

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de la Energía

Estimación de la incertidumbre asociada a la base de datos de radiación solar del GTER al aplicar técnicas de rellenado de huecos

Autor: Roberto Ameneiros Martínez

Tutor: Manuel Antonio Silva Pérez

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

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Estimación de la incertidumbre asociada a la base de datos de radiación solar del GTER al aplicar técnicas de rellenado de huecos

Autor:

Roberto Ameneiros Martínez

Tutor:

Manuel Antonio Silva Pérez

Profesor Contratado Doctor

Dep. de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Índice.

Índice de contenidos.

Contenido

Índice.....	i
Índice de contenidos.....	i
Índice de figuras.....	iii
Índice de tablas.....	v
1. Introducción.....	1
2. Objetivo.....	3
3. Fundamentos.....	4
3.1. Radiación solar.....	4
3.1.1. Geometría Sol - Tierra.....	4
3.1.1.2. <i>Posición de un observador sobre la superficie terrestre.</i>	4
3.1.2. La radiación solar a su paso por la atmósfera.....	12
3.1.3. Medida de la radiación solar.....	12
3.2. Descripción de la estación radiométrica del GTER.....	13
3.2.1. Descripción del equipamiento de la estación.....	13
3.3. Descripción de la base de datos.....	16
4. Metodología.....	18
4.1. Clasificación de días.....	18
4.1.1. Clasificación de días según nubosidad.....	18
4.1.2. Clasificación de días según tipo de hueco.....	21
4.2. Revisión de años.....	26
4.3. Homogeneización de archivos.....	27
4.4. Distribución de huecos.....	28
4.5. Generación de huecos.....	31
4.6. Corrección de días.....	33
4.6.1. Descartados.....	33
4.6.2. Días corregibles.....	36
4.7. Anomalías.....	47
5. Resultados.....	52

0. Índice

5.1. Estimadores.....	52
5.2. Cálculo de errores.	53
5.2.1. Descartados.	53
5.2.2. Días corregibles.	56
6. Extrapolación de resultados.....	66
7. Conclusiones.....	72
8. Bibliografía.	74
ANEXOS	75
ANEXO 1. Estimación de errores detallada para cada año.	75

Índice de figuras.

Figura 3. 1. Coordenadas geográficas.	5
Figura 3. 2. Coordenadas celestes horizontales.....	6
Figura 3. 3. Coordenadas celestes horarias.	7
Figura 3. 4. Representación de la ecuación del tiempo.	9
Figura 3. 5. Ángulo de incidencia de los rayos solares sobre una superficie.	11
Figura 3. 6. Alcance de la radiación solar a la superficie terrestre.	12
Figura 3. 7. Vista de la estación meteorológica del GTER.	13
Figura 3. 8. Extracto de fichero de radiación correspondiente al día 116 de 2007.	16
Figura 4. 1. Correlación $k_{d0}-k_t$ horario	19
Figura 4. 2. Correlación k_d-k_t	19
Figura 4. 3. Ajuste por mínimos cuadrados de los puntos obtenidos y dimensión fractal de sus rectas para: (a) día despejado. (b) día de nubes y claros. (c) día cubierto.	20
Figura 4. 4. Curvas de irradiancia y dimensión fractal correspondientes a: (a) día despejado. (b) día de nubes y claros. (c) día cubierto.....	21
Figura 4. 5. Grafica diaria correspondiente al día 301 de 2007, caso 1a.	23
Figura 4. 6. Gráfica diaria correspondiente al día 153 del año 2004, caso 2.	24
Figura 4. 7. Gráfica diaria correspondiente al día 339 del año 2005, caso 3b.	25
Figura 4. 8. Gráfica diaria correspondiente al día 188 del año 299, caso 4.	25
Figura 4. 9. Extractos de ficheros de radiación correspondiente a los días 42 y 248 de 2007. ..	27
Figura 4. 10. Extracto de fichero de radiación con estructura modificada correspondiente al día 248 de 2007.....	28
Figura 4. 11. Distribución gráfica de los distintos tipos de casos en el periodo 2000-2009.	30
Figura 4. 12. Distribución gráfica de los distintos tipos de casos sobre el año base.	31
Figura 4. 13. Comparación HgO GTER - La Rinconada.....	34
Figura 4. 14. Comparación HgO GTER - Guillena.....	34
Figura 4. 15. Comparación HgO GTER - Sanlúcar La Mayor.	35
Figura 4. 16. Gráfica radiación estimada - real para hueco orto correspondiente al día 11 del año 2007, caso 1a.....	38
Figura 4. 17. Gráfica radiación estimada - real para hueco orto correspondiente al día 68 del año 2007, caso 1b.	38
Figura 4. 18. Gráfica radiación estimada - real para hueco ocaso correspondiente al día 220 del año 2007, caso 1c.....	39
Figura 4. 19. Gráfica radiación estimada - real para hueco ocaso correspondiente al día 141 del año 2007, caso 1d.	39
Figura 4. 20. Gráfica diaria radiación directa normal estimada - real correspondiente al día 20 del año 2007, caso 2, día claro.	41
Figura 4. 21. Gráfica diaria radiación directa normal estimada - real correspondiente al día 265 del año 2007, caso 2, día no claro.....	42

0. Índice

Figura 4. 22. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 245 del año 2007, caso 3a.....	43
Figura 4. 23. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 315 del año 2007, caso 3b.	44
Figura 4. 24. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 163 del año 2007, caso 3c.....	44
Figura 4. 25. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 61 del año 2007, caso 3d.	45
Figura 4. 26. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 106 del año 2007, caso 4.....	46
Figura 4. 27. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 106 del año 2007, caso 4.....	46
Figura 4. 28. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 219 del año 2007, caso 4, corregida con filtro de día claro.	48
Figura 4. 29. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 287 del año 2007, caso 4, corregida con filtro de día claro.	48
Figura 4. 30. Gráfica diaria radiación estimada no corregida- real correspondiente al día 225 del año 2007,.....	49
Figura 4. 31. Gráfica diaria radiación estimada corregida- real correspondiente al día 225 del año 2007, caso 3c.....	50
Figura 4. 32. Gráfica diaria radiación estimada no corregida - real correspondiente al día 225 del año 2007, caso 3a.....	51
Figura 4. 33. Gráfica diaria radiación estimada corregida- real correspondiente al día 225 del año 2007, caso 3a.....	51
Figura 5. 1. Mediana de los resultados del $RMSE_r$ [%] para el caso 1.	59
Figura 5. 2. Percentil 90 de los resultados del $RMSE_r$ [%] para el caso 1.	59
Figura 5. 3. Comparación de los resultados de la mediana para el $RMSE_r$ [%] para irradiación directa normal - casos 2 y 3.....	62
Figura 5. 4. Comparación de los resultados de la mediana para el $RMSE_r$ [%] para irradiación global horizontal - casos 1 y 3.	64

Índice de tablas.

Tabla 4. 1. Clasificación de las distintas causas que generan días descartados.....	22
Tabla 4. 2. Clasificación de los distintos casos en días corregibles - Caso 1.	23
Tabla 4. 3. Clasificación de los distintos casos en días corregibles - Caso 3.	24
Tabla 4. 4. Número de huecos agrupados por tipo y año en el periodo 2000-2009.	26
Tabla 4. 5. Número de días correcto por año.	26
Tabla 4. 6. Clasificación de días correctos en días claros - no claros por año.....	27
Tabla 4. 7. Distribución estadística de los distintos casos en el periodo 2000-2009.	28
Tabla 4. 8. Identificación valores para la generación de matrices aleatoria.....	29
Tabla 4. 9. Extracto de matriz generada para la distribución de huecos.	29
Tabla 4. 10. Extracto de la distribución del tipo de hueco por día.....	30
Tabla 4. 11. Número de huecos distribuidos por caso.....	31
Tabla 4. 12. Error estaciones SIAR-GTER para el año 2007.....	35
Tabla 4. 13. Días descartados con errores elevados.	35
Tabla 5. 1. Errores absolutos para irradiación directa normal - descartados.	53
Tabla 5. 2. RMSE absolutos para irradiación directa normal - descartados.	53
Tabla 5. 3. Errores relativos para irradiación directa normal - descartados.....	54
Tabla 5. 4. RMSE relativos para irradiación directa normal - descartados.	54
Tabla 5. 5. Errores absolutos para irradiación global horizontal - descartados.....	54
Tabla 5. 6. RMSE absolutos para irradiación global horizontal - descartados.	55
Tabla 5. 7. Errores relativos para irradiación global horizontal - descartados.....	55
Tabla 5. 8. RMSE relativos para irradiación global horizontal - descartados.....	55
Tabla 5. 9. Errores absolutos para irradiación directa normal - caso 1.....	56
Tabla 5. 10. RMSE absoluto para irradiación directa normal - caso 1.....	56
Tabla 5. 11. Errores relativos para irradiación directa normal - caso 1.	56
Tabla 5. 12. RMSE relativos para irradiación directa normal - caso 1.....	57
Tabla 5. 13. Errores absolutos para irradiación global horizontal - caso 1.	57
Tabla 5. 14. RMSE absolutos para irradiación global horizontal - caso 1.....	58
Tabla 5. 15. Errores relativos para irradiación global horizontal - caso 1.....	58
Tabla 5. 16. RMSE relativos para irradiación global horizontal - caso 1.	58
Tabla 5. 17. Errores absolutos para irradiación directa normal - caso 2.	60
Tabla 5. 18. RMSE absolutos para irradiación directa normal - caso 2.....	60
Tabla 5. 19. Errores relativos para irradiación directa normal - caso 2.	60
Tabla 5. 20. RMSE relativos para irradiación directa normal - caso 2.....	60
Tabla 5. 21. Errores y RMSE absolutos para irradiación directa normal - caso 3.....	61
Tabla 5. 22. Errores y RMSE relativos para irradiación directa normal - caso 3.	61
Tabla 5. 23. Corrección de errores generación directa normal diaria - no claro.	62
Tabla 5. 24. Errores absolutos para irradiación global horizontal - caso 3.	62
Tabla 5. 25. RMSE absolutos para irradiación global horizontal - caso 3.....	63
Tabla 5. 26 Errores relativos para irradiación global horizontal - caso 3.....	63
Tabla 5. 27. RMSE absolutos para irradiación global horizontal - caso 3.....	63
Tabla 5. 28. Corrección de errores de irradiación global horizontal - caso 3D.....	64

0. Índice

Tabla 5. 29. Errores para irradiación global horizontal - caso 4.....	64
Tabla 6. 1. Estimadores de error diario para días descartados - radiación directa normal.	66
Tabla 6. 2. Estimadores de error diario para días descartados - radiación global horizontal.....	66
Tabla 6. 3. Estimadores de error diario para el caso 1.....	67
Tabla 6. 4. Estimadores de error diario para el caso 2.....	67
Tabla 6. 5. Estimadores de error diario para el caso 3.....	67
Tabla 6. 6. Estimadores de error diario para el caso 4.....	67
Tabla 6. 7. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2006	68
Tabla 6. 8. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2006.....	69
Tabla 6. 9. Número de huecos agrupados por tipo y año en el periodo 2000-2009.	69
Tabla 6. 10. Estimación de la incertidumbre generada en el periodo de años 2000-2009.	70
Tabla 7. 1. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología de días descartados. ..	72
Tabla 7. 2. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología del caso 1.	72
Tabla 7. 3. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología del caso 2.	72
Tabla 7. 4. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología del caso 3.	72
Tabla 7. 5. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología del caso 4.	72
Tabla 7. 6. Estimación de la incertidumbre generada en el periodo de años 2000-2009.	73
Tabla A.1. 1. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2000.	76
Tabla A.1. 2. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2000.....	76
Tabla A.1. 3. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2001.	77
Tabla A.1. 4. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2001.....	77
Tabla A.1. 5. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2002.	78
Tabla A.1. 6. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2002.....	78
Tabla A.1. 7. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2003.	79
Tabla A.1. 8. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2003.....	79
Tabla A.1. 9. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2004	80
Tabla A.1. 10. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2004.....	80

0. Índice

Tabla A.1. 11. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2005.	81
Tabla A.1. 12. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2005.....	81
Tabla A.1. 13. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2007.	82
Tabla A.1. 14. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2007.....	82
Tabla A.1. 15. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2008.	83
Tabla A.1. 16. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2008.....	83
Tabla A.1. 17. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m ²] por tipo de hueco y conjunta - año 2009.	84
Tabla A.1. 18. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2006.....	84

1. Introducción.

El sistema energético actual presenta diferentes problemas tales como el agotamiento de los recursos fósiles, la alta emisión de gases de efecto invernadero o una gran dependencia energética del exterior en ciertos casos. Se da la obligación de evolucionar hacia un modelo más sostenible. En este contexto, surge la necesidad de potenciar el uso de las energías renovables, pues es una fuente de recursos limpia e inagotable. A su vez se reduce la gran dependencia energética de los combustibles fósiles. Dentro de las energías renovables, la energía solar cuenta con un papel fundamental. El sol proporciona la mayor fuente de energía disponible.

La importancia de la energía solar dentro de las energías renovables requiere disponer de series de datos medidos de calidad acerca del recurso solar. La construcción de una base de datos que recoja estos valores es una herramienta necesaria a la hora del desarrollo de futuros proyectos solares, como pueden ser estudios de emplazamiento o dimensionamiento y producción de plantas.

Aunque en la actualidad existen numerosas bases de datos de radiación solar en todo el mundo, no todas disponen de registros de calidad. Para considerar a una base de datos de calidad, éstas deben disponer de series temporales en un largo periodo de tiempo y gran fiabilidad en las medidas. Uno de los principales inconvenientes que suelen presentar es la interrupción en el registro de medidas. Generalmente esto está relacionado con la falta de mantenimiento de las instalaciones, generándose huecos en las series de datos. Además, no son pocas las bases de datos que solo almacenan medidas de radiación global horizontal, sin registrar valores de radiación directa normal. Este hecho puede no suponer problemas para diversos estudios y proyectos de energía solar, como son los casos de la energía fotovoltaica o térmica de baja temperatura. No obstante, las medidas de radiación directa normal son fundamentales en numerosas aplicaciones solares, destacando las técnicas en concentración de radiación solar.

El Grupo de Termodinámica y Energías Renovables de la Escuela Superior de Ingenieros (GTER) cuenta en sus instalaciones con una estación radiométrica de medidas, cuya información es empleada para la construcción de una base de datos propia. La recopilación de las medidas registradas en dicha estación ha permitido la construcción de una base de datos propia. Para la realización de este proyecto se ha utilizado dicha base de datos en el periodo que abarca desde el año 2000 a 2009. Este es el periodo empleado en el proyecto del mismo grupo, proyecto de fin de carrera "*Metodología para el análisis y corrección de la base de datos meteorológicas del GTER*" [1]. En este proyecto se desarrollaron diferentes metodologías para el rellenado de huecos existentes en la base de datos.

Existen numerosos estudios acerca de las distintas metodologías para el rellenado de huecos de bases de datos radiométricos. No existe un método que garantice la mayor exactitud en la restauración de los registros. Las circunstancias para cada caso, tales como la duración del hueco o la climatología del lugar, hacen que cada caso requiera una metodología diferente. En el artículo desarrollado por Ogunsola et al. [2], se evalúan diferentes metodologías para dos ciudades con distintos climas obteniendo distintos resultados para cada metodología en

función de la ubicación y la duración de los huecos. Hoyer-Klick et al. [3], evalúan nuevamente distintos métodos según el tipo de variable afectada y la duración en las diferentes estaciones de la evaluación del recurso solar (SRRA) de la India, llegando a las mismas conclusiones.

2. Objetivo.

2. Objetivo.

Como se ha destacado en el capítulo anterior, disponer de series de datos radiométricos de calidad y larga duración en el tiempo, es fundamental para el desarrollo de estudios y proyectos de energía solar.

En el proyecto que se toma como referencia para este estudio [1], se restauran los registros inexistentes de la base de datos radiométrica del GTER mediante el desarrollo de una metodología. Los nuevos valores estimados presentan una determinada incertidumbre respecto a los valores reales. El presente proyecto tiene como objetivo principal cuantificar la incertidumbre asociada a la metodología empleada.

Para la consecución del objetivo, se comienza con la simulación de los distintos tipos de huecos distribuidos de manera aleatoria. Para la simulación de estos, se hace uso del conjunto de días que no ha sufrido correcciones previas, denominados días correctos. Posteriormente se procede al rellenado de huecos aplicando la metodología desarrollada [1]. Se emplean distintos procedimientos en función de las características del hueco. Una vez se han completado los registros con hueco, se evalúan los errores cometidos para cada tipo de hueco. Para ello se hace uso de indicadores estadísticos. Para finalizar, se analizan los resultados obtenidos, comparando entre los distintos tipos de huecos que presenta la base de datos radiométrica del GTER.

Una vez evaluados los errores asociados a la metodología, se tiene como objetivo secundario la extrapolación de los resultados al conjunto de años estudiados. El periodo de años estudiados abarca desde 2000 a 2009. Se trata del periodo de años analizados en el proyecto anterior. Con esto, se pretende estimar la incertidumbre generada en los años analizados en la base de datos radiométrica del GTER, consecuencia de las correcciones realizadas.

3. Fundamentos.

3.1. Radiación solar.

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. Todos los cuerpos con una determinada temperatura emiten radiación electromagnética.

A efectos prácticos, desde la Tierra, el Sol se considera como un foco térmico a 5777 K, recibándose en la atmósfera terrestre 1367 W/m^2 , valor que es conocido como constante solar. Esta constante es un valor aproximado, puesto que varía debido a la elipticidad de la órbita terrestre, y es medido en una superficie perpendicular a los rayos solares.

3.1.1. Geometría Sol - Tierra.

3.1.1.1. Movimientos de la Tierra.

La tierra, como es sabido, gira en torno al Sol describiendo una órbita elíptica. La forma esférica de su trayectoria implica que no todos los puntos de la órbita terrestre mantengan la misma distancia al sol. El plano que contiene la órbita terrestre se denomina plano de la eclíptica. A su vez, el movimiento orbital de la Tierra no es uniforme, siendo la velocidad lineal media unos 29,8 km/s.

Simultáneo al movimiento de traslación descrito, la Tierra gira sobre su propio eje, que pasa por los dos polos, en un movimiento de rotación. El periodo de este movimiento es de 23 h 56 min 4,099 s, ligeramente inferior a la duración de un día. El eje de rotación no es perpendicular al plano de la eclíptica. Esta circunstancia da origen a las estaciones del año y la desigualdad en la duración de los días y las noches.

3.1.1.2. Posición de un observador sobre la superficie terrestre.

La Tierra se considera a efectos prácticos como una esfera. El plano perpendicular al eje determina el ecuador terrestre. Los planos paralelos al ecuador cortando la esfera terrestre en forma de circunferencias se denominados paralelos. Los planos que pasan por los polos se denominan planos meridianos conformando circunferencias conocidas como meridianos terrestres. A partir de estos, se puede determinar cualquier punto en la superficie terrestre a partir de sus coordenadas geográficas:

- Longitud (λ): Ángulo diedro entre el plano meridiano cero y el plano meridiano que pasa por dicho punto. Se cuenta de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el Este y negativamente hacia el Oeste.
- Latitud (Φ): Ángulo formado por la normal a la esfera terrestre por dicho punto con el plano del ecuador. Se cuenta de 0° a $\pm 90^\circ$, a partir del ecuador, positivamente hacia el Norte y negativamente hacia el Sur.

En la Figura 3.1 se pueden observar ambos ángulos sobre la superficie de la Tierra:

3. Fundamentos

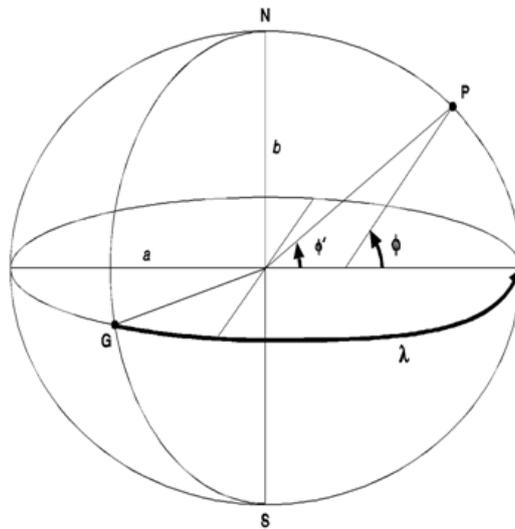


Figura 3. 1. Coordenadas geográficas.

La inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto al plano de la eclíptica determina sobre el elipsoide unos paralelos denominados trópicos y círculos polares.

3.1.1.3. La esfera celeste. Sistemas de referencia.

Para determinar la posición de un astro sobre la esfera celeste, dada por una pareja de ángulos denominados coordenadas celestes, es necesario establecer previamente algún sistema de referencia.

Coordenadas celestes horizontales.

Un primer sistema de referencia a considerar es el sistema conocido como coordenadas celestes horizontales. Éste representa geoméricamente el aspecto del cielo visto por un observador situado en un lugar determinado de la superficie terrestre. Utiliza como plano fundamental el horizonte, definido como el plano tangente a la esfera terrestre en el lugar de observación. Este plano determina sobre la esfera celeste un círculo máximo denominado horizonte celeste y la recta normal al mismo (vertical del lugar o del observador), trazada por el centro de la esfera, cortando a esta en dos puntos: el cenit, sobre el observador, y el nadir, oculto por la Tierra, bajo el observador. Los círculos máximos que pasan por el cenit y el nadir se denominan círculos verticales.

Las coordenadas celestes horizontales de un astro se pueden ver en la figura 3.2:

3. Fundamentos

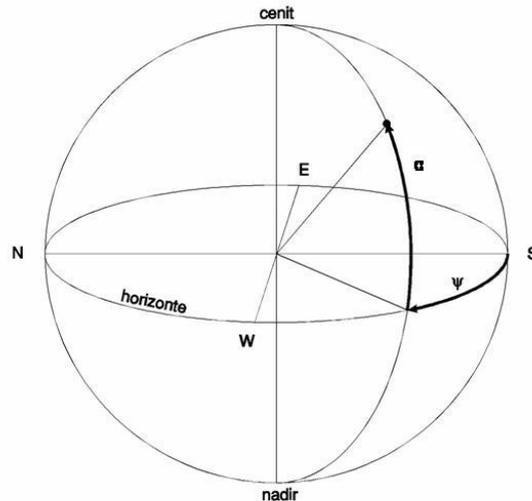


Figura 3. 2. Coordenadas celestes horizontales.

- Acimut (ψ): Arco de horizonte celeste comprendido entre el punto cardinal Sur y el punto donde el círculo vertical que pasa por el astro corta al horizonte. Se cuenta a partir del Sur, de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.
- Altura solar (α): Arco de dicho círculo vertical comprendido entre el astro y el horizonte. Se mide a partir del horizonte de 0° a 90° , positivamente hacia el cenit y negativamente hacia el nadir.

En lugar de la altura α se emplea frecuentemente el ángulo cenital, θ_z , que es el arco de círculo vertical entre el cenit y el astro. Se cuenta a partir del cenit, de 0° a 180° , con lo que la relación entre la altura solar y el ángulo cenital viene dada por:

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

Coordenadas celestes horarias.

Otro sistema de referencia que se puede utilizar para la esfera celeste, es el denominado sistema de coordenadas celestes horarias, basado en el movimiento de rotación de la Tierra. Como eje fundamental se adopta el eje de rotación, que define sobre dicha esfera los polos celestes, Norte y Sur, y el ecuador celeste, normal al mismo, como círculo máximo fundamental. Se llaman círculos horarios o meridianos celestes los círculos máximos secundarios que pasan por los polos y paralelos celestes los círculos menores paralelos al ecuador. El semicírculo horario que partiendo del polo Norte celeste, pasa por el cenit, corta al horizonte en el punto cardinal Sur y finalmente, pasa por el polo Sur celeste, recibe el nombre de meridiano superior del lugar.

Las coordenadas celestes horarias de un astro son, como puede verse en la Figura 3.3:

3. Fundamentos

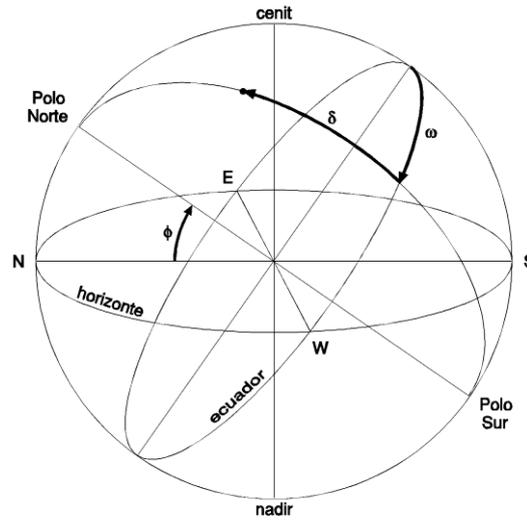


Figura 3. 3. Coordenadas celestes horarias.

- Ángulo horario (ω): Arco del ecuador celeste comprendido entre el meridiano superior del lugar y el círculo horario que pasa por el astro. Se mide sobre el ecuador a partir del punto de intersección entre el meridiano superior del lugar y aquel, de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.
- Declinación (δ): Arco del círculo horario que pasa por el astro, comprendido entre el ecuador y éste. Se cuenta a partir del ecuador de 0° a $\pm 90^\circ$, positivamente hacia el polo Norte y negativamente hacia el polo Sur.

Los dos sistemas de coordenadas enumerados, horizontales y horarios, dependen del lugar en que esté situado el observador sobre la superficie terrestre, por lo que se denominan por este motivo coordenadas celestes locales

Las coordenadas horizontales de un astro varían continuamente con el tiempo. Como consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra, los astros describen sobre la esfera celeste círculos paralelos al ecuador que recorren diariamente en sentido de Este a Oeste y sobre el que pueden destacarse algunos puntos singulares. Se denomina orto de un astro el momento de su cruce con el horizonte haciéndose visible por el Este, y ocaso el momento en que cruza el horizonte por el Oeste ocultándose. Asimismo, el instante de paso de un astro por el meridiano superior del lugar ($\omega = 0^\circ$), en el que alcanza su altura máxima sobre el horizonte, se conoce como culminación superior del astro. El intervalo de tiempo transcurrido entre dos culminaciones superiores consecutivas, se denomina día sidéreo y constituye una unidad fundamental de tiempo en astronomía. Su duración es de 23 h 56 min 4,091 s y coincide con el período de rotación de la Tierra. El tiempo transcurrido entre dos culminaciones superiores del Sol define el día solar verdadero, que es un poco mayor que el día sidéreo como consecuencia de que la Tierra tiene que avanzar en su movimiento sobre la eclíptica hasta enfrenar al Sol.

3. Fundamentos

3.1.1.4. Tiempo solar y tiempo oficial. La ecuación del tiempo

El tiempo solar verdadero, TSV, en un lugar dado es, por definición, el ángulo horario del centro del Sol expresado en horas. Cada hora equivale a 15°, luego:

$$TSV = \frac{\omega}{15} \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

Por tanto, el día solar verdadero, está dividido en 24 horas de tiempo solar verdadero, que empieza a contarse a partir del mediodía.

El tiempo local aparente, TLA, es, por definición, el tiempo solar verdadero aumentado en 12 horas, por lo que empieza a contarse a partir de medianoche.

$$TLA = TSV + 12 \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

El día solar verdadero, sin embargo, tiene una duración desigual a lo largo del año. El movimiento aparente del Sol sobre el horizonte es la composición de dos movimientos, uno diario, debido al movimiento de rotación de la Tierra, que se puede suponer perfectamente uniforme y otro anual, a causa del movimiento orbital terrestre, que no es uniforme, debido a la excentricidad de esta órbita. Así pues, el tiempo solar verdadero, que viene determinado por la observación del Sol, tiene una naturaleza más geométrica que física, ya que no es una función lineal del tiempo, y no sirve por consiguiente, para establecer una escala de tiempo uniforme.

Corrigiendo todas las irregularidades del día solar verdadero se obtiene lo que se denomina día solar medio, de duración constante, que es el utilizado normalmente en la vida diaria. El tiempo solar medio, TSM, en un lugar dado es, por definición, el tiempo solar verdadero corregido de todas sus irregularidades. Definiremos como ecuación del tiempo, E_t , la suma algebraica de todas las correcciones que es preciso deducir del tiempo solar verdadero para despejarlo de todas sus irregularidades. Se tiene pues, por definición:

$$TSV = TSM + E_t \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

La Figura 3.4 representa gráficamente la ecuación del tiempo a lo largo del año. Alcanza un valor máximo de 16 min 24 s el día 4 de noviembre, un valor mínimo de -14 min 22 s el día 11 de febrero y se anula cuatro veces al año, los días 16 de abril, 15 de junio, 2 de septiembre y 25 de diciembre. Estas fechas y valores son tan sólo aproximadas y oscilan ligeramente de un año a otro.

3. Fundamentos

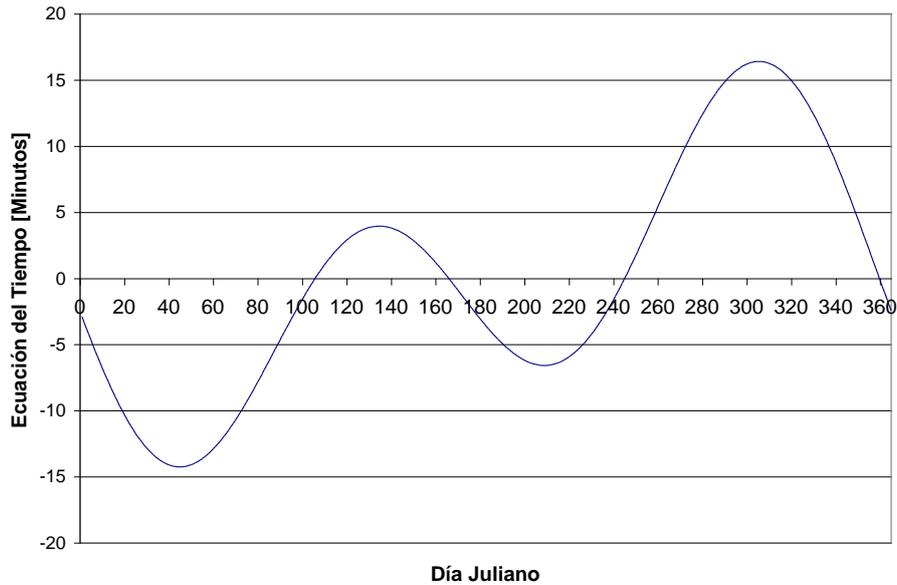


Figura 3. 4. Representación de la ecuación del tiempo.

El tiempo oficial, TO , que es el que marcan los relojes que usamos en la vida ordinaria, depende de la normativa legal de cada país, pero, normalmente, difiere un número entero de horas del correspondiente al huso horario. En este caso

$$TO = TLE + AO \quad [\text{Ec. 3.5}]$$

Siendo AO el adelanto oficial sobre el huso horario, que puede variar a lo largo del año (en España se les suele denominar, horarios de invierno y verano y toman los valores 1 y 2 horas respectivamente). Por consiguiente, de las definiciones dadas se tiene que tiempo solar verdadero y tiempo oficial están relacionados por

$$TSV = TO - AO + (\lambda - \lambda_s) / 15 + E_t - 12 \quad [\text{Ec. 3.6}]$$

Donde al igual que en las relaciones anteriores, el tiempo está expresado en horas, lo mismo que E_t y λ en grados (positiva hacia el Este).

El tiempo solar verdadero se cuenta, como se ha visto, a partir del mediodía. Sin embargo, en la bibliografía más común es frecuente contarlo a partir de medianoche. Es decir, se toma como tiempo solar verdadero el tiempo local aparente, TLA .

Finalmente, habría que decir que es frecuente en el estudio de la radiación solar agregar ésta en períodos horarios. En este caso se entiende por hora 1 la comprendida entre medianoche verdadera y las 1 horas TLA , por hora 2 la comprendida entre las 1 horas y las 2 horas TLA , y así sucesivamente. La hora 24 sería entonces la comprendida entre las 23 horas TLA y la medianoche verdadera del día siguiente.

3.1.1.5. Cálculo de la posición solar. Ecuaciones aproximadas

La duración del año trópico es de 365,24219 días y no de un número entero de días. Para tanto el cálculo de la posición y distancia solar como el análisis estadístico de los datos de radiación solar, suele considerarse los años de 365 días, prescindiendo del día 29 de febrero de los años

3. Fundamentos

bisiestos, que es ignorado. Este método conlleva un pequeño error, que sin embargo es aceptable en la mayoría de las aplicaciones, y tiene la ventaja de considerar todos los años idénticos, en lo que a posición y distancia solar se refiere, simplificando en gran medida los cálculos necesarios. Cada día de este año se identifica mediante un número denominado día del año, n , que varía entre 1 para el día 1 de enero y 365 para el día 31 de diciembre.

Suponiendo que durante un determinado día del año la declinación solar es constante (la máxima variación en un día ocurre durante los equinoccios y es menor de 30'), se tendría que la trayectoria recorrida por el Sol ese día es exactamente un arco de paralelo celeste. La posición solar en un instante determinado vendrá dada, en coordenadas horarias, por el ángulo horario ω y la declinación δ del centro del Sol. El ángulo horario (expresado en grados sexagesimales) es:

$$\omega = 15 \cdot t \quad [\text{Ec. 3.7}]$$

Donde t está expresado en horas de tiempo solar verdadero y la declinación solar se calcula mediante la expresión trigonométrica propuesta por Bourges, que ofrece un error máximo de $\pm 12'$, y que viene dada por:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.3723 + 23.2567 \operatorname{sen} \omega t - 0.7580 \cos \omega t + 0.1149 \operatorname{sen} \omega t + \dots \\ & \dots + 0.3656 \cos \omega t - 0.1712 \operatorname{sen} \omega t + 0.0201 \cos \omega t \end{aligned} \quad [\text{Ec. 3.8}]$$

Donde δ está expresado en grados así como ωt puede calcularse mediante:

$$\omega t = (360 / 365) \cdot (n - 79,436) \quad [\text{Ec. 3.9}]$$

La ecuación del tiempo expresada en minutos, puede calcularse por medio de la siguiente expresión, debida a Spencer, y presenta un error máximo de unos 35 segundos:

$$\begin{aligned} E_t = & \frac{229.2}{60} \cdot \left[0.000075 + 0.001868 \cdot \cos(\Gamma) - 0.032077 \cdot \operatorname{sen}(\Gamma) - \dots \right. \\ & \left. \dots - 0.014615 \cdot \cos(2 \cdot \Gamma) - 0.04089 \cdot \operatorname{sen}(2 \cdot \Gamma) \right] \end{aligned} \quad [\text{Ec. 3.10}]$$

3.1.1.6. Posición del Sol relativa a una superficie plana.

La posición relativa del Sol con respecto a una superficie se establece en función de la posición solar en la esfera celeste y de la posición de la superficie sobre el plano del horizonte, la cual viene caracterizada por los dos ángulos:

- El ángulo acimutal, γ , también llamado orientación, que forma la proyección de la normal a la superficie sobre el plano horizontal con el plano meridiano del lugar. Se cuenta a partir del punto cardinal Sur, de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.
- La inclinación o pendiente, β , de la superficie, que es el ángulo formado por dicha superficie con el plano horizontal. Se mide de 0° a 180° . Si $\beta > 90^\circ$ la superficie estaría enfrenteada al suelo.

3. Fundamentos

La irradiación solar recibida por una superficie está influenciada por el ángulo de incidencia, i , que forman los rayos del Sol con la normal a la superficie. Este ángulo, para una superficie arbitrariamente orientada e inclinada, viene dado en función de las coordenadas horizontales del Sol, por:

$$\cos(i) = [\cos(\beta) \cdot \text{sen}(\alpha)] + [\text{sen}(\beta) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\psi - \gamma)] \quad [\text{Ec. 3.11}]$$

Otra expresión más compleja, pero que determina directamente el ángulo de incidencia en función de las coordinas horarias del Sol y de la latitud geográfica. Utilizada en la implementación informática. Viene expresada por:

$$\begin{aligned} \cos(i) = & [\text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega)] + [\text{sen}(\beta) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \cos(\omega)] - \dots \\ & \dots - [\text{sen}(\beta) \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \cos(\phi)] + [\cos(\beta) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\phi)] + \dots \\ & \dots + [\cos(\beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega)] \end{aligned}$$

[Ec. 3.12]

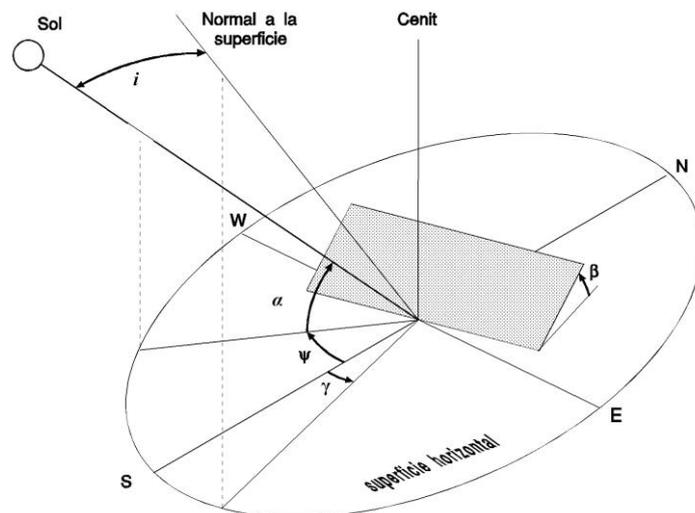


Figura 3. 5. Ángulo de incidencia de los rayos solares sobre una superficie.

3.1.1.7. Radiación solar extraterrestre.

La radiación solar extraterrestre determina un valor máximo teórico de la energía solar disponible, por lo que es ampliamente utilizada como referencia en el estudio de la radiación solar. Como patrón básico se toma la constante solar, ICS, definida como la cantidad total de energía procedente del Sol, en todas las longitudes de onda, por unidad de tiempo y por unidad de área de una superficie normal a los rayos solares y a la distancia media entre la Tierra y el Sol. Medidas recientes de la constante solar (según el WRC de Davos, Suiza) dan un valor de:

$$I_{CS} = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad [\text{Ec. 3.13}]$$

3. Fundamentos

La irradiancia extraterrestre incidente sobre una superficie cualquiera en un instante dado, viene establecida por:

$$I_o = I_{CS} \cdot E_o \cdot \cos \theta \quad [\text{Ec. 3.14}]$$

La irradiación, o cantidad total de energía recibida durante un determinado período de tiempo $[t_1, t_2]$, se obtiene integrando la irradiancia para ese período. Para integrar se tomarán únicamente intervalos de integración dentro de un determinado día del año. De esta forma, tanto δ como E_o pueden suponerse constantes durante el período $[t_1, t_2]$ y, por consiguiente, I_o depende únicamente del ángulo horario ω . En este caso

$$H_o = \int_{t_1}^{t_2} I_o dt = \frac{12}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} I_o d\omega \quad [\text{Ec. 3.15}]$$

3.1.2. La radiación solar a su paso por la atmósfera.

Antes de llegar a la superficie terrestre, la radiación solar ha de atravesar la atmósfera terrestre, en donde se ve sometida a un proceso de atenuación. Proceso que viene determinado variables como la altura y la posición del sol o la misma composición de la atmósfera.

La radiación global que alcanza la superficie de la tierra, puede dividirse en dos formas, radiación directa, la cual no ha sufrido modificación en su dirección desde el Sol, y radiación difusa, procedente de todas las direcciones de la semiesfera celeste por encima del plano horizontal, así como de la reflexión de la radiación por el suelo, figura 3.6.

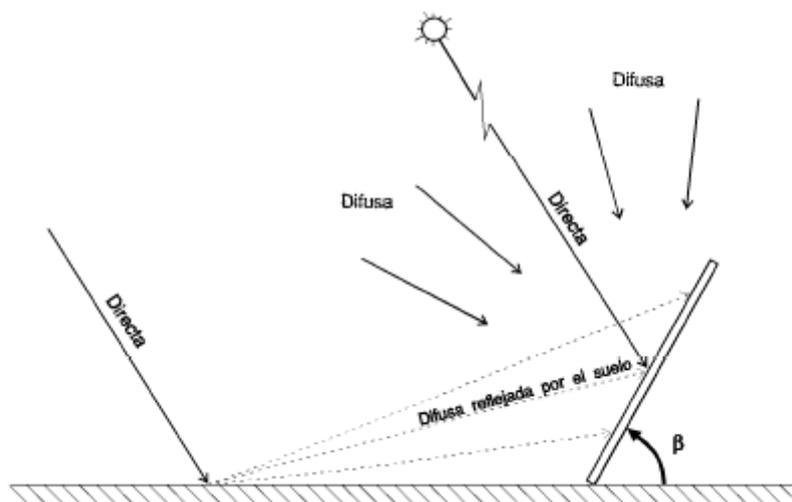


Figura 3. 6. Alcance de la radiación solar a la superficie terrestre.

3.1.3. Medida de la radiación solar.

La radiación solar se mide generalmente mediante instrumentos especiales destinados a tal propósito denominados radiómetros. Existen varias clases de radiómetros, dependiendo del tipo de radiación a medir.

3. Fundamentos

La radiación global se mide generalmente sobre una superficie horizontal con un instrumento de medida denominado piranómetro. La mayoría de los piranómetros se basan en la medida de la diferencia de temperaturas entre dos superficies, una blanca y otra negra, encerradas en una cámara semiesférica de vidrio.

La radiación difusa se mide también sobre una superficie horizontal con un piranómetro, que incorpora un disco o una banda sombreadora, para evitar la visión del disco solar (lo que elimina la componente directa) en su recorrido diario.

Por el contrario, la radiación directa se mide sobre una superficie normal a los rayos solares, mediante un instrumento denominado pirheliómetro y que consiste básicamente en un par termoeléctrico con una de sus uniones situada sobre una superficie receptora ennegrecida, alojada en el interior de un tubo, que se dirige constantemente hacia el Sol. Por lo tanto, el pirheliómetro ha de estar acoplado sobre una montura ecuatorial y provisto de un mecanismo de seguimiento del disco solar.

3.2. Descripción de la estación radiométrica del GTER.

El Grupo de Termodinámica y Energías Renovables dispone de la estación radiométrica desde el año 1984. Los primeros 14 años esta se ubicó en el campus universitario de Reina Mercedes (37,37° N y 6,00° W), en la antigua Escuela de Ingeniería de Sevilla. En 1998 se trasladó a la actual ubicación, en el edificio de los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de coordenadas 37,40°N y 6,01° W). Está situada en la azotea del edificio. La instalación ha sufrido constantes mejoras en su equipamiento con el fin de mejorar la fiabilidad de sus registros.



Figura 3. 7. Vista de la estación meteorológica del GTER.

3.2.1. Descripción del equipamiento de la estación.

En la plataforma superior de la estación se sitúan los sensores y equipos auxiliares que componen esta. Están situados a 16 metros sobre el nivel del mar. Éstos se encargan de medir y almacenar las principales variables de radiación. Los sensores están capacitados para detectar las diferentes magnitudes físicas y transformarlas en variables eléctricas. En el

3. Fundamentos

presente capítulo, se detallan los diferentes dispositivos que se encargaron de registrar las variables que se utilizan en el presente proyecto, entre los años 2000 y 2009.

3.2.1.1. Piranómetros.

Los pirómetros son los instrumentos encargados de medir la radiación global. La estación cuenta con 4 tipos de modelos diferentes.

Piranómetro Kipp & Zonen, modelo CM21:

En este modelo, la energía radiante es absorbida por un disco pintado de negro. Posteriormente el calor fluye a través de una resistencia térmica hasta el cuerpo del piranómetro. La diferencia de temperatura entre los extremos de la resistencia se transforma en una tensión proporcional a la irradiancia absorbida, proporcionando el valor medido.

Se encarga de registrar las medidas de irradiancia global horizontal y dispone de las siguientes características:

- Rango espectral: 305-2800 nm
- Sensibilidad: 7-17 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
- Tiempo de respuesta: 5 seg.
- Temperatura de operación: de -40°C a 80°C



Figura 3.8. Piranómetro Middleton SK01-D.

Piranómetro Kipp & Zonen, modelo CM6b

Este piranómetro está formado por una termopila y una cúpula de cristal de buena calidad. Se usa para medir la irradiancia global horizontal. Presenta las siguientes especificaciones:

- Rango espectral: 350-1100 nm
- Sensibilidad: $\pm 2\%$
- Tiempo de respuesta (95%): 10 ms



Figura 3.9. Piranómetro Kipp & Zonen, modelo CM6b.

3.2.1.2. Pirheliómetros.

Los pirheliómetros son dispositivos encargados de medir la radiación directa normal. La estación cuenta con dos modelos diferentes que se describen en adelante.

Pirheliómetro Eppley, modelo NIP

El siguiente pirheliómetro dispone de una termopila de cable enrollado en la base de un tubo, con un ratio de 1 a 10 entre la apertura y su longitud. El interior de este tubo de latón está ennegrecido y cuenta con un diafragma para dirigir el paso de la luz. El tubo está lleno de aire seco a presión atmosférica y posee un sellado en la base receptora. En cada extremo del

3. Fundamentos

cilindro hay dos discos, provistos con un mecanismo que permite comprobar la alineación del pirheliómetro con el Sol.

Especificaciones:

- Sensibilidad: aprox. $8 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
- Dependencia con la temperatura: $\pm 1\%$ sobre un rango de temperatura de -20°C a 40°C
- Linealidad: $\pm 0,5\%$ de 0 a 1400Wm^{-2}
- Tiempo de respuesta: 1 seg



Figura 3. 10. Pirheliómetro Eppley, modelo NIP

Pirheliómetro Kipp & Zonen, modelo CHP1

Este segundo pirheliómetro está formado por una termopila. En ella el flujo de calor generado por la irradiancia incidente pasa a través de una resistencia térmica donde la diferencia de temperatura entre los extremos se convierte en una diferencia de tensión como una función lineal de la irradiancia absorbida. La ventana del pirheliómetro cubre un rango espectral del 97%.

Especificaciones:

- Sensibilidad: aprox. $7-14 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
- Linealidad: $\pm 0,2\%$ de 0 a 1400Wm^{-2}
- Tiempo de respuesta: 5 seg



Figura 3. 11. Pirheliómetro Kipp & Zonen, modelo CHP1.

3.2.1.3. Seguidor.

Los seguidores son dispositivos cuyo objetivo es el seguimiento instantáneo del Sol. Se mide la irradiancia directa normal al incidir los rayos solares en dirección perpendicular en todo instante, sobre la apertura que permite su medición. El modelo empleado es el Sci-tec 2AP, al cual están acoplados los dos pirheliómetro descritos anteriormente.

Seguidor Sci-tec, modelo 2AP:

El presente seguidor cuenta con un microprocesador encargado de controlar su posición mediante dos ejes de control, cenit y acimut.



Figura 3. 12. Seguidor Sci-tec, modelo 2AP.

3.3. Descripción de la base de datos.

Los datos tomados para la elaboración de la base de datos son registrados en la estación del GTER, descrita anteriormente. La estación ha tomado registros desde el año 1984 hasta la actualidad. La estructura de los archivos almacenados ha ido modificándose a lo largo de estos. A su vez, hay que destacar la evolución de la calidad de los datos registrados. Se debe a un mayor seguimiento y mantenimiento de la estación y la renovación de determinados dispositivos. También se han experimentado mejoras en el almacenamiento de datos, facilitando un posterior tratado con programas informáticos. La estación dispone de dispositivos encargados del tratamiento de las señales, adquisición y registro de los valores medidos, descritos en el apartado anterior.

Del mismo modo, se detallan en este apartado, aspectos relacionados con la estructura de los archivos utilizados. Los archivos están nombrados como R10-ddd.dat, donde los tres dígitos indican el día del año del que se trata. Se trata de archivos con frecuencia 10-minutal, puesto que es esta la frecuencia más utilizada en los estudios en este ámbito y en los programas de simulación. Como se ha comentado previamente, los archivos utilizados presentan correcciones. Se han solucionado los diferentes problemas encontrados, anomalías en las medidas, presencia de huecos en los registros o archivos no generados.

La estructura que disponen los archivos con los que se trabaja se muestra a continuación, figura 3.15.

```

Estacion radiométrica de la Escuela de Ingenieros
Dia 116 Valores promedios cada 10 minutos:
GMT      Ig0      Ig30      Ibn
HH:MM    (W/m2)   (W/m2)   (W/m2)
5: 0     0.00     0.00     0.00
5:10     0.00     0.00     0.00
5:20     0.00     0.00     0.00
5:30     0.00     0.60     0.00
5:40     1.85     2.87     0.00
5:50     6.84     6.59     2.90
6: 0     24.09    16.18    78.16
6:10     53.91    33.72    147.72
6:20     67.69    40.47    200.61
6:30     62.78    47.32    114.86
6:40     86.87    65.56    163.37
6:50     95.72    82.79    71.85
7: 0     101.36   98.23    13.72
7:10     134.22   122.07   40.65
7:20     257.24   213.88   358.50
7:30     164.64   146.46   86.33
7:40     351.26   310.04   463.62
7:50     301.00   274.09   318.37
8: 0     445.33   396.10   542.91

```

Figura 3. 8. Extracto de fichero de radiación correspondiente al día 116 de 2007.

En las primeras filas se hace referencia al día del año en cuestión y a los parámetros medidos. Estas últimas se observan en cuatro columnas y son:

3. Fundamentos

- Hora GMT (HH:MM).
- Irradiancia global sobre superficie horizontal (W/m^2).
- Irradiancia global sobre superficie inclinada 30° (W/m^2)
- Irradiancia directa normal (W/m^2).

Se trabaja únicamente, con los valores de irradiancia global horizontal e irradiancia directa normal. No se disponen de datos de radiación difusa puesto que en el proyecto anterior, no se llevó a cabo la corrección de esta variable.

4. Metodología.

4.1. Clasificación de días.

Previo al desarrollo de la metodología es importante mencionar aspectos relativos a las características de los días en función de la nubosidad y los distintos tipos de huecos. Son características que se sirven para la clasificación del conjunto de días y determinan la metodología a aplicar necesaria, distinta en cada caso.

4.1.1. Clasificación de días según nubosidad.

Del proyecto anterior se extrae la clasificación del conjunto de días según su nubosidad, distinguiéndose entre días claros y no claros. A su vez, estos últimos se clasifican en dos grupos, días de cielo cubierto y nublado. El proceso empleado en la clasificación del tipo de día se basa en la combinación de dos métodos: el cálculo del índice de claridad del cielo y el análisis fractal de datos de irradiancia. Ningún método aplicado en solitario aporta demasiada fiabilidad, por lo que se opta por el conjunto de los dos anteriores.

Índice de claridad del cielo.

Para la aplicación de este método se utilizan los siguientes índices de claridad:

$$k_t(h) = \frac{I_g(h)}{I_0(h)} = \text{Relación entre las irradiancias global y extraterrestre}$$

$$k_{d0}(h) = \frac{I_{dif}(h)}{I_0(h)} = \text{Relación entre las irradiancias difusa y extraterrestre}$$

$$k_d(h) = \frac{I_{dif}(h)}{I_g(h)} = \text{Relación entre las irradiancias difusa y global}$$

Para la clasificación de días en función del grado de nubosidad se emplean las correlaciones entre k_{d0} - k_t y k_d - k_t . La representación conjunta de k_{d0} - k_t , para un lugar determinado, se puede ver en la figura 4.1.

4. Metodología.

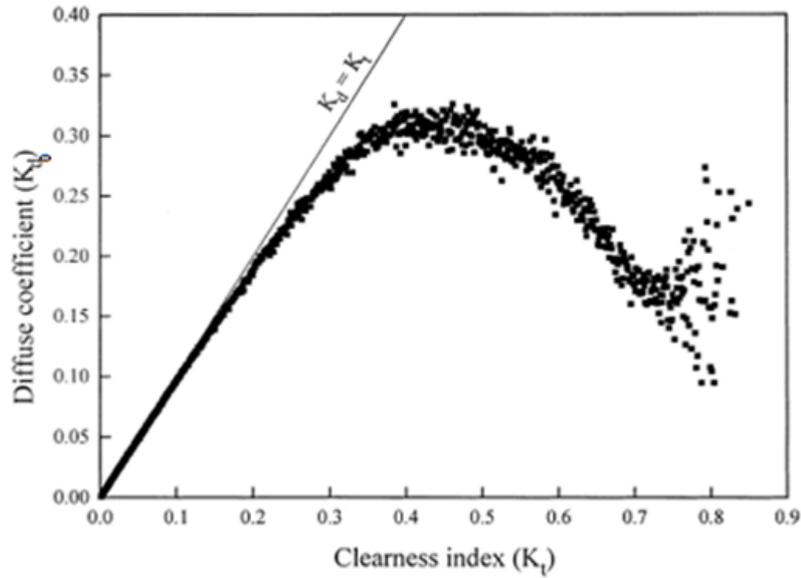


Figura 4. 1. Correlación k_{d0} - k_t horario

Si se analiza esta gráfica se puede comprobar que el índice de claridad varía prácticamente de forma lineal, con pendiente unidad, con el índice de difusa hasta un valor próximo a 0,15. Esto indica que bajo un cielo completamente cubierto la componente directa tiene un valor muy próximo a cero y además se observa que la dispersión de puntos en este caso es inexistente. Para valores del índice de claridad mayores de 0,15 la relación empieza a alejarse del comportamiento lineal y los puntos obtenidos se encuentran más dispersos debido a la variedad de estados de cielos nublados que se pueden dar. Para un índice de claridad mayor de 0,7 el grado de dispersión es importante.

De igual forma se puede analizar la correlación k_d - k_t , figura 4.2.

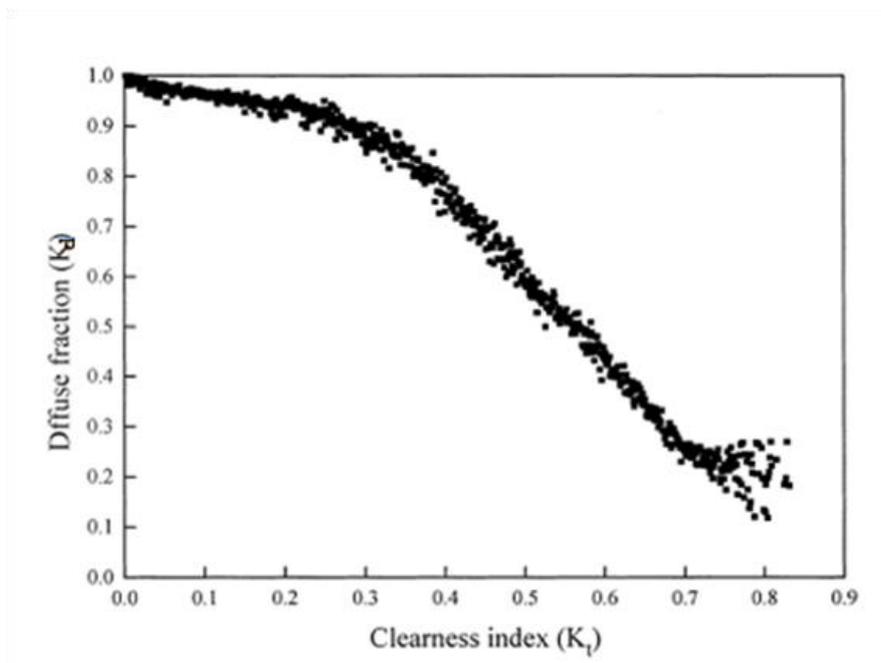


Figura 4. 2. Correlación k_d - k_t .

4. Metodología.

En esta gráfica se puede observar como el valor de la fracción difusa, k_d , es prácticamente igual a 1 en el primer tramo donde el índice de claridad es pequeño, $k_t < 0,15$. La dispersión de puntos es prácticamente inexistente. Esto se puede entender de nuevo como que el cielo está bastante cubierto de nubes y la irradiación global coincide prácticamente con la difusa. En el intervalo de k_t comprendido entre 0,15 y 0,7 el grado de dispersión aumenta. La fracción difusa va disminuyendo al aumentar el índice de claridad, lo cual indica que la componente directa de la radiación se vuelve dominante frente a la difusa a medida que el cielo se encuentra más despejado. Ya que la dispersión de k_d y k_{d0} se incrementa para un k_t mayor de 0,7, esto indica una combinación de día claro y parcialmente nublado más que un día totalmente claro. Se obtendría un valor de k_d del orden de 0,08 para un cielo totalmente despejado y aproximadamente 0,27 para un cielo de nubes y claros.

Análisis fractal de datos de irradiancia

El método de clasificación de días solares aplicando el análisis fractal de datos de irradiancia se basa en el algoritmo de Minkowski-Bouligand y pretende cuantificar las fluctuaciones aleatorias que se producen en la curva de irradiancia-tiempo como consecuencia de la nubosidad. De aquí se obtiene es una variable denominada dimensión fractal que indica la irregularidad objeto de análisis. Los fractales permiten modelar las formas de cualquier fenómeno natural y es por ello que resulta muy útil para cuantificar las irregularidades que se producen en la curva de irradiancia considerada.

Los resultados que a continuación se añaden se obtuvieron tras el análisis al aplicar el método de análisis fractal a tres días diferentes, clasificados a priori como día despejado, de nubes y claros y cubierto, se obtienen los resultados de la figura 4.3.

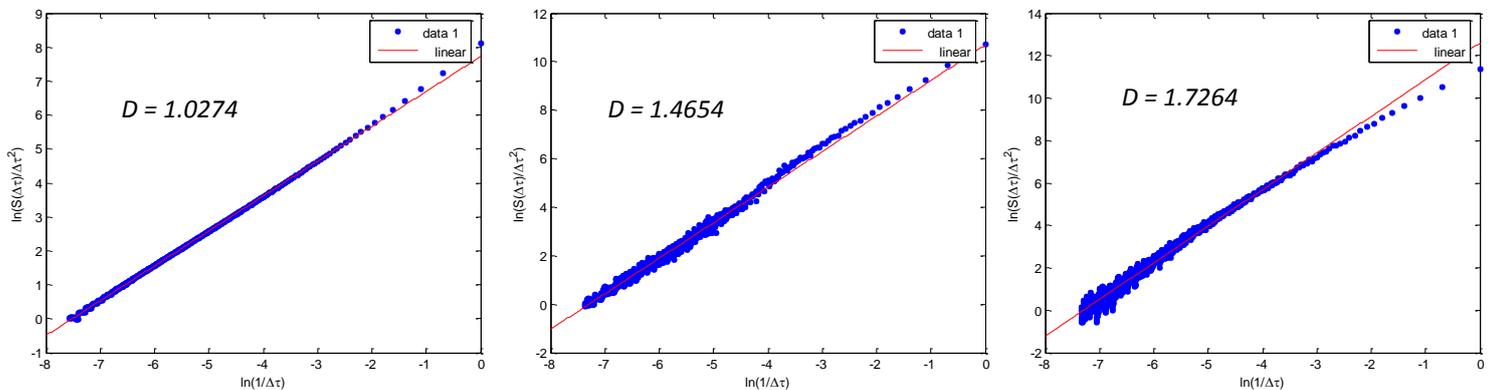


Figura 4. 3. Ajuste por mínimos cuadrados de los puntos obtenidos y dimensión fractal de sus rectas para: (a) día despejado. (b) día de nubes y claros. (c) día cubierto.

4. Metodología.

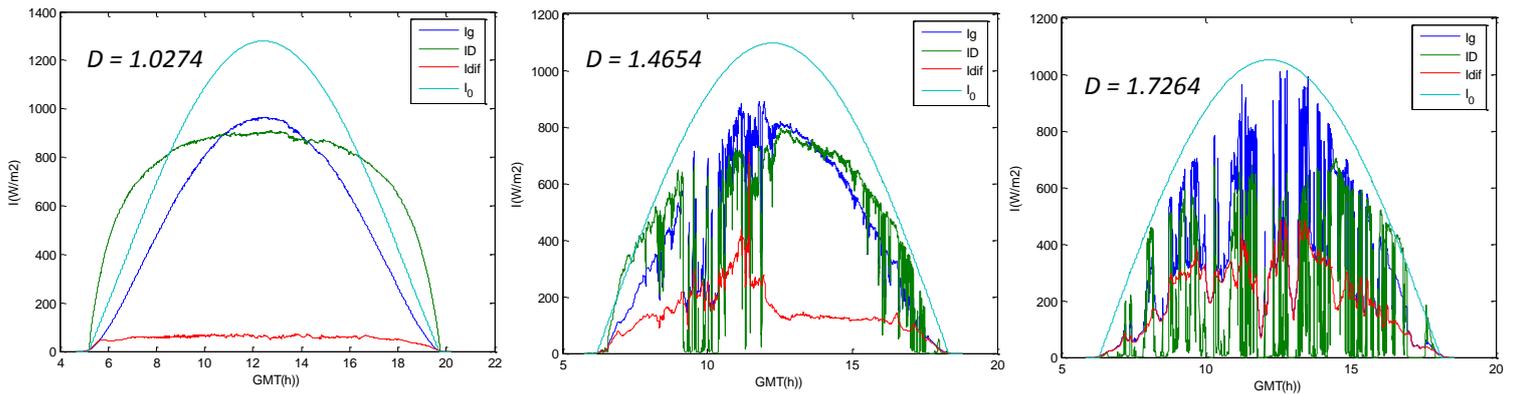


Figura 4. 4. Curvas de irradiancia y dimensión fractal correspondientes a: (a) día despejado. (b) día de nubes y claros. (c) día cubierto.

Tras analizar el conjunto de gráficas anteriores se obtiene cierta información. Se observa que la variable dimensión fractal adquiere valores dentro del intervalo 1 a 2. Cuando ésta toma valor unidad se trata de un día absolutamente despejado, mientras que el otro extremo se corresponde con días de elevadas fluctuaciones, es decir, días cubiertos. Descrito ambos métodos, las condiciones que se aplican para la clasificación de cada día son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 D \leq 1,15 \text{ y } \bar{k}_t \geq 0,5 & \rightarrow \text{Día despejado} \\
 1,6 \geq D > 1,15 \text{ y } \bar{k}_t \geq 0,5 & \rightarrow \text{Día nublado} \\
 \left. \begin{array}{l} D > 1,6 \\ \text{ó} \\ D \leq 1,6 \text{ y } \bar{k}_t < 0,5 \end{array} \right\} & \rightarrow \text{Día cubierto}
 \end{aligned}$$

El día despejado se caracteriza por tener una alta irradiación, representada por su alto valor de \bar{k}_t diario, y una pequeña o ninguna presencia de nubes reflejada en el bajo valor de su dimensión fractal. El día nublado se caracteriza por una alta irradiación y un valor medio de su dimensión fractal que deja ver la existencia de nubes. Por último el día cubierto se caracteriza por un valor elevado de la dimensión fractal que indica la presencia de nubes, o por un valor medio de la dimensión fractal y uno pequeño del \bar{k}_t diario indicando que no se producen muchas fluctuaciones en la curva irradiancia global-tiempo pero que su \bar{k}_t es bastante bajo debido a la presencia de un cielo cubierto y que por este motivo se obtiene un valor medio de su dimensión fractal.

4.1.2. Clasificación de días según tipo de hueco.

A la hora de trabajar con la base de datos del GTER, es frecuente encontrar diversos problemas relacionados con los archivos diarios. Esto puede suponer importantes problemas para el tratamiento de la información. Estos problemas generalmente son debidos a la no generación de archivos o de una determinada variable, presencia de huecos en los registros o medidas erróneas.

4. Metodología.

En cuanto a las causas de los diversos errores, uno de los casos más frecuentes es la falta de registros en los primeros o últimos instantes del día. Se debe generalmente a un cambio horario no actualizado en el sistema de adquisición de datos. Esta situación suele afectar también a los días posteriores al cambio horario. El sistema de adquisición de datos es también el causante de otros problemas, debido a paradas en éste o situaciones en las que deja de registrar valores. Otros de los motivos vinculados a los errores están relacionados con el calibrado de los aparatos de medidas. Relacionado con esto último, se detectan errores en los registros de irradiación difusa debido a desajustes en la banda de sombreado del piranómetro.

A continuación, se detalla la clasificación de los distintos huecos con los que se trabaja en este proyecto. Del mismo modo, se muestran algunas representaciones gráficas como ejemplo.

4.1.2.1. Días descartados.

Los días pertenecientes a este caso, presentan el problema de no poder corregirse, debido a la presencia de errores importantes. La clasificación de los distintos tipos de problemas que dan lugar a estos casos se muestran en la tabla 4.1.

DESCARTADO 1	Archivo no generado
DESCARTADO 2	Global y directa mal
DESCARTADO 3	Hueco principio de día > 1 h
DESCARTADO 4	Hueco final de día > 1 h
DESCARTADO 5	Hueco > 30 min

Tabla 4. 1. Clasificación de las distintas causas que generan días descartados.

Como se detalla en el apartado 4.5. *Corrección de días*, el proceso de corrección empleado en este caso, implica la comparación del valor de radiación global horizontal acumulada en estaciones cercanas a la estación con los registros correctos de la propia estación.

4.1.2.2. Días corregibles.

Los días clasificados como corregibles, son aquellos que tras aplicarle una metodología de rellenado de huecos correcta, se consideran válidos. Un día válido se define como aquel que tanto los registros de radiación global horizontal y directa normal son correctos y completos. Dentro de esta clasificación se encuentran cuatro casos distintos, cada uno con su metodología correspondiente.

Se describen cada una de las diferentes situaciones y se muestran en cada caso una gráfica como ejemplo representativo. Se observan las variables de radiación global horizontal, directa normal, difusa y la irradiación extraterrestre.

A. Días corregibles. Caso 1:

Los días pertenecientes a este caso disponen de registros de radiación correctos, tanto los de global horizontal como directa normal. Presentan el problema de un hueco al principio o final del día menor a una hora.

Se dividen pues, los casos según presenten el fallo en el orto o el ocaso. A su vez, dentro de esta subdivisión, se diferencia entre días claros y no claros, puesto que requieren de una metodología diferente, tabla 4.2.

4. Metodología.

Caso 1. A	Global correcta	Directa correcta	Hueco principio del día.	Día claro
Caso 1. B			Día no claro	
Caso 1. C			Hueco final del día.	Día claro
Caso 1. D			Día no claro	

Tabla 4. 2. Clasificación de los distintos casos en días corregibles - Caso 1.

Observando el registro del GTER desde 2000 a 2009 se aprecia como en la mayoría de estos casos, se han correspondido con días con cambio horario y los días posteriores. Es debido a la no actualización del sistema.

En la figura 4.5 se muestra un ejemplo representativo para el caso 1A, donde se observa la interrupción de medidas en los primeros instantes del día. Las variables que aparecen en las gráficas del presente capítulo se definen a continuación.

- I_{bn} : Valores de irradiación directa normal medidos en la estación del GTER.
- I_{g0} : Valores de irradiación global horizontal medidos en la estación del GTER.
- I_{dif} : Valores de irradiación difusa.
- I_o : Valores de irradiación extraterrestre.

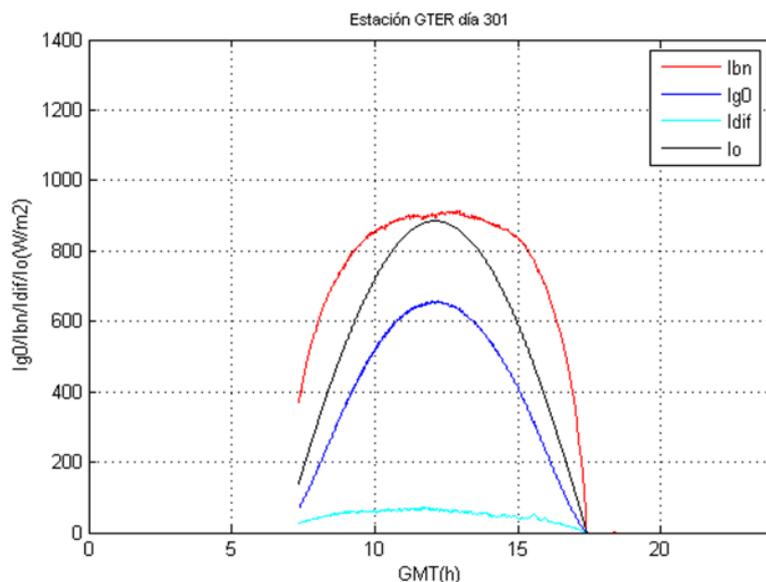


Figura 4. 5. Grafica diaria correspondiente al día 301 de 2007, caso 1a.

B. Días corregibles. Caso 2:

Este segundo grupo engloba los días en los que los registros de radiación directa normal no existen o son incorrectos. Los valores de radiación global horizontal son perfectamente válidos. Se muestra un ejemplo en la figura 4.6, donde se observa un mal registro de la radiación directa normal, consecuencia del mal funcionamiento del seguidor. El resto de variables se mantienen correctas.

4. Metodología.

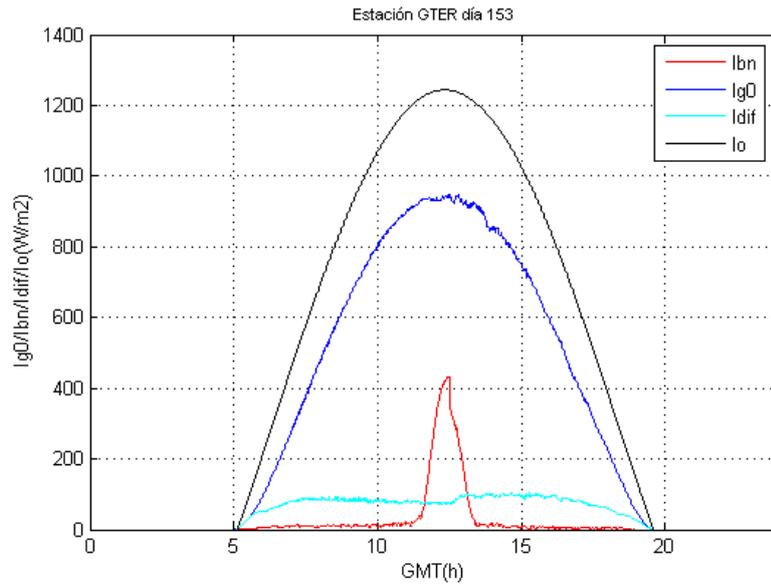


Figura 4. 6. Gráfica diaria correspondiente al día 153 del año 2004, caso 2.

C. Días corregibles. Caso 3:

Este grupo se puede considerar una combinación de los dos anteriores, en los que la radiación directa normal no existe o es incorrecta y la radiación global horizontal presenta un hueco al principio o final del día.

Al igual que en el primer caso, se diferencian cuatro casos, tabla 4.3, en función de la ubicación del hueco y la nubosidad diaria. También, se muestra como ejemplo la evolución de las distintas variables, figura 4.7, apreciando el error en el registro de radiación directa normal y la ausencia de medidas en las inmediaciones del orto.

Caso 3. A	Global correcta	Directa correcta	Hueco principio del día.	Día claro
Caso 3. B				Día no claro
Caso 3. C			Hueco final del día.	Día claro
Caso 3. D				Día no claro

Tabla 4. 3. Clasificación de los distintos casos en días corregibles - Caso 3.

4. Metodología.

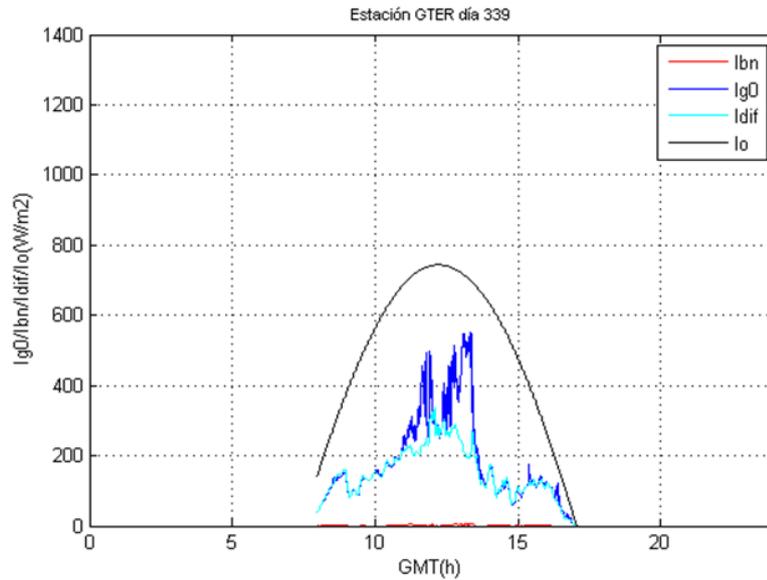


Figura 4. 7. Gráfica diaria correspondiente al día 339 del año 2005, caso 3b.

D. Días corregibles. Caso 4:

Este último caso trata con días en el que los registros de radiación global horizontal son incorrectos. Los valores de radiación directa normal son totalmente válidos. Como se visualiza en los registros del GTER en el intervalo de los años 2000-2009, este cuarto caso se presenta con menos frecuencia. Las medidas e instrumentación de radiación global presentan mayor fiabilidad que los de directa normal. Se muestra una gráfica representativa de este caso, figura 4.8, donde se observa la inexistencia de medidas de radiación global horizontal.

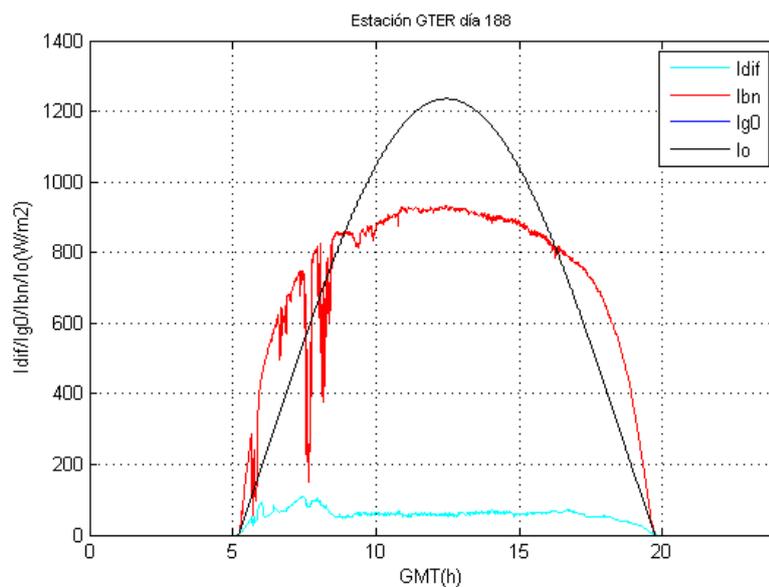


Figura 4. 8. Gráfica diaria correspondiente al día 188 del año 299, caso 4.

4. Metodología.

4.2. Revisión de años.

La metodología se inicia analizando la distribución de los distintos tipos de huecos en el conjunto de años estudiados. El objetivo es seleccionar un año base sobre el que simular de manera artificial los huecos. Para ello, se dispone de un registro con el número y tipo de huecos presentes entre los años 2000 y 2009. Se adjunta en la siguiente tabla el número de casos contabilizados por tipo y año, tabla 4.4.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Descartados	61	27	54	54	16	27	39	31	29	26
Caso 1	3	17	0	3	60	84	15	20	1	4
Caso 2	1	0	1	0	37	11	73	15	65	50
Caso 3	0	0	0	0	1	55	171	0	2	1
Caso 4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Σ (Casos 1 a 4)	6	17	1	3	98	150	259	35	68	105

Tabla 4. 4. Número de huecos agrupados por tipo y año en el periodo 2000-2009.

La característica fundamental que debe disponer el año seleccionable es de un alto número de días correctos con los que poder trabajar. Con días correctos se hace referencia a días en los que los datos de radiación no han sufrido correcciones previas. Se pretende calcular el error cometido con el rellenado de huecos, es decir, sobre los valores medidos. Los días con una corrección previa ya disponen de valores creados de manera sintética, alterando los valores originales. Se muestra en tabla 4.5 el número de días correctos por año, en el periodo 2000-2009.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Días correctos	299	321	310	308	252	188	67	299	269	234

Tabla 4. 5. Número de días correcto por año.

Una vez comentada la necesidad de disponer de un alto número de días correctos, se observan una serie de años candidatos para el análisis: el periodo de años 2000 - 2003 y 2007. Igualmente, teniendo en cuenta el incremento de la fiabilidad de las medidas como se comenta en el capítulo 3.2. *Descripción de la estación radiométrica del GTER*, conviene la elección de un año lo más reciente posible, debido a las mejoras en el mantenimiento de la estación.

Dado que para determinadas casos, difiere la metodología en función del grado de nubosidad, un último factor influyente es la disponibilidad de distintos tipos de días (días claros, no claros...) por año. El motivo es poder trabajar con un amplio grupo de días para los distintos casos. Se muestra en la tabla 4.6 para los años seleccionables, la clasificación del tipo de días para el conjunto de días correctos. Atendiendo a una distribución entre días claros y no claros más equitativa, y siendo el año más reciente, se toma como año base el 2007.

4. Metodología.

Año		2000	2001	2002	2003	2007
Nº días	Claros	116	118	93	118	120
	No Claros	183	203	217	190	179
[%]	Claros	38,80	36,76	30,00	38,31	40,13
	No claros	61,20	63,24	70,00	61,69	59,87

Tabla 4. 6. Clasificación de días correctos en días claros - no claros por año.

4.3. Homogeneización de archivos.

Una vez seleccionado el año base, se dispone a trabajar con el conjunto de archivos diarios. Los archivos presenta distinto número de filas en función del orto y ocaso correspondiente a cada día. En la figura 4.9, puede observarse como para dos días distintos, el primer valor GMT horario difiere.

Dia 42 Valores promedios cada 10 minutos:				Dia 248 Valores promedios cada 10 minutos:			
GMT	Ig0	Ig30	Ibn	GMT	Ig0	Ig30	Ibn
HH:MM	(W/m2)	(W/m2)	(W/m2)	HH:MM	(W/m2)	(W/m2)	(W/m2)
6: 0	0.00	0.00	0.00	5: 0	0.00	0.00	0.00
6:10	0.00	0.00	0.00	5:10	0.00	0.00	0.00
6:20	0.00	0.00	0.00	5:20	0.00	0.00	0.00
6:30	0.00	0.00	0.00	5:30	0.00	0.00	0.00
6:40	0.00	0.00	0.00	5:40	0.00	0.00	0.00
6:50	0.00	0.00	0.00	5:50	0.00	0.65	0.02
7: 0	0.00	0.06	0.00	6: 0	1.49	2.88	0.29
7:10	0.00	1.09	0.00	6:10	9.23	9.42	2.56
7:20	1.05	3.50	0.00	6:20	22.27	20.32	18.94
7:30	6.41	8.56	0.89	6:30	39.19	34.93	48.61
7:40	24.29	22.74	215.96	6:40	59.75	54.05	89.77
7:50	47.11	45.29	340.31	6:50	82.85	77.44	135.80
8: 0	74.20	71.03	434.79	7: 0	107.09	102.96	175.56
8:10	103.14	98.95	506.90	7:10	133.95	132.25	215.45
8:20	133.68	129.17	571.06	7:20	165.21	166.93	262.72
8:30	165.67	161.67	628.26	7:30	196.15	201.59	294.63
8:40	197.32	193.78	673.77	7:40	229.65	238.82	326.84

Figura 4. 9. Extractos de ficheros de radiación correspondiente a los días 42 y 248 de 2007.

Puesto que posteriormente se va a trabajar con matrices debido a su sencillez en el manejo con programas informáticos, es de ayuda que estas dispongan de un tamaño uniforme. De este modo, previo a trabajar con huecos en los archivos, se realiza la homogeneización de sus tamaños. De esta forma, se facilita el tratamiento de los archivos con los programas informáticos. Este paso se realiza mediante un programa desarrollado en el entorno de MATLAB. El resultado de la aplicación del programa se muestra a continuación, figura 4.10. Los nuevos archivos disponen de una matriz de 144 filas correspondientes a todas las horas del día en escala 10-minutal.

4. Metodología.

Valores promedios cada 10 minutos:

GMT HH:MM	Ig0 (W/m2)	Ig30 (W/m2)	Ibn (W/m2)
0:00	0.00	0.00	0.00
0:10	0.00	0.00	0.00
0:20	0.00	0.00	0.00
0:30	0.00	0.00	0.00
0:40	0.00	0.00	0.00
0:50	0.00	0.00	0.00
1:00	0.00	0.00	0.00
1:10	0.00	0.00	0.00
1:20	0.00	0.00	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
22:30	0.00	0.00	0.00
22:40	0.00	0.00	0.00
22:50	0.00	0.00	0.00
23:00	0.00	0.00	0.00
23:10	0.00	0.00	0.00
23:20	0.00	0.00	0.00
23:30	0.00	0.00	0.00
23:40	0.00	0.00	0.00
23:50	0.00	0.00	0.00

Figura 4. 10. Extracto de fichero de radiación con estructura modificada correspondiente al día 248 de 2007.

4.4. Distribución de huecos.

En el presente capítulo se define la distribución que van a disponer los distintos huecos sobre el año que se trabaja. Con el fin de caracterizar esta distribución, se realiza un análisis del comportamiento de los casos en el periodo estudiado, años 2000-2009, tabla 4.7. Un patrón observable, es la aparición de huecos en el entorno del orto y el ocaso para situaciones de cambio horario. Esta circunstancia ocurre un máximo de dos veces al año, por lo que no tiene mucha influencia a la hora de determinar una distribución anual. A parte de este hecho, no se observa ninguna tendencia. La existencia de huecos sigue un comportamiento aleatorio. Si bien hay que destacar que los distintos casos difieren en número. En este sentido, el conjunto de días descartados es el grupo más numeroso. En el lado opuesto, se tienen los errores en las valores de radiación global horizontal, cuarto caso, conformando solo un 4,70 % del total.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total	%total
Descartados	61	27	54	54	16	27	39	31	29	26	364	32,91
Caso 1	3	17	0	3	60	84	15	20	1	4	207	18,72
Caso 2	1	0	1	0	37	11	73	15	65	50	253	22,88
Caso 3	0	0	0	0	1	55	171	0	2	1	230	20,80
Caso 4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	50	52	4,70

Tabla 4. 7. Distribución estadística de los distintos casos en el periodo 2000-2009.

4. Metodología.

Por tales motivo, y tras una revisión bibliográfica de artículos y estudios en la materia, en los cuales la distribución se realiza generalmente al azar [2] [3] [4], se opta por realizar el reparto de huecos de un modo aleatorio. Para ello, se procede a la creación de dos matrices con valores generados al azar entre 1-5. Estos valores se corresponden con cada uno de los cinco tipos de errores que se pueden presentar, tabla 4.8. Se opta por dos matrices puesto que con el aumento el número de estas implica que se solapen un gran número de días, y con una sola matriz se dispone de un numero bajo de casos.

Valor	Caso
1	Días corregibles. Caso 1.
2	Días corregibles. Caso 2.
3	Días corregibles. Caso 3.
4	Días corregibles. Caso 4.
5	Días descartados.

Tabla 4. 8. Identificación valores para la generación de matrices aleatoria.

El tamaño de la matriz viene definido por el número de días correctos que dispone el año, puesto que los días ya corregidos se descartan para trabajar. Para el año 2007, el número de días válidos, como se mostraba en la tabla 4.5, es de 299. Se muestra a modo de ejemplo un extracto de una de las dos matrices generadas, tabla 4.9. Según este ejemplo, el primer día contabilizado como valido dispone con un hueco del caso 3.

Día	Caso
1	3
2	5
3	2
4	2
5	2
6	1
7	1
8	2
9	3
10	5
11	5
12	2
...	...
299	2

Tabla 4. 9. Extracto de matriz generada para la distribución de huecos.

La distribución de estos valores en la matriz trata de ajustar la frecuencia presentada por cada caso en el periodo 2000-2009. Se fija la probabilidad de que se presente el valor fijado a cada hueco, en función del porcentaje sobre el total de casos que presentan estos en el intervalo de 2000 a 2009. El objetivo es asimilar la distribución en número de casos a la acontecida en el periodo real estudiado. De este modo, los tipos de huecos que más se han presentado en la base de datos, disponen de un mayor número de casos en nuestra distribución. En la figura 4.11, se muestran los porcentajes para cada tipología entre los años 2000-2009, tomados para guiar el proceso.

4. Metodología.

Porcentajes distribución de los tipos de huecos, 2000-2009.

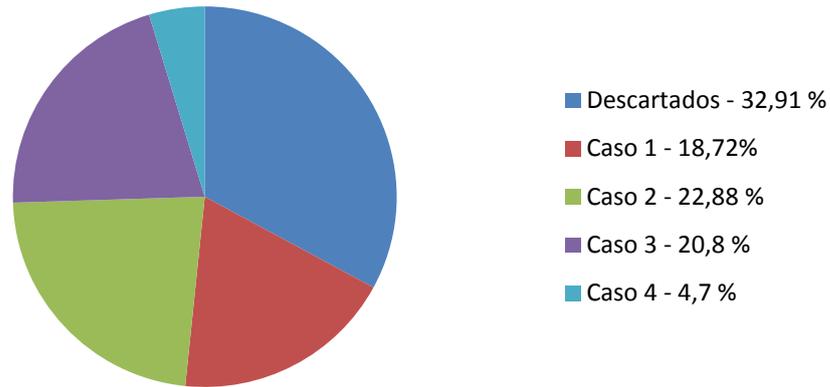


Figura 4. 11. Distribución gráfica de los distintos tipos de casos en el periodo 2000-2009.

De la combinación de dos de estas matrices, se obtiene la distribución final a lo largo del año de los huecos. Se muestra a continuación, tabla 4.10. Es importante destacar que se mantiene el tamaño de la matriz anterior, 299 filas, donde no se contabilizan los días descartados y corregidos en el año base. A modo explicativo, en el cuarto día del año, se simulan huecos de los casos 2 y 3.

Días correctos	Matriz 1	Matriz 2
1	3	5
2	5	3
3	2	5
4	2	3
5	2	5
6	1	2
7	1	5
8	2	1
9	3	2
10	5	5
11	5	1
...
365	1	1

Tabla 4. 10. Extracto de la distribución del tipo de hueco por día.

Se muestra gráficamente, figura 4.12, el número de días por caso resultado de la distribución.

4. Metodología.

Porcentajes distribución generada de huecos.

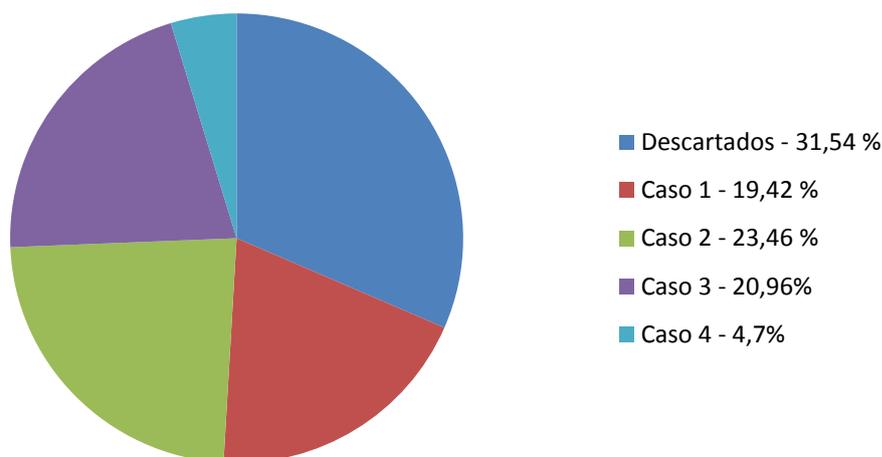


Figura 4. 12. Distribución gráfica de los distintos tipos de casos sobre el año base.

Se puede observar como el reparto de huecos se asemeja en el porcentaje de los distintos casos, a la distribución en el periodo de años 2000-2009, figura 4.11.

	Descartados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Nº casos creados	164	101	122	109	24
% total creados	31,54	19,42	23,46	20,96	4,62
% 2000-2009	32,91	18,72	22,88	20,80	4,7

Tabla 4. 11. Número de huecos distribuidos por caso.

Para concluir, se recuerda que los casos 1 y 3 se clasifican según la localización del hueco en el orto o en el ocaso del día. Para cada uno de los días que la distribución determina la simulación de uno de estos casos, se procede a generar tanto un hueco en el orto como en el ocaso. Con esto se pretende no reducir el número de días de estudio para cada situación.

4.5. Generación de huecos.

La existencia de huecos en los archivos diarios de radiación genera problemas a la hora de trabajar con programas informáticos. Para la simulación de huecos, a excepción de la tipología de día descartado, se opta por rellenar los tramos que se consideran erróneos con ceros. Esto ayuda a identificar estos problemas gráficamente. Se detalla a continuación el proceso seguido para la generación de huecos para cada uno de los casos:

Días descartados.

Para el conjunto de días descartados, se consideran como inexistentes los archivos de estos casos, puesto que realmente este grupo se corresponden con días en los que el archivo no se ha generado o dispone de valores totalmente erróneos.

Días corregibles. Caso 1:

Este primer caso, se corresponde con huecos en el orto o el ocaso de duración máxima de una hora. Al trabajarse con archivos 10-minutales, implica que estos huecos de corta duración

4. Metodología.

correspondan con un número escasos de valores. Se fija trabajar con huecos con la duración límite fijada, una hora.

A través de un programa desarrollado en el entorno de MATLAB, se generan los huecos. Para ello, se requiere de un documento adicional que alberga los valores horarios para los ortos y ocaso de los días del año, figura 4.13. Se busca poder identificar la ubicación de estos en la matriz de datos. A partir de estos datos, se realiza la búsqueda de estos valores, en la columna del vector horario de la matriz. Una vez alcanzada la coincidencia de ambos valores, se obtienen las coordenadas de la posición del orto y el ocaso en la matriz. Se rellenan de ceros la fila correspondiente, y las cinco anteriores (ocaso) o posteriores (orto), identificado con un hueco de duración una hora.

1	A	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Dia del año	HS	Et	Γ	GMTps	GMTss	Sod(h)	Hora orto	Min orto	Hora ocaso	Min ocaso
31	30	5,058566021	-12,8191774	28,60273973	17,67288564	7,555753601	10,11713204	7	30	17	40
32	31	5,07455348	-13,0054066	29,5890411	17,69197692	7,542869964	10,14910696	7	30	17	40
33	32	5,090774904	-13,1790974	30,57534247	17,71109319	7,529543387	10,18154981	7	30	17	40
34	33	5,107221697	-13,3401446	31,56164384	17,73022411	7,515780713	10,21444339	7	30	17	40
35	34	5,123885381	-13,4884569	32,54794521	17,74935966	7,501588901	10,24777076	7	30	17	40
36	35	5,140757608	-13,6239575	33,53424658	17,76849023	7,486975017	10,28151522	7	30	17	50
37	36	5,157830169	-13,7465836	34,52054795	17,78760656	7,471946224	10,31566034	7	30	17	50
38	37	5,175094996	-13,8562867	35,50684932	17,80669977	7,456509783	10,35018999	7	30	17	50
39	38	5,192544174	-13,9530328	36,49315068	17,82576139	7,44067304	10,38508835	7	30	17	50
40	39	5,210169942	-14,036802	37,47945205	17,84478331	7,424443426	10,42033988	7	30	17	50
41	40	5,2279647	-14,1075889	38,46575342	17,86375785	7,407828449	10,4559294	7	20	17	50
42	41	5,245921013	-14,1654023	39,45205479	17,88267772	7,390835692	10,49184203	7	20	17	50
43	42	5,264031612	-14,2102652	40,43835616	17,90153603	7,373472808	10,52806322	7	20	17	50
44	43	5,282289399	-14,2422149	41,42465753	17,92032631	7,355747516	10,5645788	7	20	18	0
45	44	5,300687449	-14,2613029	42,4109589	17,9390425	7,3376676	10,6013749	7	20	18	0
46	45	5,319219008	-14,2675946	43,39726027	17,95767892	7,319240901	10,63843802	7	20	18	0
47	46	5,3378775	-14,2611693	44,38356164	17,97623032	7,300475323	10,675755	7	20	18	0
48	47	5,356656519	-14,2421204	45,36986301	17,99469186	7,281378821	10,71331304	7	20	18	0
49	48	5,375549839	-14,2105548	46,35616438	18,01305909	7,261959408	10,75109968	7	20	18	0
50	49	5,394551401	-14,1665929	47,34246575	18,03132795	7,242225146	10,7891028	7	10	18	0
51	50	5,413655325	-14,1103684	48,32876712	18,0494948	7,222184149	10,82731065	7	10	18	0
52	51	5,432855896	-14,0420286	49,31506849	18,06755637	7,20184458	10,86571179	7	10	18	0

Figura 4. 13. Extracto archivo Excel con valores del orto y ocaso diario.

Días corregibles. Caso 2:

En este grupo de días, las medidas de irradiancia directa normal son erróneas. A través de un nuevo programa realizado en el entorno de MATLAB, se rellena de ceros la columna correspondiente a la componente directa normal.

Días corregibles. Caso 3:

Siendo este caso una combinación de los anteriores, se aplican los dos procesos descritos en los dos casos anteriores.

Días corregibles. Caso 4:

Para este último caso, los valores de radiación global horizontal son erróneos. El proceso es similar al descrito para el caso 2, con la diferencia de que se sustituyen por ceros los datos de la columna que alberga los valores de radiación global horizontal.

Se muestra a continuación un extracto del archivo con hueco simulado para el caso 3, con el quedan ejemplificado lo descrito en los cuatro casos anteriores: valores erróneos en una variable completa y huecos de una hora, figura 4.14.

4. Metodología.

	6:30	0.00	0.00	0.00
	6:40	0.00	0.00	0.00
	6:50	0.00	0.00	0.00
	7:00	0.00	0.00	0.00
	7:10	0.00	0.00	0.00
	7:20	0.00	0.00	0.00
Orto	7:30	0.00	0.00	0.00
	7:40	0.00	0.00	0.00
	7:50	0.00	0.00	0.00
	8:00	0.00	0.00	0.00
	8:10	0.00	0.00	0.00
	8:20	0.00	0.00	0.00
	8:30	65.17	67.14	0.00
	8:40	68.15	60.83	0.00
	8:50	55.28	46.17	0.00
	9:00	38.99	32.53	0.00
	9:10	51.27	48.74	0.00
	9:20	92.48	78.90	0.00
	9:30	86.30	75.29	0.00
	9:40	120.33	104.58	0.00
	9:50	140.46	121.74	0.00
	10:00	168.31	138.58	0.00
	10:10	176.77	145.69	0.00
	10:20	159.97	123.89	0.00
	10:30	94.96	75.98	0.00

Figura 4.14. Extracto de fichero de radiación con hueco generado artificialmente, caso 3a.

4.6. Corrección de días.

El objetivo principal de este proyecto es cuantificar los errores que se producen con la metodología de rellenado de huecos del GTER. Para ello, se reproducen los mismos procedimientos desarrollados en [1]. Para cada uno de los casos ya descritos, se aplica la metodología en los huecos generados previamente de manera artificial. En este capítulo, se revisan las técnicas de rellenado de huecos empleadas.

A su vez, se muestran las representaciones gráficas diarias, resultado de la simulación del proceso. Se visualizan las evoluciones de las variables de irradiación directa normal y global horizontal, tanto los valores medidos en la estación como los calculados sintéticamente. Para el cuarto caso, donde excepcionalmente, el proceso emplea valores de radiación difusa, se representan también esta variable.

4.6.1. Descartados.

Para la corrección de los días pertenecientes a este grupo se recurre a la base de datos del sistema de información agroclimática para el regadío (SIAR) [5]. En esta, se pueden consultar datos de radiación solar de diversas estaciones radiométricas meteorológicas españolas. Además se incluyen parámetros como la temperatura y la humedad del aire, la velocidad y dirección del viento y las precipitaciones. La base de datos del SIAR aporta el valor diario acumulado de radiación global horizontal. Dada la ubicación del GTER, se estudian las estaciones de la Rinconada, Guillena y Sanlúcar La Mayor por ser las más cercanas, 8,5 Km, 12,5 Km y 22 Km respectivamente.

4. Metodología.

Con estas tres estaciones seleccionadas, es necesaria la aplicación de un método que permita identificar la más adecuada para el análisis. Se representan los datos de radiación global horizontal de las tres estaciones frente a los de la estación del GTER para el año 2007, año sobre el que se trabaja. Posteriormente se calculan los errores correspondientes. Se muestran las tres representaciones, figuras 4.15 a 4.17.

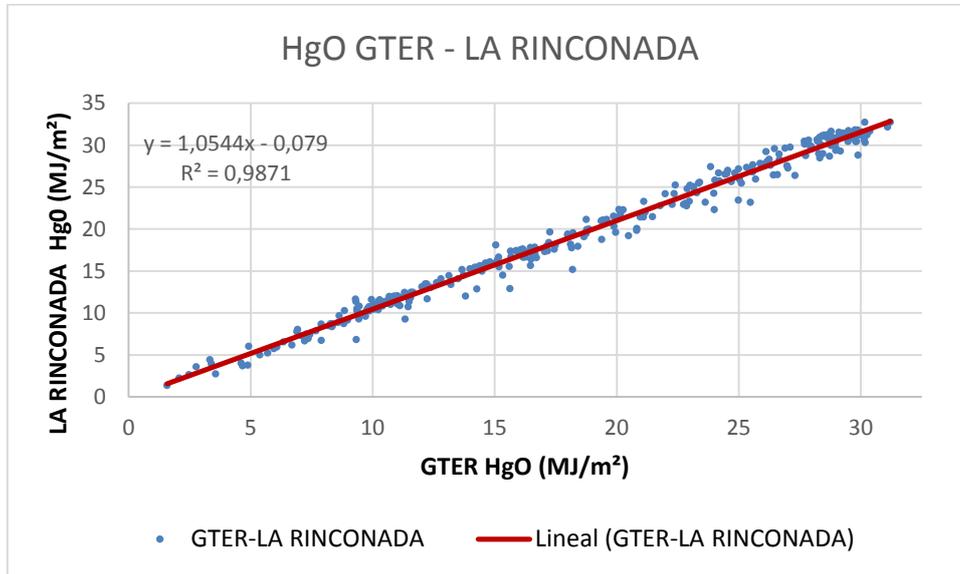


Figura 4. 13. Comparación HgO GTER - La Rinconada.

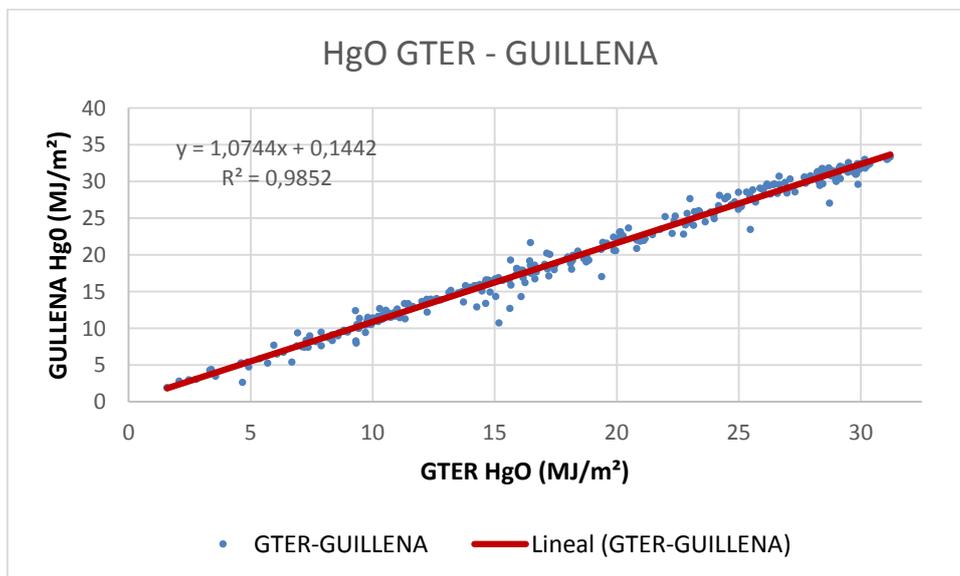


Figura 4. 14. Comparación HgO GTER - Guillena.

4. Metodología.

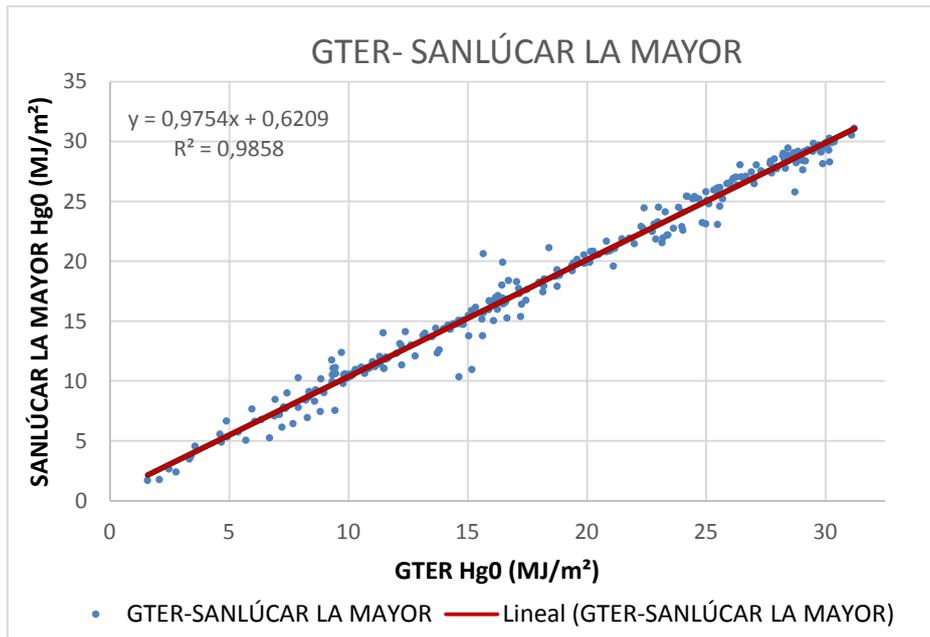


Figura 4. 15. Comparación HgO GTER - Sanlúcar La Mayor.

El ratio GTER-estación SIAR se muestra a continuación, tabla 4.12, para el año de referencia.

AÑO	ERROR ESTACIÓN SIAR/GTER (%)		
	Sanlúcar la Mayor	La Rinconada	Guillena
2007	2,46	5,44	7,44

Tabla 4. 12. Error estaciones SIAR-GTER para el año 2007.

A la vista de los resultados, se selecciona como estación de referencia la de Sanlúcar La Mayor al presentar el menor error. El proceso para la sustitución de días, acorde con la metodología empleada, consiste en escalar el valor diario de radiación de los datos del SIAR, para adaptarlo a la estación del GTER. Con esto se obtiene un valor objetivo. Para la elección del día que sustituye al hueco, se compara este valor objetivo con los valores de radiación global acumulada para días perfectos desde tres días posteriores y anteriores, al día descartado, a lo largo de los 10 años. Se debe cumplir como condición una diferencia máxima entre el valor conseguido y el objetivo del 5%. En el caso excepcional de no encontrar un valor que cumpla la condición descrita, se amplía los días de búsqueda a cinco. De los 164 días tratados, hay que destacar que en 8 de ellos no se logra conseguir el objetivo fijado. Aunque generalmente el valor en estos casos es ligeramente superior al 5%, se hallan tres errores destacables, tabla 4.12.

Da juliano	Valor objetivo [kWh/m ²]	Valor conseguido [kWh/m ²]	Error absoluto [kWh/m ²]	Error relativo [%]
222	6,78	4,74	2,04	55,96
252	2,99	2,56	0,43	21,97
255	3,00	2,56	0,44	20,83

Tabla 4. 13. Días descartados con errores elevados.

4. Metodología.

Estos errores elevados se identifican con días cubiertos en el periodo estival. Por este motivo, el conjunto de días seleccionables para la sustitución generalmente presentan valores de radiación acumulada claramente superior. Una vez seleccionado el día, se emplean sus registros diarios de radiación para sustituir el día descartado.

4.6.2. Días corregibles.

A. Días corregibles. Caso 1:

Como se detalla en el apartado 4.1.2 se tienen cuatro situaciones distintas para el grupo de días corregibles, según sea la localización del hueco al principio o final del día, o si se trata de un día claro o no. La metodología de rellenado de huecos diferencia para un día claro y no claro. Se describe el procedimiento a aplicar en ambos casos.

Metodología días claros.

El proceso empleado para días claros no depende de si la posición del hueco se localiza en el inicio o final del día. Se detalla solo el método aplicado para huecos en el orto.

En primer lugar se genera un vector de 6 filas que almacene los valores para el rellenado del hueco. El número de filas del vector está determinada por la duración del hueco (1 hora) y la frecuencia 10-minutal del registro de datos. Nuevamente, se identifica el valor del orto para el día en cuestión, siguiendo los pasos detallados en 4.4. *Generación de huecos*.

Dicho vector dispone de tres filas, que albergan el vector tiempo y los vectores con los valores de radiación global y directa. En referencia al vector tiempo, el primer valor coincidirá con el orto, mientras que el resto se calculan mediante:

$$hora(j) = hora(j - 1) + 1/6 \quad [\text{Ec. 5. 1}]$$

Previo a la obtención de los valores de radiación global y directas asociadas al vector, es necesario el cálculo de una serie de variables, cuyo cálculo queda detallado en el capítulo 3.1, ángulo horario (ω), ángulo cenital (Θ), altura e índice de claridad instantáneo, M_t .

Una vez se calculan las variables anteriores, se procede al cálculo de la radiación global horizontal instantánea:

$$I_g = I_o \cdot A \cdot \sin(\alpha) \quad [\text{Ec. 4. 2}]$$

Siendo el valor A:

$$A = \frac{M_t(1)}{\sin(\alpha(1))} \quad [\text{Ec. 4. 3}]$$

$M_t(1)$ hace referencia al índice de claridad instantáneo para el primer valor registrado.

4. Metodología.

Para el cálculo de la radiación directa normal, se utilizará el modelo para días despejados de ASHRAE (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado) [6].

$$ID = CA \cdot \exp [-CB \cdot \sec (\theta)] \quad [\text{Ec. 4. 4}]$$

Siendo CA y CB dos constantes dadas por las siguientes expresiones:

$$CA = \frac{ID(1)}{\exp [-CB \cdot \sec (\theta(3))]} \quad [\text{Ec. 4. 5}]$$

$$CB = \frac{\log [ID(3)/ID(1)]}{[\sec(\theta(1)) - \sec(\theta(3))]} \quad [\text{Ec. 4. 6}]$$

Donde 1 y 3 hacen referencia al primer y tercer instante del que se disponen medidas de radiación.

Una vez completado el relleno de huecos, tras una inspección visual de los resultados se observan en determinados casos picos de irradiación claramente erróneos. Este hecho se debe a alturas solares muy bajas en el entorno del orto y del ocaso. En estas situaciones, se linealiza desde el orto hasta el primer valor registrado con altura superior a 5°. Se imponen como condiciones iniciales el valor nulo para el orto.

Metodología para días no claros.

La metodología para el caso de días no claros requiere de un proceso más simplificado que el descrito anteriormente. Se crea nuevamente un vector de 6 filas que contenga el vector tiempo y los valores de radiación empleados para la corrección. Para la obtención los valores de radiación directa normal y global horizontal se linealiza, tomando como punto inicial el orto, e imponiéndose la condición de los valores de radiación en ese instante.

En las siguientes representaciones gráficas se muestran los resultados de las simulaciones, para las cuatro situaciones distintas: casos 1a, 1b, 1c y 1d. En estas, se ha ampliado el eje horario a las inmediaciones del hueco para una mayor claridad en la visualización. Se muestran los valores estimados sintéticamente para radiación directa normal y global horizontal frente a sus registros originales de la base de datos, figuras 4.16 a 4.19 respectivamente. Las distintas variables que se pueden apreciar en las gráficas que se muestran en el capítulo son:

- I_{bn}Orig: Valores de irradiación directa normal originales, medidos en la estación del GTER.
- I_{g0}Orig: Valores de irradiación global horizontal originales, medidos en la estación del GTER.
- I_{bn}: Valores de irradiación directa normal originales estimados.
- I_{g0}: Valores de irradiación global horizontal originales estimados.

4. Metodología.

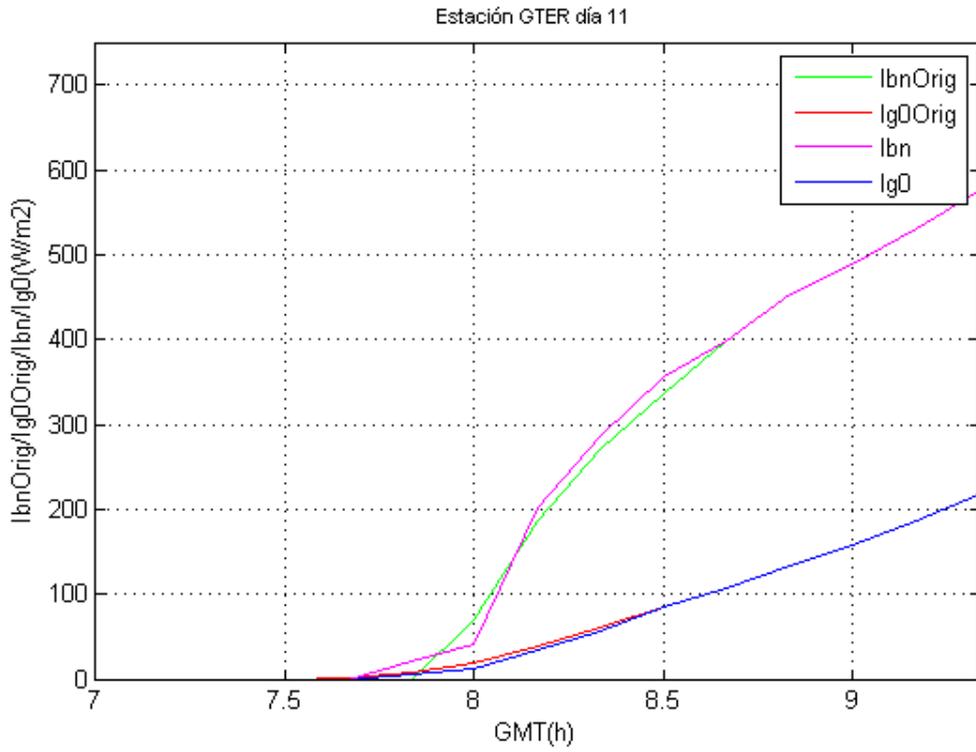


Figura 4. 16. Gráfica radiación estimada - real para hueco orto correspondiente al día 11 del año 2007, caso 1a.

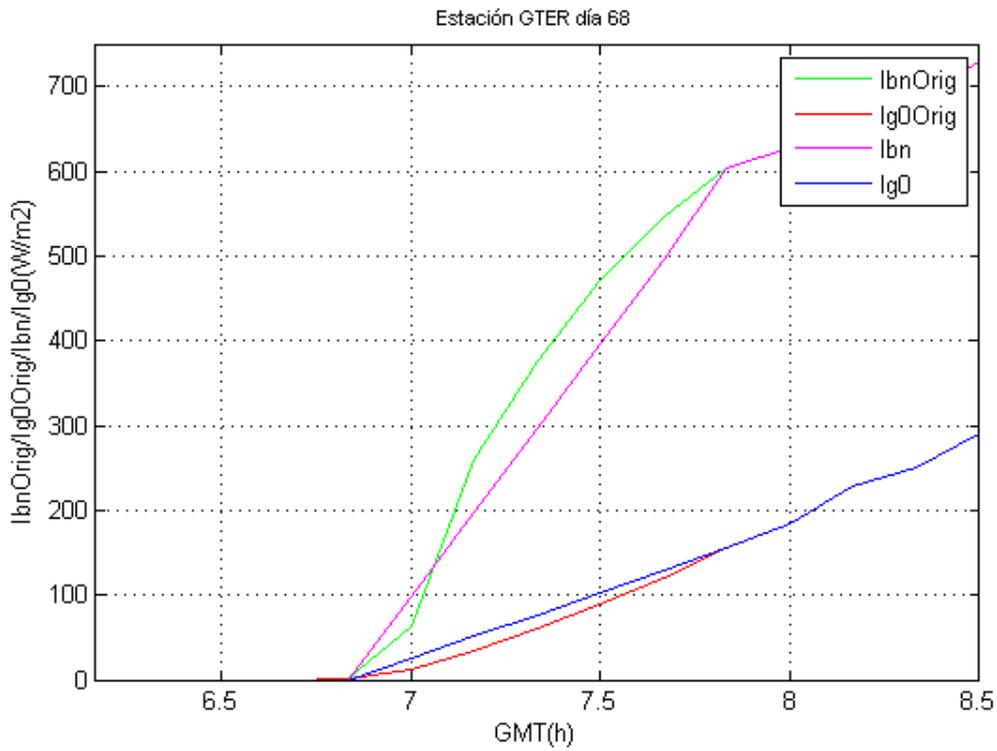


Figura 4. 17. Gráfica radiación estimada - real para hueco orto correspondiente al día 68 del año 2007, caso 1b.

4. Metodología.

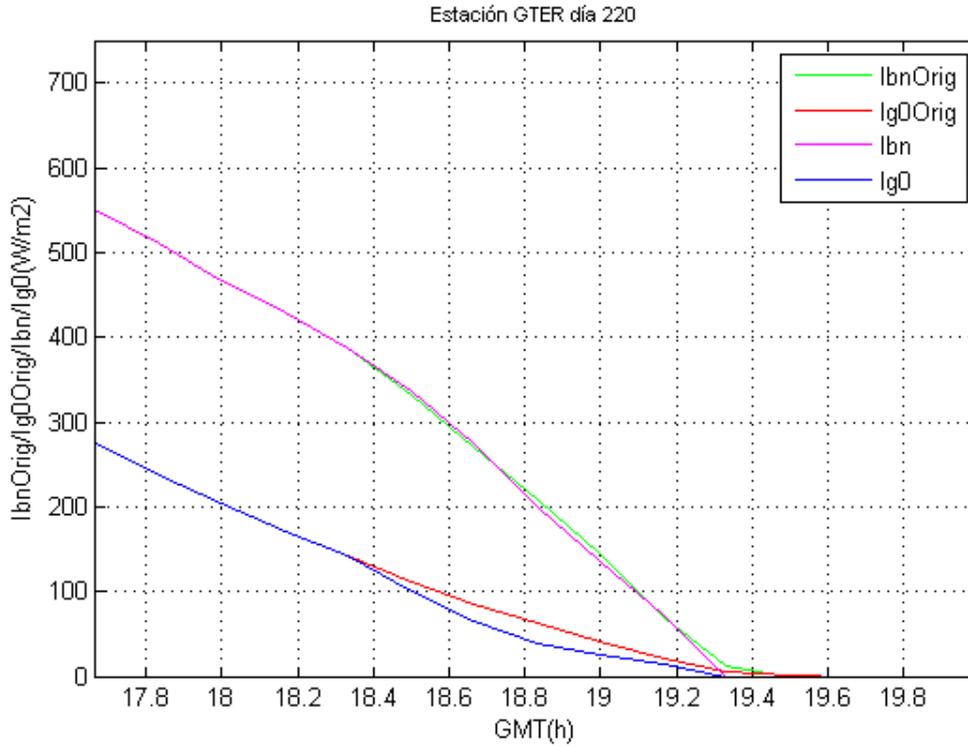


Figura 4. 18. Gráfica radiación estimada - real para hueco ocaso correspondiente al día 220 del año 2007, caso 1c.

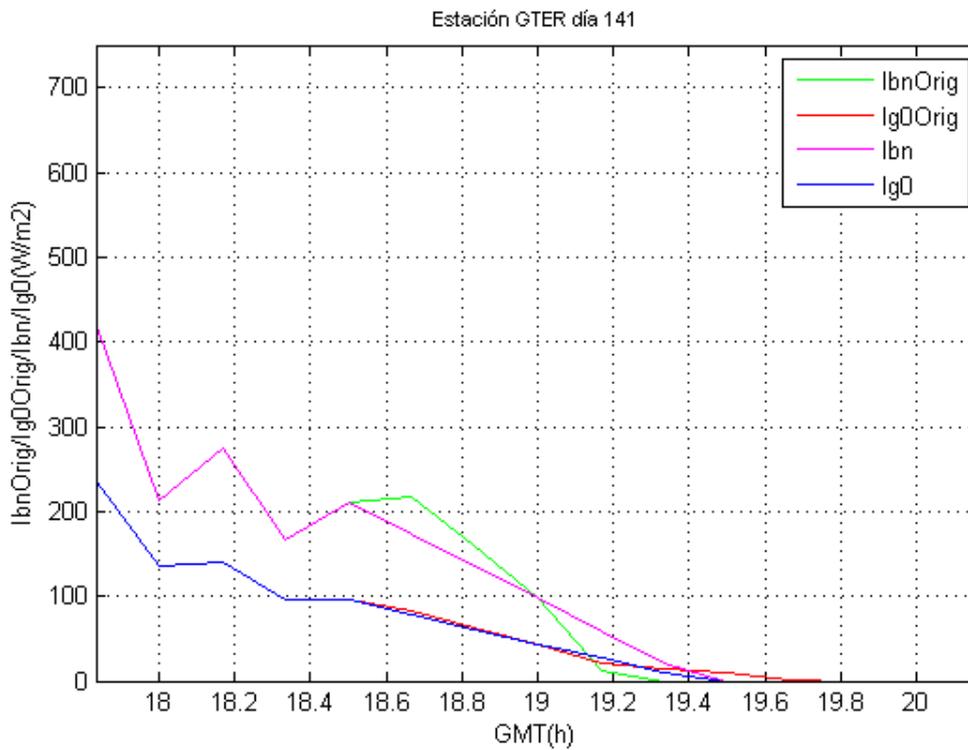


Figura 4. 19. Gráfica radiación estimada - real para hueco ocaso correspondiente al día 141 del año 2007, caso 1d.

4. Metodología.

A la vista de las gráficas, se observa como la metodología de día claro, figuras 4.18 y 4.20, consigue simular de manera más precisa las curvas de radiación. En los días no claros, figuras 4.19 y 4.21, debido a la linealización, cualquier cambio en las pendientes de las curvas de radiación originales produce importantes desviaciones.

B. Días corregibles. Caso 2:

A modo de recordatorio con lo detallado en apartados anteriores, el grupo de días pertenecientes a este segundo caso se caracterizan por tener valores de radiación directa normal incorrectos o inexistentes. Los valores de global horizontal son correctos. Por tanto, se disponen a corregirse los valores de radiación directa normal.

Nuevamente, se procede al cálculo de las variables necesarias de radiación como la altura solar, el ángulo horario o el índice de claridad instantáneo. Posteriormente se hacen uso de las correlaciones Md-Mt, obtenidas de forma experimental. Éstas permiten la generación sintética de los valores radiación directa. Las correlaciones han sido extraídas de [1]. Éstas están definidas por la siguiente ecuación, tabla 10.

$$M_d = \rho_1 \cdot (M_t)^2 + \rho_2 \cdot M_t + \rho_3 \quad [\text{Ec. 4. 7}]$$

Los coeficientes vienen dados en función del mes y tipo de día, tabla 4.13.

	DÍAS DESPEJADOS			DÍAS NUBLADOS			DÍAS CUBIERTOS		
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_1	ρ_2	ρ_3
ENERO	0.5565	-1.687	1.093	0.8031	-2.254	1.453	-1.395	0.1232	1.022
FEBRERO	0.9407	-2.296	1.340	0.2054	-1.599	1.350	-1.094	-0.1017	1.049
MARZO	0.6636	-1.948	1.234	0.2829	-1.700	1.352	-0.9648	-0.1226	1.043
ABRIL	0.5001	-1.622	1.075	0.9336	-2.350	1.451	-0.4673	-0.6693	1.126
MAYO	0.7657	-2.095	1.291	0.3842	-1.771	1.345	-0.3125	-0.7993	1.150
JUNIO	0.6557	-2.014	1.296	0.4238	-1.881	1.379	-0.03367	-1.180	1.232
JULIO	0.7721	-2.192	1.369	0.2621	-1.634	1.284	0,06205	-1,185	1,188
AGOSTO	0.4852	-1.863	1.268	0.7417	-2.159	1.411	-0.04233	-1.119	1.200
SEPTIEMBRE	0.6407	-1.951	1.250	0.4913	-1.894	1.349	-0.5784	-0.5487	1.119
OCTUBRE	1.327	-2.949	1.596	0,9419	-2,29	1,401	-0.9437	-0,2346	1.059
NOVIEMBRE	0.4964	-2.247	1.531	0,4037	-1,719	1,282	-0,9796	-0,2751	1,062
DICIEMBRE	0.2416	-1.241	0.925	0.8649	-2.283	1.424	-1.369	0.1332	1.010

Tabla 4.13. Valores coeficientes correlaciones modelo Md-Mt.

Una vez conocido el valor Md se calculan los valores de radiación directa según la siguiente ecuación:

$$ID = I_g \cdot \frac{(1 - Md)}{\cos(\theta)} \quad [\text{Ec. 4. 8}]$$

Como se comenta en casos anteriores, dado los problemas que se encuentran en valores cercanos al orto y al ocaso, se linealiza en el intervalo con alturas menores a 5°. Se imponen como condiciones, valores de radiación nula para el orto y el ocaso.

4. Metodología.

Se muestran dos simulaciones, para el caso de día claro, figura 4.20, y no claro, figura 4.21. En ambas se comparan los valores generados artificialmente con los medidos en la estación.

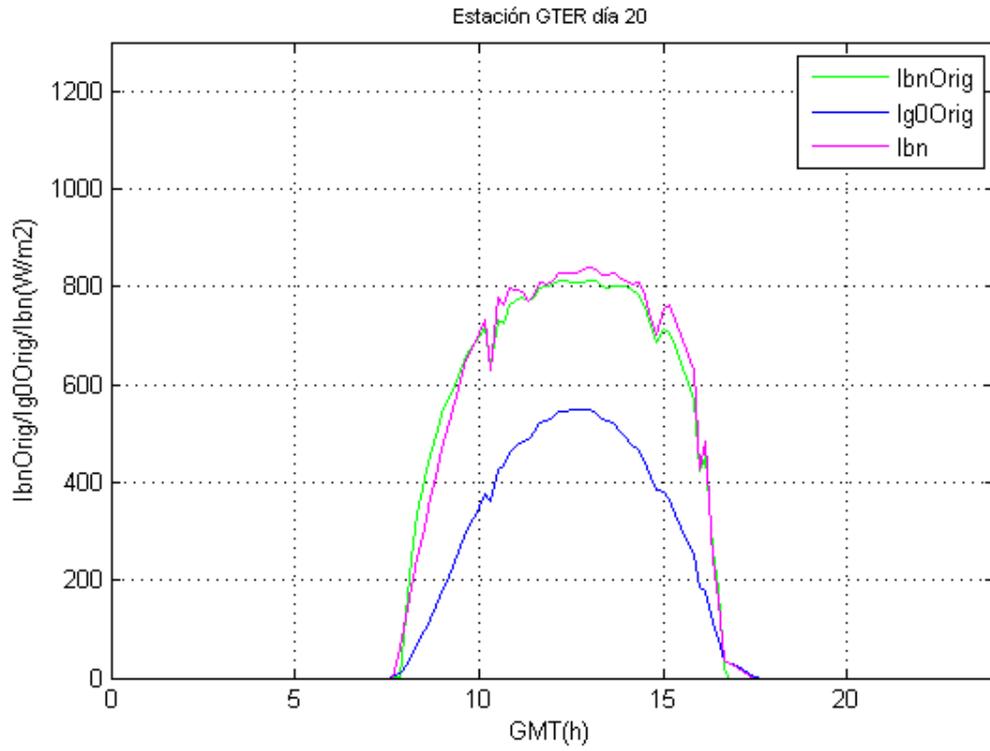


Figura 4. 20. Gráfica diaria radiación directa normal estimada - real correspondiente al día 20 del año 2007, caso 2, día claro.

4. Metodología.

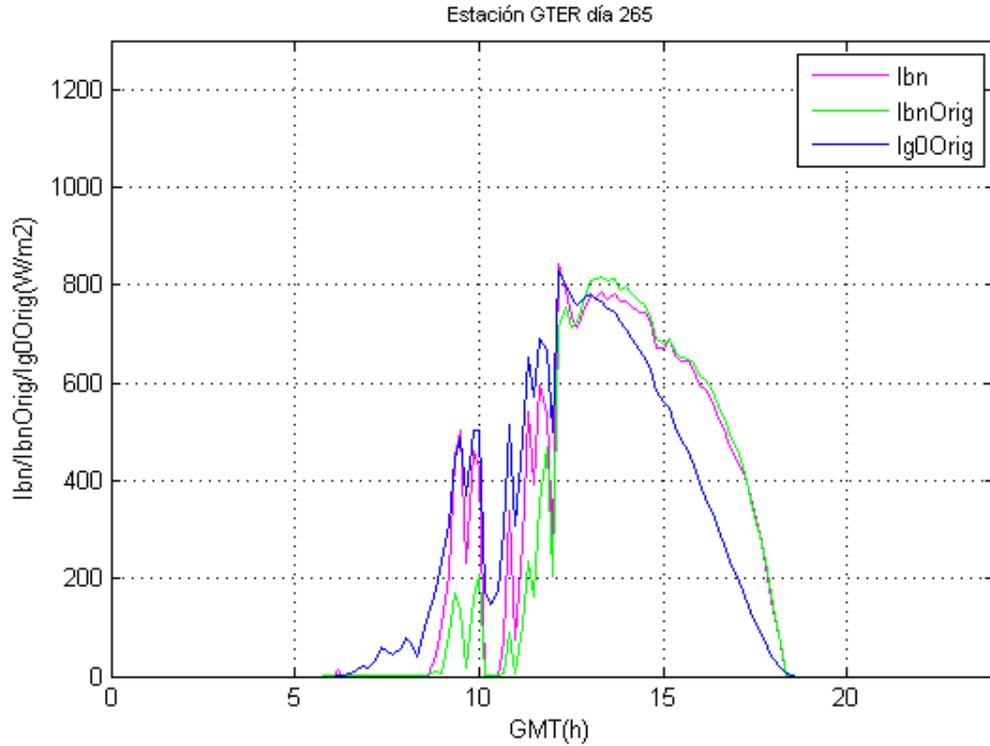


Figura 4. 21. Gráfica diaria radiación directa normal estimada - real correspondiente al día 265 del año 2007, caso 2, día no claro.

A la vista de ambas gráficas se puede observar como la curva de valores estimados para el caso de día claro, figura 4.23, se asemeja en gran medida a los valores originales. Por el contrario, para la tipología de día no claro, figura 3.23, las perturbaciones diarias tienden a generar valores claramente superiores a los originales.

C. Días corregibles. Caso 3:

Los días pertenecientes a este tercer grupo se caracterizan por valores de radiación directa normal inexistentes o incorrectos y la presencia de un hueco al principio o final del día para los valores correspondientes a la radiación global horizontal. Para la corrección de estos días, al ser una combinación de los dos casos anteriores, se aplican los procesos descritos para los casos precedidos.

4. Metodología.

En primer lugar, se generan los valores de irradiación global horizontal para el hueco en el orto o el ocaso, según la metodología descrita en el caso 1. Posteriormente, se genera la componente directa a partir de la global horizontal, del mismo modo que se detalla en el segundo caso.

A continuación, se muestran ejemplos de simulaciones para los cuatro grupos pertenecientes a este caso. Se comparan los valores creados de manera sintética, con los registros de la base de datos originales: hueco orto - día claro, figura 4.22, hueco orto - día no claro, figura 4.23, hueco ocaso - día claro, figura 4.24 y hueco ocaso - día no claro, figura 4.25.

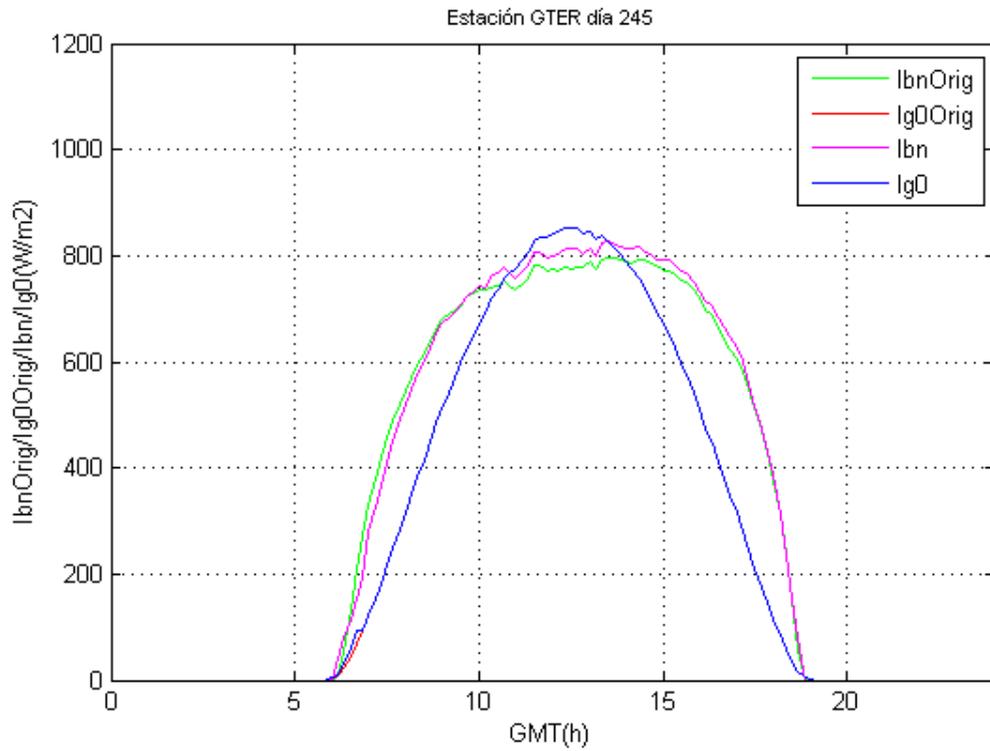


Figura 4. 22. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 245 del año 2007, caso 3a.

4. Metodología.

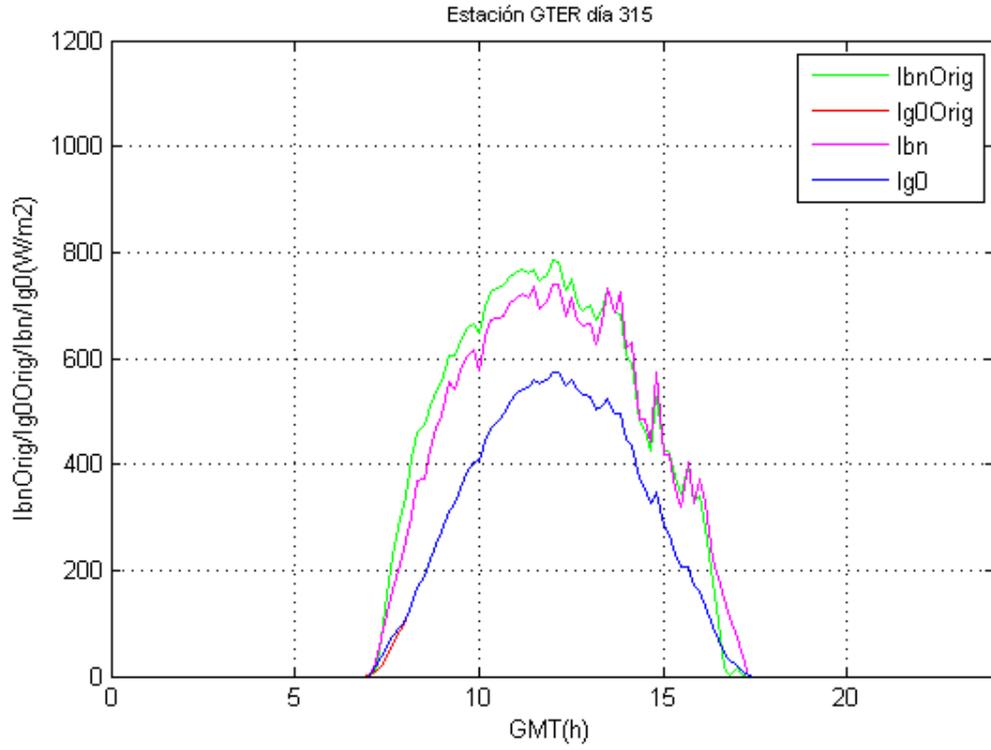


Figura 4. 23. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 315 del año 2007, caso 3b.

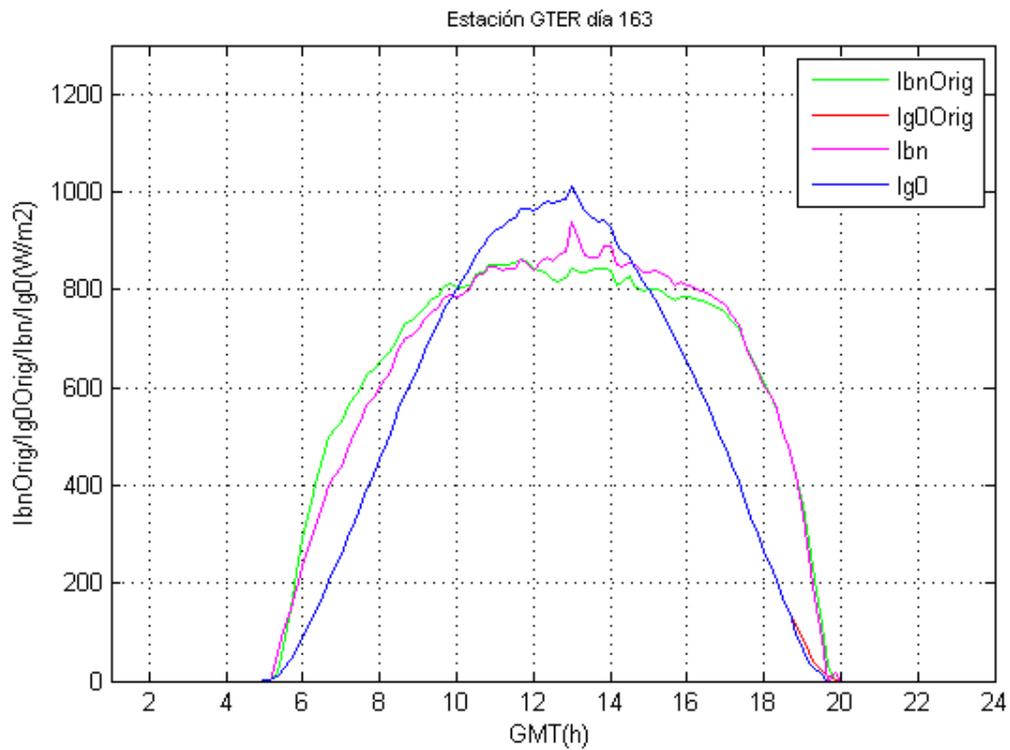


Figura 4. 24. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 163 del año 2007, caso 3c.

4. Metodología.

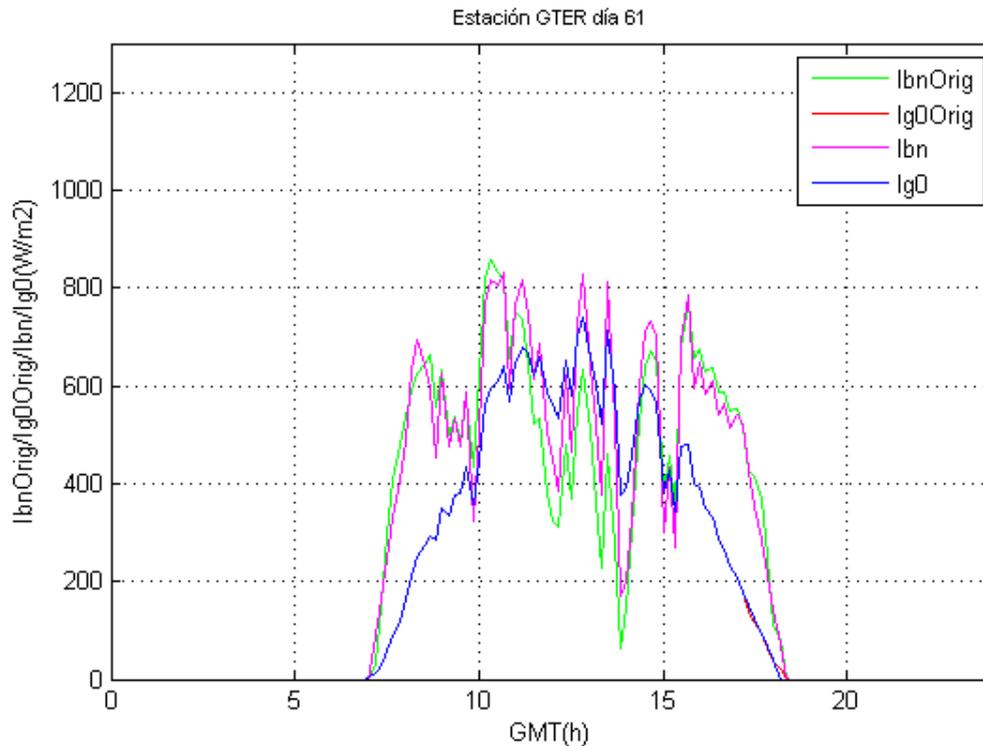


Figura 4. 25. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 61 del año 2007, caso 3d.

Como se ha destacado para el caso 2, la generación de componente directa para los días claros presenta curvas más semejantes a las originales que en los días no claros. Se vuelve a observar como la presencia de perturbaciones provoca la generación de valores claramente superiores a los originales.

D. Días corregibles. Caso 4:

Los días pertenecientes a este grupo destacan por disponer de medidas de radiación global horizontal incorrectas o inexistentes. El resto de valores son totalmente correctos. La obtención de los valores de irradiancia directa de forma teórica es sencilla, y sigue a la ecuación siguiente.

$$I_{g,o} = I_{dif,o} + I_{bn} \cdot \cos(\theta) \quad [\text{Ec. 4. 9}]$$

Son necesarios para el cálculo, los valores de radiación difusa, los cuales no se disponen en los archivos iniciales, debido a que estos no se corrigen en [1]. Previo al desarrollo de la corrección, se emplea nuevamente la base de datos original del GTER, para la obtención de la variable difusa. Los registros consultados se presentan con medidas cada 5 segundos, por tanto, se calcula la radiación acumulada en frecuencia 10-minutal para su utilización.

Se exponen en adelante dos gráficas representativas de las simulaciones diferenciando un día claro, figura 4.26, y no claro, figura 4.27. Nuevamente se comparan los valores de radiación generados frente a los originales. A su vez se representa la evolución de los registros de irradiancia difusa, empleados en la generación de los registros de radiación global horizontal.

4. Metodología.

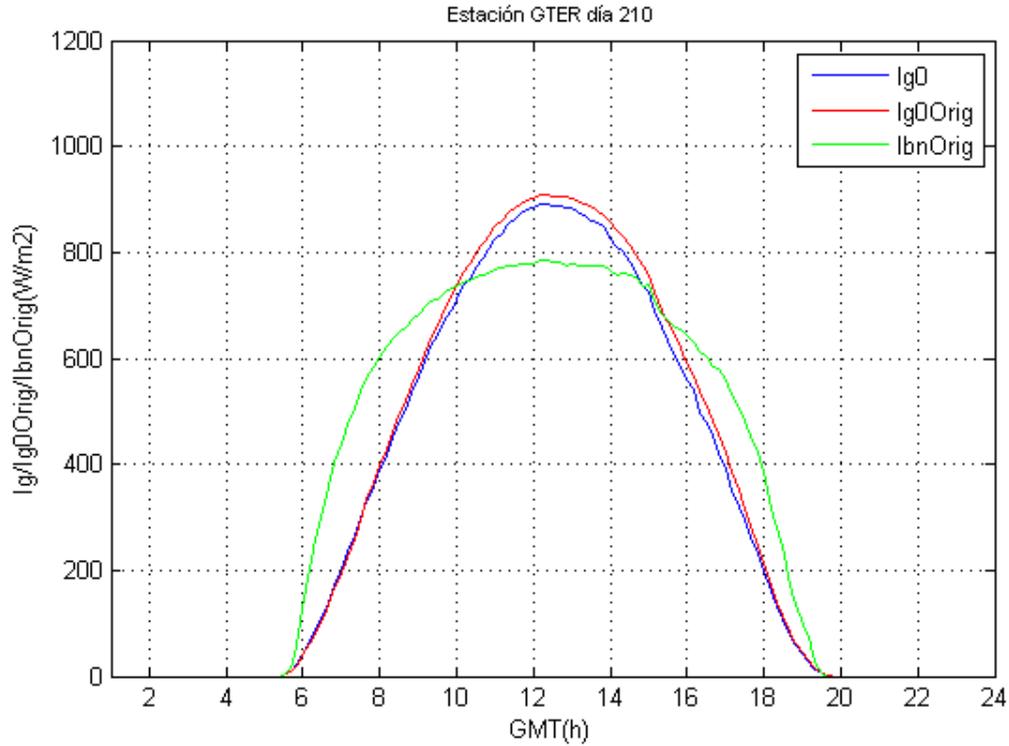


Figura 4. 26. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 106 del año 2007, caso 4.

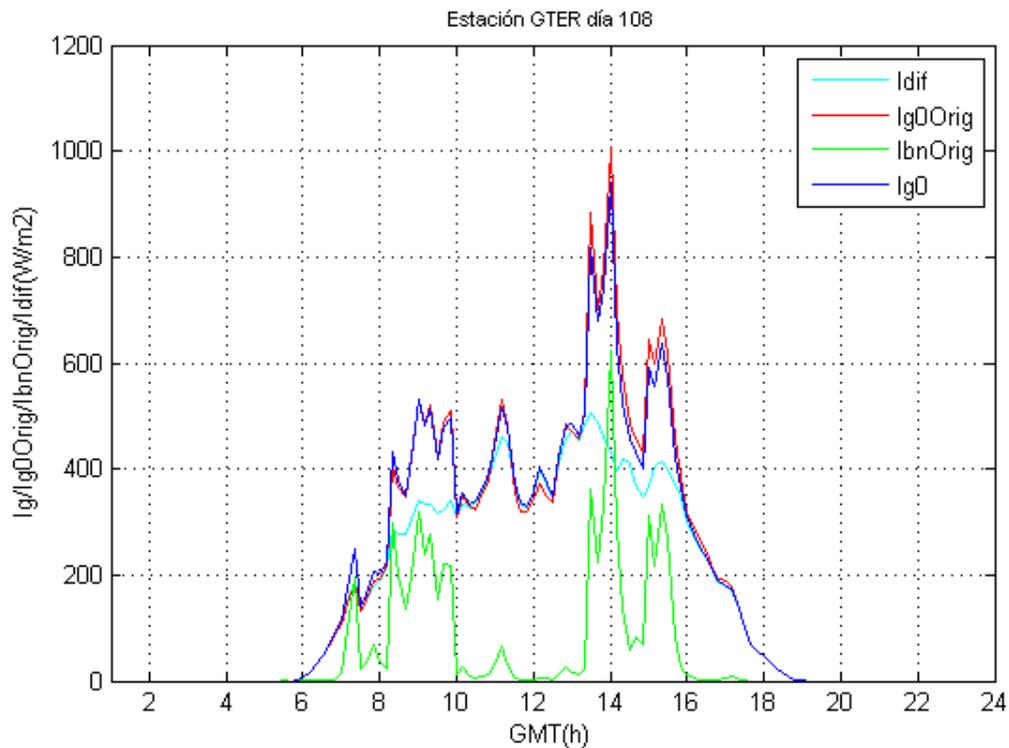


Figura 4. 27. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 106 del año 2007, caso 4.

Las gráficas muestran como la generación de la componente global de forma teórica ofrece curvas muy similares a las de los valores medidos en la estación. En este caso, no se aprecian desviaciones para los días no claros debido a las perturbaciones, como ocurría con la

4. Metodología.

estimación de la directa normal. Un aspecto destacable, es que los valores estimados tienden a ser ligeramente inferior a los originales.

4.7. Anomalías.

Reproducida la metodología de rellenado de huecos para los días seleccionados es preciso realizar una inspección virtual que permita la identificación de errores que pueden generarse en la simulación.

Tras la mencionada revisión, se aprecia un problema generalizado en la generación de la componente directa a partir de los datos de radiación global horizontal existentes. Dicho problema se halla en días con numerosas perturbaciones, que provoca que el modelo M_d - M_t genere grandes picos de irradiación directa normal, valores físicamente imposible.

Para la corrección de estos valores anómalos, se aplica un filtro de cielo despejado, ya que teóricamente, los máximos de radiación se hallan para días claros.

$$ID_{generado} > ID_{filtro} \rightarrow ID = ID_{filtro} \quad [\text{Ec. 4.10}]$$

$$ID_{generado} \leq ID_{filtro} \rightarrow ID = ID_{generado} \quad [\text{Ec. 4. 11}]$$

El filtro utilizado es el modelo AB [7], ajustado a partir de valores de la estación GTER. Se detalla brevemente a continuación:

$$I_{bn} = I_o \cdot \frac{A}{1 + B \cdot m_R} \quad [\text{Ec. 4.12}]$$

$$m_R = \frac{1}{\text{sen}\alpha + 0,50572 \cdot [57,29578 \cdot \alpha + 6,07995]^{-1,6364}} \quad [\text{Ec. 4. 13}]$$

$$A = -5,0445 \cdot 10^{-10} \cdot d_n^3 + 1,2143 \cdot 10^{-6} \cdot d_n^2 - 3,9955 \cdot 10^{-4} \cdot d_n + 0,9092 \quad [\text{Ec. 4.14}]$$

$$B = -1,2199 \cdot 10^{-8} \cdot d_n^3 + 2,7126 \cdot 10^{-6} \cdot d_n^2 + 5,6153 \cdot 10^{-4} \cdot d_n + 0,2298 \quad [\text{Ec. 4. 15}]$$

Donde:

I_{bn} = Irradiancia directa normal; I_o = Irradiancia solar extraterrestre ; m_R = Masa de aire relativa (Kasten y Young – 1989); α = Altura solar; d_n = día juliano.

El resultado de la utilización del filtro se muestra gráficamente para dos ejemplos, figuras 4.28 y 4.29, donde se aprecia la eliminación de altos picos de radiación tras la aplicación del filtro. En estas gráficas aparece una nueva variable, I_{bnFilt} , que representa los valores de radiación directa normal generados sintéticamente tras la aplicación del filtro.

4. Metodología.

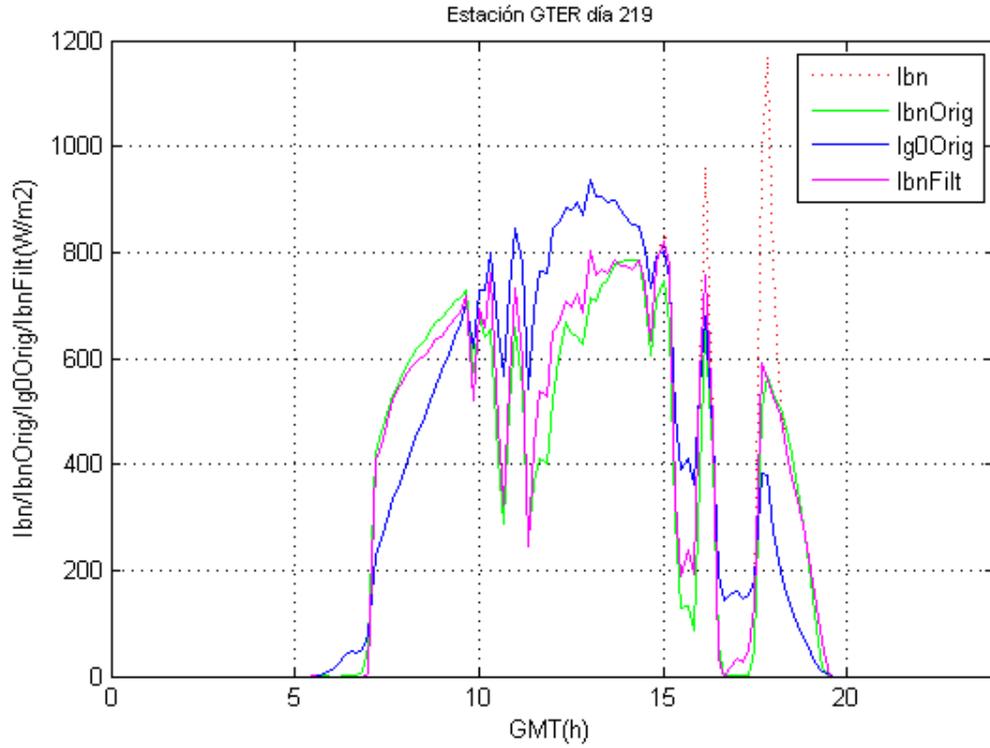


Figura 4. 28. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 219 del año 2007, caso 4, corregida con filtro de día claro.

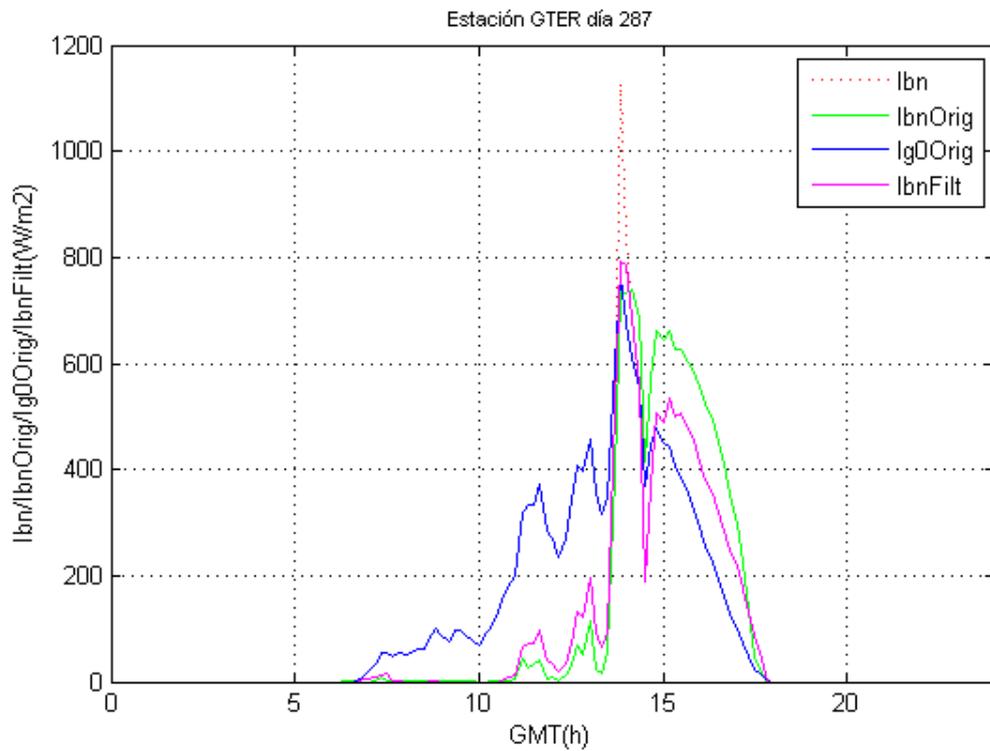


Figura 4. 29. Gráfica diaria radiación estimada - real correspondiente al día 287 del año 2007, caso 4, corregida con filtro de día claro.

4. Metodología.

Este problema, no es el único comportamiento extraño que presentan las curvas de radiación. Al mismo tiempo, se observan diversos casos aislados con errores en la generación de las distintas variables. Se comentan a continuación:

Día juliano: 225 - Caso 1C:

La presencia de perturbaciones en los registros de radiación global para el ocaso del día, a partir de los cuales se genera la componente directa normal, provoca un pico alto de irradiación inaceptable, figura 4.30.

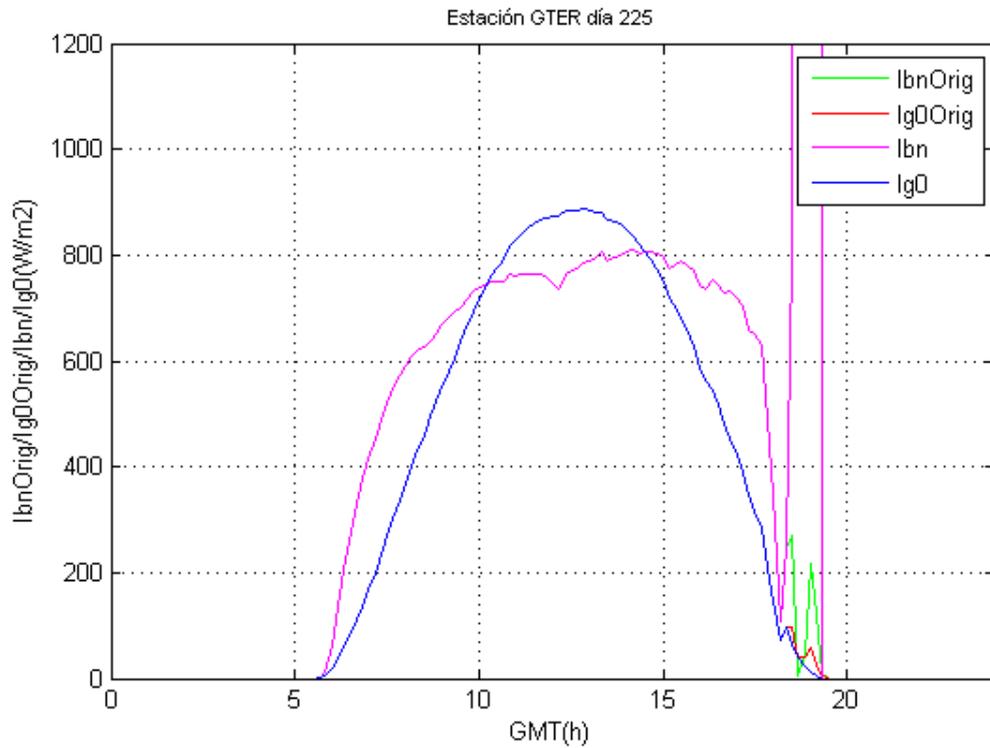


Figura 4. 30. Gráfica diaria radiación estimada no corregida- real correspondiente al día 225 del año 2007,

Se procede a linealizar en el entorno del punto, dando como resultado la siguiente curva, figura 4.31.

4. Metodología.

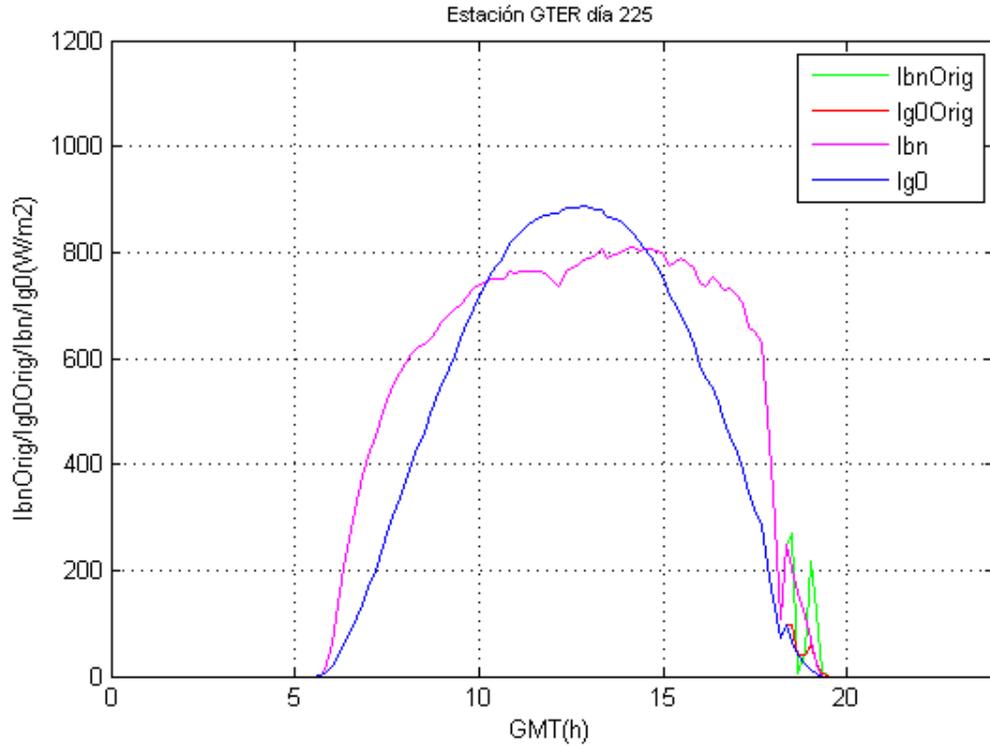


Figura 4. 31. Gráfica diaria radiación estimada corregida- real correspondiente al día 225 del año 2007, caso 3c.

Día juliano: 348 - Casos 2, 3A y 3C:

Se halla nuevamente un pico de irradiación erróneo en la componente directa. Es debido a un cambio marcado en la curva de radiación global horizontal. Se linealiza en las inmediaciones del punto, para solventar el error. Se muestran las gráficas previas, figura 4.32, y posterior a la corrección, figura 4.33.

4. Metodología.

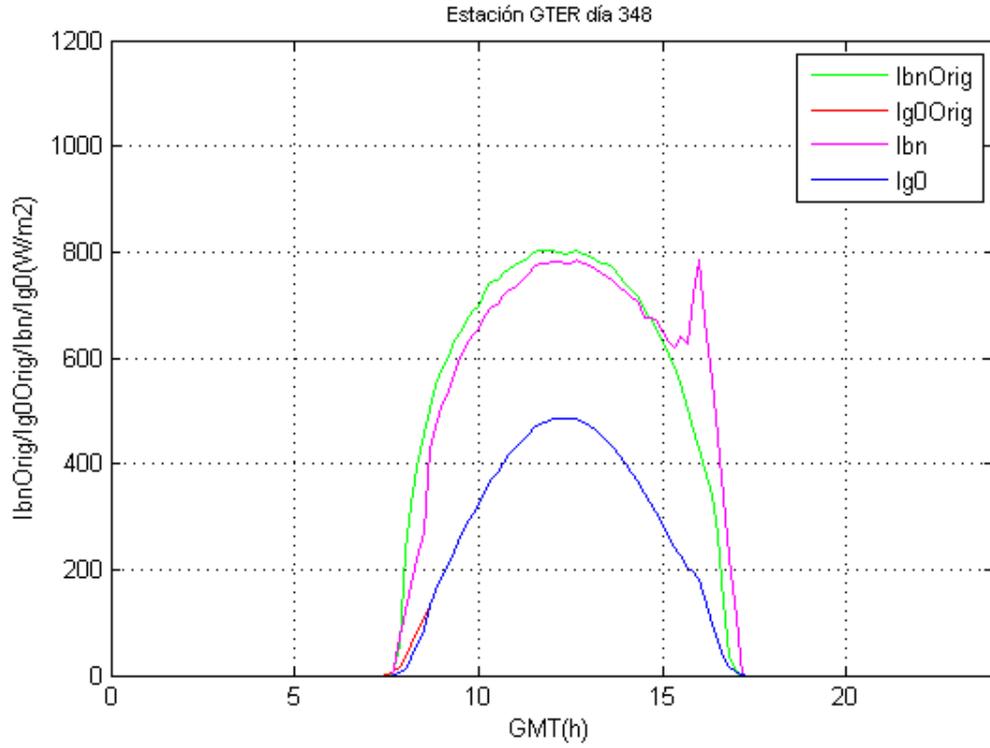


Figura 4. 32. Gráfica diaria radiación estimada no corregida - real correspondiente al día 225 del año 2007, caso 3a.

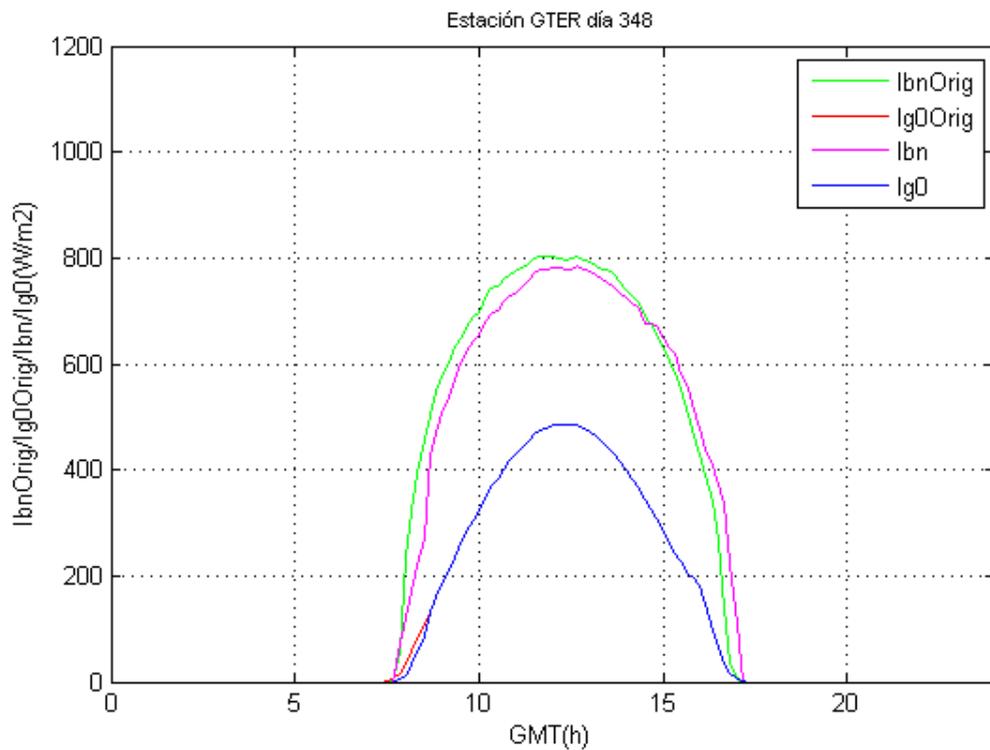


Figura 4. 33. Gráfica diaria radiación estimada corregida- real correspondiente al día 225 del año 2007, caso 3a.

5. Resultados.

5.1. Estimadores.

Para evaluar la idoneidad de la metodología de rellenado de huecos empleada para completar la base de datos radiométricos del GTER, es necesario el uso de indicadores estadísticos que ayuden a cuantificar el error cometido. Uno de los estimadores más utilizados en la validación de modelos predictivos es el error cuadrático medio (RMSE). Se hace uso de este indicador, tanto en términos absolutos, RMSE, como relativos, $RMSE_r$. Además de estos indicadores, se emplean los errores absoluto, ε_a y relativo, ε_r .

El RMSE, de acuerdo a su definición, penaliza las grandes desviaciones en las estimaciones respecto a los valores medidos. Con el error absoluto se obtiene la diferencia entre el valor medido y el estimado, proporcionando información sobre el grado de aproximación de los datos. Mientras que el error relativo se define como el cociente entre el error absoluto y el valor medido, con el que se conoce la calidad de los resultados. Tanto el RMSE como el error absoluto se expresan en las unidades de las medidas con las que se trabaja, mientras que RMSE relativo y el error relativo en términos de porcentaje.

$$\varepsilon_a = \bar{X} - Xi \quad [\text{Ec. 5.1}]$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{\bar{X}} \cdot 100 \quad [\text{Ec. 5.2}]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t^{est} - y_t)^2}{n}} \quad [\text{Ec. 5.3}]$$

$$RMSE_r = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t^{est} - y_t)^2}{n}}}{\sum_{t=1}^n y_t} \cdot 100 \quad [\text{Ec. 5.4}]$$

Donde:

\bar{X} = valor real; Xi = valor estimado

y_t^{est} = variable radiación estimada; y_t = variables radiación real

n = número de puntos medidos

Para caracterizar la distribución de los errores calculados se analizan diferentes parámetros estadísticos, en concreto la mediana, la desviación típica, los valores máximos y percentiles. Con la mediana se representa el valor de la variable de posición central en el conjunto de datos ordenados. La desviación típica determina la dispersión de los resultados. El percentil es una medida que determina el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de datos una vez ordenados estos de menor a mayor. Con el percentil 90 se obtiene el valor bajo el cual se encuentra el 90% de los datos.

5. Resultados.

5.2. Cálculo de errores.

En el presente apartado se cuantifica el error asociado a cada uno de los procedimientos de rellenado de huecos empleados en la metodología descrita en el apartado 4. Para caracterizar el error se analiza la distribución de los mismos para cada tipología de hueco. Se muestran los valores para el RMSE, el RMSE_r, el error relativo y absoluto. Dado lo comentado en el apartado anterior, en relación de la idoneidad del uso del RMSE en modelos predictivos, se analizan los errores desde este punto de vista. En las tablas del presente apartado se emplean los siguientes acrónimos:

En los análisis de resultados, se opta por emplear la mediana y el percentil 90. Hay que destacar que en el conjunto de resultados existen valores máximos, identificados con singularidades, que difieren altamente del resto. En el caso de la mediana, su uso viene justificado por ser una variable menos sensible a estas singularidades que otros parámetros de tendencia central como la media. Por su parte, el percentil 90 se convierte en una variable más representativa de los mayores errores cometido que el uso del valor máximo.

- Hd = irradiación directa normal.
- Hg = Irradiación global horizontal.

5.2.1. Descartados.

Los resultados para el conjunto de días descartados se clasifican según el grado de nubosidad. Primero se muestran los valores para el conjunto total de días, seguido de la diferenciación entre días claros y no claros. Por último se diferencia dentro de la categoría de día no claro, entre día cubierto y nublado. En primer lugar se analizan los resultados para la componente de radiación directa normal. En las tablas 5.1 y 5.2 para los errores absolutos y los RMSE de dicha componente.

ϵ_a	[Wh/m ²]				
Hd					
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	666,59	592,55	859,92	902,42	832,54
Desviación	821,85	755,42	908,09	952,73	868,52
Percentil 90	1927,52	2017,50	1790,23	1802,80	1672,21
Máximo	5384,37	2876,09	5384,37	5384,37	4412,58

Tabla 5. 1. Errores absolutos para irradiación directa normal - descartados.

RMSE	[Wh/m ²]				
Hd					
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	36,15	16,40	42,42	40,11	43,36
Desviación	20,36	15,12	18,30	22,71	14,77
Percentil 90	60,80	43,07	67,10	78,67	63,99
Máximo	101,05	65,53	101,05	101,05	80,27

Tabla 5. 2. RMSE absolutos para irradiación directa normal - descartados.

5. Resultados.

Los valores absolutos dan una idea del grado de aproximación de los resultados, pero desde el punto de vista práctico, es más conveniente el estudio de los resultados mediante valores relativos, tablas 5.3 y 5.4.

ε_r	[%]				
Hd					
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	13,95	9,40	14,89	16,15	11,25
Desviación	5734,14	22,62	9000,88	12706,42	107,31
Percentil 90	79,19	53,82	125,34	153,42	98,28
Máximo	69725,59	91,51	69725,59	69725,59	212,35

Tabla 5. 3. Errores relativos para irradiación directa normal - descartados.

RMSE _r	[%]				
Hd					
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	0,63	0,21	1,22	3,45	0,75
Desviación	107,82	0,27	137,34	214,60	0,63
Percentil 90	4,70	0,58	7,20	15,31	1,53
Máximo	1308,58	1,71	1308,58	1308,58	3,98

Tabla 5. 4. RMSE relativos para irradiación directa normal - descartados.

Los resultados muestran como el grado de nubosidad tiene gran influencia en la exactitud del método. Se presenta para la mediana un RMSE relativo del 0,21 % para días claros frente a un 1,22 % para días no claros. Los días de cielo despejado, presentan una curva muy característica. Por el contrario, los días no claros presentan generalmente perturbaciones que, incrementan la incertidumbre del método. Este hecho se contrasta más en la diferencia de errores para la tipología de cielo cubierto, con un valor para la mediana del 3,45 % y del 0,75 % para cielo nublado. Se deben destacar determinadas singularidades en los valores máximos para los días no claros, identificados con días de muy baja radiación.

En las tablas 5.5 y 5.6, se muestran los resultados obtenidos para la componente de radiación global horizontal en valores absolutos.

ε_a	[Wh/m ²]				
Hg					
	Todos	Claros	No claros	Nublados	Cubiertos
Mediana	149,74	88,83	188,14	154,06	207,33
Desviación	255,86	188,04	285,54	184,03	369,36
Percentil 90	480,35	352,54	540,89	365,69	692,40
Máximo	1654,56	968,36	1654,56	1119,83	1654,56

Tabla 5. 5. Errores absolutos para irradiación global horizontal - descartados.

5. Resultados.

	RMSE [Wh/m ²]				
	Hg				
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	13,90	3,63	19,36	28,38	15,78
Desviación	12,60	6,29	11,75	11,84	9,11
Percentil 90	34,79	14,68	40,31	46,14	30,59
Máximo	54,58	25,40	54,58	54,58	41,47

Tabla 5. 6. RMSE absolutos para irradiación global horizontal - descartados.

A la vista de los valores absolutos, se observa como los errores para esta variable se reducen considerablemente respecto a los resultados para la componente de radiación directa normal. En valores para la mediana del RMSE, para el conjunto de días estudiados, de un error cometido del 36,15 Wh/m² para la radiación directa normal, se reduce a un 13,90 Wh/m² en la variable de radiación global horizontal. Tendencia que se observa para las distintas clasificaciones de día en función de la nubosidad. Los resultados obtenidos en valores relativos se muestran en las tablas 5.7 y 5.8

	ϵ_r [%]				
	Hg				
	Todos	Claros	No claros	Nublados	Cubiertos
Mediana	3,14	1,78	4,57	3,50	7,50
Desviación	8,34	2,44	9,90	4,53	12,72
Percentil 90	15,88	5,45	22,63	10,06	28,84
Máximo	53,60	12,14	53,60	27,55	53,60

Tabla 5. 7. Errores relativos para irradiación global horizontal - descartados.

	RMSE _r [%]				
	Hg				
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	0,29	0,08	0,55	1,07	0,31
Desviación	0,60	0,09	0,66	0,80	0,22
Percentil 90	1,12	0,26	1,25	1,67	0,65
Máximo	5,24	0,40	5,24	5,24	1,00

Tabla 5. 8. RMSE relativos para irradiación global horizontal - descartados.

Siguiendo con la tendencia observada para la componente de radiación directa normal, en términos de errores relativos, el error para cada tipología varía en función del grado de nubosidad. El valor de la mediana del RMSE en los días claros, 0,08 %, es notablemente inferior que para los días no claros, 0,55 %. Entrando en la clasificación de estos últimos, los resultados para la tipología de cielo cubierto presentan los mayores errores, 1,07 %, frente a un 0,31 % en los días nublados.

5. Resultados.

5.2.2. Días corregibles.

A. Caso 1.

Como se ha descrito en el apartado 4, el caso 1 contempla el rellenado de huecos de duración igual a una hora al principio o al final del día. Los casos en los que el hueco se encuentra al principio del día se han identificado como A y C, mientras que los casos en los que el hueco se encuentra al final del día, como B y D. Esta misma nomenclatura es la empleada en las tablas que se incluyen en este apartado. En ellas se muestra el análisis de los errores. En este conjunto de casos se completan tanto la componente global horizontal como la directa normal de la radiación. Se muestra en primer lugar el análisis de errores vinculados a la radiación directa normal, tablas 5.9 a 5.12.

ϵ_a		[Wh/m ²]			
Hd					
		A	B	C	D
Mediana	27,42	14,58	34,42	23,25	
Desviación	27,35	24,18	30,09	48,01	
Percentil 90	66,99	50,39	71,65	91,72	
Máximo	126,84	103,72	155,97	246,92	

Tabla 5. 9. Errores absolutos para irradiación directa normal - caso 1.

RMSE		[Wh/m ²]			
Hd					
		A	B	C	D
Mediana	7,89	4,72	7,02	7,38	
Desviación	6,02	5,52	7,49	9,44	
Percentil 90	16,09	11,75	16,55	20,18	
Máximo	27,87	22,21	42,06	47,68	

Tabla 5. 10. RMSE absoluto para irradiación directa normal - caso 1.

ϵ_r		[%]			
Hd					
		A	B	C	D
Mediana	15,59	34,46	13,80	24,07	
Desviación	10,73	9102,23	9,84	5860,10	
Percentil 90	30,80	373,10	20,72	223,33	
Máximo	54,78	63983,33	56,52	42503,45	

Tabla 5. 11. Errores relativos para irradiación directa normal - caso 1.

5. Resultados.

	RMSE_r [%]			
	Hd			
	A	B	C	D
Mediana	4,51	11,07	2,75	5,95
Desviación	5,18	1835,47	3,23	1186,11
Percentil 90	6,85	81,61	6,28	49,80
Máximo	30,48	12907,91	16,36	8605,58

Tabla 5. 12. RMSE relativos para irradiación directa normal - caso 1.

El análisis de los valores relativos indica que se obtiene un error característico menor para la metodología de días claros (A y C) frente a la de los días no claros (B y D). Se tiene, en términos de la mediana, un RMSE del 4,51 % frente a 11,07 % para el orto. En el caso del ocaso, un valor del 2,75 % frente a un 5,95 %. Son resultados lógicos ya que la linealización realizada en los días no claros parte únicamente del primer valor registrado, sin atender a puntos intermedios. En el modelo de ASHRAE [6] se trabaja con el índice de claridad instantáneo, generando menor incertidumbre. Por otra parte, las numerosas perturbaciones en los valores de radiación directa normal característica de los días no claros aumentan la imprecisión del método.

Otra gran diferencia en los resultados se halla en los errores máximos, resaltados en las tablas anteriores. En la tipología de días no claros existen casos aislados en los que valores originales de radiación acumulada son muy próximos a cero. Cualquier pequeña desviación sobre los valores medidos, dispara el error relativo a valores muy altos.

Por último se diferencia entre los resultados para los casos del orto y el ocaso. Se observan mayores errores en la sustitución de valores en el orto, tanto en términos promedios como máximos. Para valores de la mediana del RMSE, un 4,51 % frente a 2,75 % en días claros y 11,07 % frente a 5,95 % de los días no claros.

En relación a la componente de radiación global horizontal, como se realizó para la variable anterior se muestran inicialmente los resultados en términos absolutos, tablas 5.13 y 5.14.

	ϵ_a [Wh/m²]			
	Hg			
	A	B	C	D
Mediana	9,79	7,88	14,67	7,88
Desviación	7,12	8,31	5,11	8,31
Percentil 90	20,31	17,50	21,87	17,50
Máximo	28,38	53,62	27,51	53,62

Tabla 5. 13. Errores absolutos para irradiación global horizontal - caso 1.

5. Resultados.

RMSE		[Wh/m ²]			
Hg					
	A	B	C	D	
Mediana	1,86	1,63	2,69	1,63	
Desviación	1,17	1,58	0,92	2,12	
Percentil 90	3,69	3,35	4,19	4,68	
Máximo	5,22	10,89	5,70	9,29	

Tabla 5. 14. RMSE absolutos para irradiación global horizontal - caso 1.

ε_r		[%]			
Hg					
	A	B	C	D	
Mediana	21,57	24,65	26,81	24,65	
Desviación	12,83	60,93	7,03	60,93	
Percentil 90	39,58	61,26	33,43	61,26	
Máximo	44,87	445,20	53,08	445,20	

Tabla 5. 15. Errores relativos para irradiación global horizontal - caso 1.

RMSE _r		[%]			
Hg					
	A	B	C	D	
Mediana	4,65	5,75	4,93	5,88	
Desviación	1,88	12,13	1,41	73,47	
Percentil 90	7,18	12,03	6,29	23,62	
Máximo	8,26	90,45	11,00	407,54	

Tabla 5. 16. RMSE relativos para irradiación global horizontal - caso 1.

Desde el punto de vista de los errores relativos, tablas 5.15 y 5.16, se presentan resultados más homogéneos. Las curvas de radiación global horizontal se ven menos afectadas por las perturbaciones. Los resultados promedios se muestran más parejos, como se resalta en las tablas 5.9 Y 5.10. Los valores de la mediana para los RMSE relativos son 4,65 %, 5,75 %, 4,93 % y 5,88 % respectivamente para los casos 1A a 1D. Se analiza una ligera tendencia a una mayor incertidumbre para los resultados de los días no despejados. La gran disimilitud se encuentra nuevamente relacionada con los errores máximos, por los motivos ya explicados, relacionados con valores de acumulada muy cercanos a cero. Se halla un RMSE relativo máximo del 407,54 % para días no claros frente a un 11 % de los días despejados.

Por último para visualizar conjuntamente las diferencias comentadas anteriormente con mayor claridad se presentan gráficamente los valores de la mediana, figura 5.1, y el percentil 90, figura 5.2, en términos del RMSE relativo para ambas variables. A la vista de las gráficas y comparando ambas variables, se observa como para días no claros (B y D) se tienen errores más altos en la generación de la componente de radiación directa. Por el contrario, los errores en los días claros (A y C) se muestran superiores para los valores de radiación global horizontal.

5. Resultados.

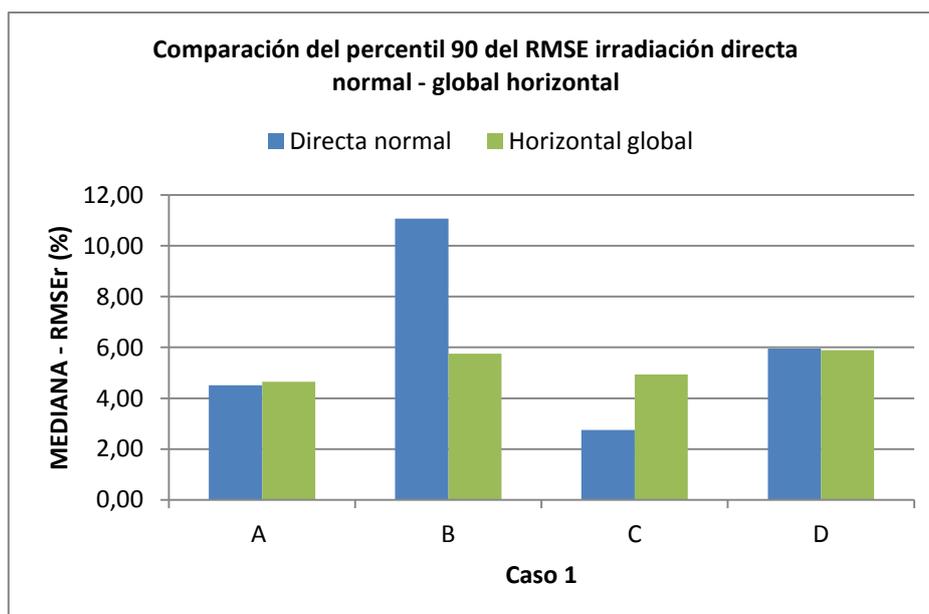


Figura 5. 1. Mediana de los resultados del RMSE, [%] para el caso 1.

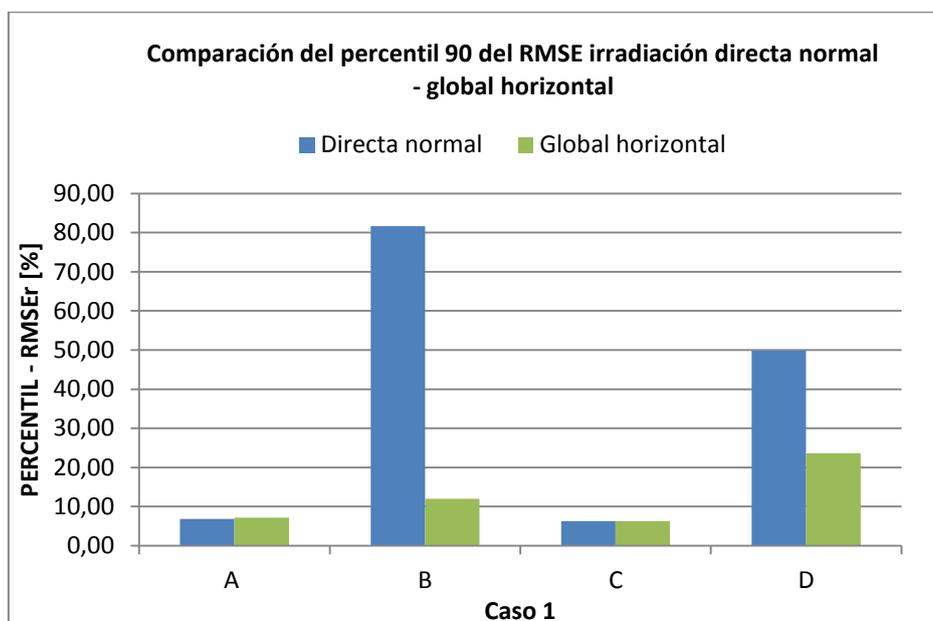


Figura 5. 2. Percentil 90 de los resultados del RMSE, [%] para el caso 1.

B. Caso 2

Los resultados obtenidos en este segundo caso se agrupan diferenciando para días claros - no claros. A su vez entre estos últimos se distinguen entre días nublados y cubiertos. Se muestra los resultados para los distintos parámetros en las siguientes tablas.

5. Resultados.

ε_a	[Wh/m ²]				
Hd					
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	439,25	335,74	499,01	327,31	659,12
Desviación	417,50	477,63	385,46	430,35	354,46
Percentil 90	1083,87	868,95	1088,43	917,11	1096,55
Máximo	2309,78	2309,78	1591,70	1591,70	1410,48

Tabla 5. 17. Errores absolutos para irradiación directa normal - caso 2.

RMSE	[Wh/m ²]				
Hd					
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	12,50	9,49	14,97	14,69	15,39
Desviación	6,04	4,86	6,01	6,77	5,53
Percentil 90	20,03	15,29	23,25	19,17	22,94
Máximo	33,85	31,22	33,85	32,37	33,85

Tabla 5. 18. RMSE absolutos para irradiación directa normal - caso 2.

Previo al análisis de los valores relativos, hay que destacar que el error absoluto máximo se da para el conjunto de días claros, como se resalta en la tabla 5.17, de 2309,78 Wh/m². Se trata de un valor elevado en comparación con el resto. Se debe al fenómeno de la calima, donde los valores estimados son claramente más altos que los medidos en la estación. La calima es una situación excepcional que puede tener lugar en la época de verano. Las correcciones se llevan a cabo con un modelo de cielo claro, generando valores de radiación promedios, sin tener en consideración singularidades.

ε_r	[%]				
Hg					
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	8,39	3,96	11,30	23,68	8,61
Desviación	53,44	10,30	63,73	95,92	12,57
Percentil 90	33,41	12,02	81,92	207,27	24,20
Máximo	377,05	60,12	377,05	377,05	83,14

Tabla 5. 19. Errores relativos para irradiación directa normal - caso 2.

RMSE _r	[%]				
Hd					
	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	0,23	0,11	0,37	0,83	0,25
Desviación	1,62	0,12	1,93	2,86	0,27
Percentil 90	1,08	0,23	1,69	6,99	0,61
Máximo	9,94	0,81	9,94	9,94	1,70

Tabla 5. 20. RMSE relativos para irradiación directa normal - caso 2.

Siguiendo con el análisis de los resultados, como se comenta en casos anteriores, las perturbaciones características en días no claros, generan una mayor incertidumbre. Queda demostrado nuevamente con los resultados obtenidos en la generación de la componente

5. Resultados.

directa diaria. Atendiendo a los valores absolutos de energía, los errores en los días no claros ya son superiores: 14,97 Wh/m² para el RMSE de días no claros y 9,49 Wh/m² en claros, tabla 5.18. Teniendo en cuenta que la radiación acumulada durante este tipo de día es menor que en días despejados, los errores se acentúan en términos relativos, como se observa en las tablas 5.19 y 5.20.

Profundizando en la categoría de días no claros, se observan también claras diferencias entre días nublados y cubiertos. En relación a los valores absolutos, se tienen errores ligeramente superiores para el conjunto de días nublados. Los días cubiertos se caracterizan por valores reducidos de radiación, por lo que son de esperar valores menores en este aspecto. Aquí se destaca la importancia de evaluar los errores en términos relativos. Como se resalta en las tablas 5.19 y 5.20, se destacan grandes diferencias en ambos casos, con valores muy superiores para el conjunto de días cubiertos: 0,83 % frente a 0,25 % en los días nublados para el RMSE relativo.

C. Caso 3.

Siendo este tercer caso, una combinación de los dos anteriores, es esperable unos resultados en conjunto similares a lo visto con anterioridad. Para el análisis de los resultados, se muestran en las tablas 5.21 y 5.22 los resultados obtenidos para la componente de radiación directa normal. Los casos A/C se identifican con los casos de días claros, mientras que B/D hace referencia a los días no claros.

	ε_a [Wh/m ²]		RMSE [Wh/m ²]	
	A /C	B/D	A /C	B/D
Hd				
Mediana	360,06	512,80	9,42	14,44
Desviación	274,84	363,34	3,50	5,81
Percentil 90	776,36	994,53	12,47	22,10
Máximo	1257,97	1591,70	21,80	32,37

Tabla 5. 21. Errores y RMSE absolutos para irradiación directa normal - caso 3.

	ε_r	[%]	RMSE _r	[%]
	A /C	B/D	A /C	B/D
Hd				
Mediana	4,04	15,46	0,11	0,45
Desviación	3,96	101,80	0,06	4,51
Percentil 90	10,81	123,30	0,20	2,94
Máximo	18,65	623,53	0,33	26,49

Tabla 5. 22. Errores y RMSE relativos para irradiación directa normal - caso 3.

Como se observa en los resultados de la generación de la componente directa normal diaria para el caso 2, los errores obtenidos son nuevamente superiores tanto en términos absolutos como relativos para la tipología de día no claro (B/D). Se observa gráficamente para el RMSE relativo en la figura 5.3, los resultados conjuntos para ambos casos. Debido a la dispersión de

5. Resultados.

los resultados en los días no claros, se observa una sensible diferencia en los valores centrales para dichos días.

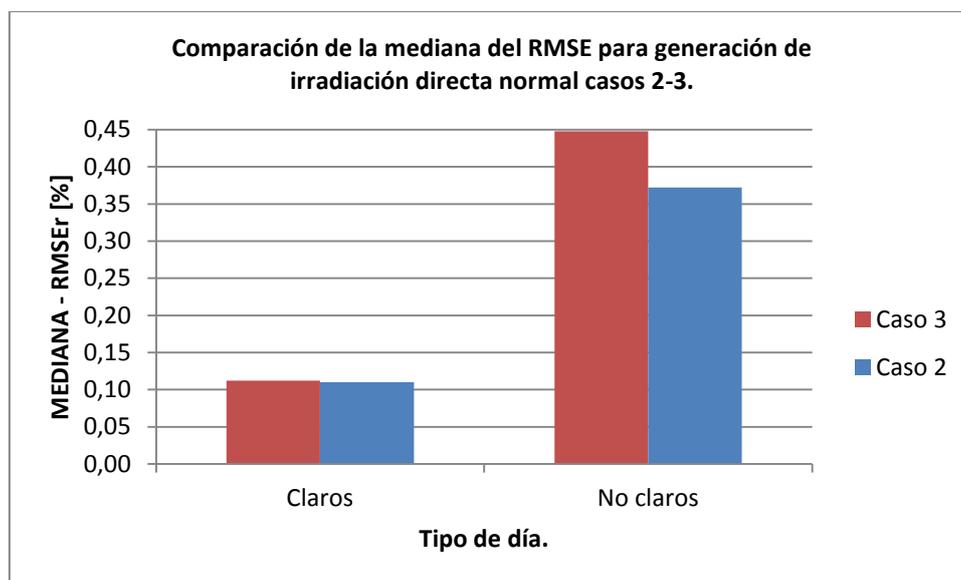


Figura 5. 3. Comparación de los resultados de la mediana para el RMSE, [%] para irradiación directa normal - casos 2 y 3.

Debido a esta cuestión relacionada con los días no claros, para precisar más en los resultados, se caracteriza el valor con el estudio conjunto de ambos casos, tabla 5.23.

	ϵ_a	ϵ_r	RMSE	RMSEr
Hd				
	[Wh/m ²]	[%]	[Wh/m ²]	[%]
Mediana	507,43	12,21	14,73	0,41
Desviación	374,11	88,66	5,83	3,61
Percentil 90	1067,17	117,75	22,35	2,80
Máximo	1591,70	623,53	33,85	26,49

Tabla 5. 23. Corrección de errores generación directa normal diaria - no claro.

En relación a la componente de radiación global horizontal, se muestran los resultados obtenidos para este tercer caso en las tablas 5,24 a 5.27. Cabe recordar, que para esta componente se completaban huecos en el orto o el ocaso de una hora de duración.

	ϵ_a	[Wh/m ²]		
Hg				
	A	B	C	D
Mediana	9,79	7,23	15,77	5,28
Desviación	6,80	6,75	5,77	10,13
Percentil 90	19,03	18,96	21,39	18,38
Máximo	23,52	32,35	27,31	68,09

Tabla 5. 24. Errores absolutos para irradiación global horizontal - caso 3.

5. Resultados.

	RMSE [Wh/m ²]			
	Hg			
	A	B	C	D
Mediana	1,83	1,58	2,87	1,70
Desviación	1,15	1,22	0,93	1,88
Percentil 90	3,54	3,65	3,90	4,06
Máximo	4,40	6,22	5,69	13,09

Tabla 5. 25. RMSE absolutos para irradiación global horizontal - caso 3.

	ε_r [%]			
	Hg			
	A	B	C	D
Mediana	24,49	29,17	26,96	8,71
Desviación	13,01	29,78	8,52	20,12
Percentil 90	38,64	64,85	33,74	42,41
Máximo	48,22	178,35	52,70	80,56

Tabla 5. 26 Errores relativos para irradiación global horizontal - caso 3.

	RMSE _r [%]			
	Hg			
	A	B	C	D
Mediana	4,55	6,27	4,99	2,91
Desviación	2,10	5,64	1,41	4,02
Percentil 90	7,10	12,35	6,17	10,08
Máximo	10,20	35,37	10,98	16,26

Tabla 5. 27. RMSE absolutos para irradiación global horizontal - caso 3.

En el caso 1 se destacaba una importante diferencia en los errores máximos, siendo muy superiores para los días no claros. Se obtienen en este aspecto resultados similares. Por otra parte, se observaba una mayor incertidumbre para los días no despejados. Esta última característica no se cumple para huecos localizados en el ocaso (D). Se observa gráficamente en la figura 5.4.

5. Resultados.

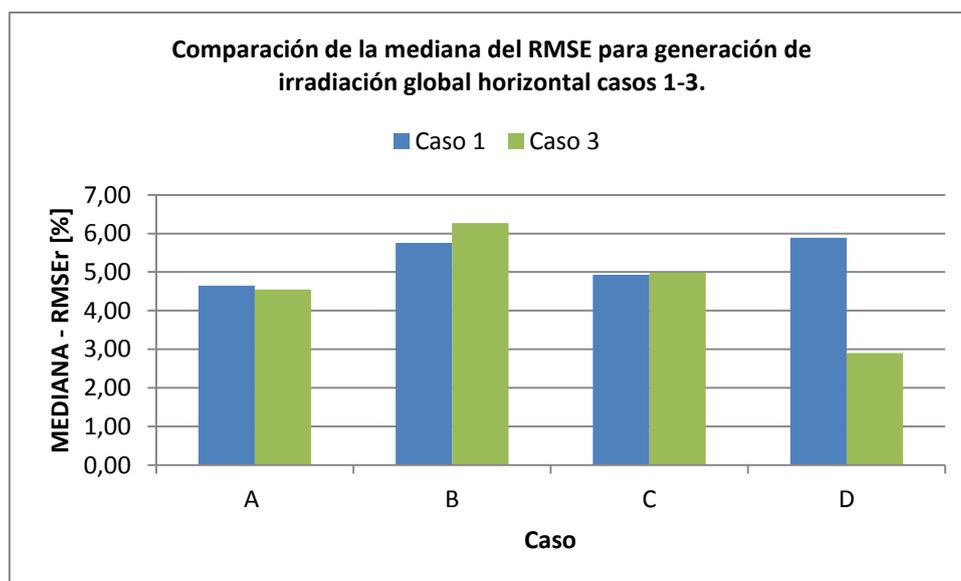


Figura 5. 4. Comparación de los resultados de la mediana para el RMSE, [%] para irradiación global horizontal - casos 1 y 3.

Analizando el conjunto de días simulados para el caso 3D, se tiene como un gran número de días presentan valores nulos de radiación global horizontal en el intervalo estudiado. Esta circunstancia genera errores nulos que reducen sensiblemente los resultados en conjunto. Se decide tomar como valores característicos para este caso, los resultados de analizar conjuntamente los casos 1D y 3D, tabla 5.28.

	ϵ_a	ϵ_r	RMSE	RMSEr
	Hg			
	[Wh/m ²]	[%]	[Wh/m ²]	[%]
Mediana	7,12	19,61	1,69	4,56
Desviación	9,35	46,37	2,02	53,10
Percentil 90	17,43	55,00	4,22	13,98
Máximo	68,09	445,20	13,09	407,54

Tabla 5. 28. Corrección de errores de irradiación global horizontal - caso 3D.

D. Caso 4.

Para terminar con el análisis de los distintos casos, se estudia el cuarto caso. Se trata del grupo con menor presencia en la base de datos, lo que hace trabajar con un conjunto de días menor. Esto implica que se analicen todos los días conjuntamente, tabla 5.22.

	ϵ_a	ϵ_r	RMSE	RMSEr
	Hg			
	[Wh/m ²]	[%]	[Wh/m ²]	[%]
Mediana	244,70	3,33	4,30	0,07
Desviación	97,99	1,67	1,22	0,03
Percentil 90	331,85	5,40	5,52	0,10
Máximo	349,22	9,10	5,98	0,18

Tabla 5. 29. Errores para irradiación global horizontal - caso 4.

5. Resultados.

Este cuarto grupo presenta errores muy inferiores a los obtenidos para la generación sintética de la radiación directa normal. La característica destacable en relación al resto, es la reducida dispersión de los datos obtenidos. Para valores de la mediana, se presenta un RMSE relativo del 0,07 %. Mientras que en caso de la generación de radiación directa normal a partir de la global, los resultados aumentaban a un 0,23 %.

6. Extrapolación de resultados.

6. Extrapolación de resultados.

Una vez cuantificado el error asociado a cada uno de los procedimientos de la metodología de rellenado de huecos empleada en la corrección de la base de datos del GTER, se abarca el objetivo secundario de este estudio. Se pretende estimar la incertidumbre generada en la base de datos consecuencia de las técnicas de rellenado de huecos aplicadas. Para ello, se extrapolan los resultados obtenidos a un conjunto de años en los que se han corregido los huecos existentes. Se contempla el intervalo de tiempo comprendido entre los años 2000 a 2009, periodo de años en el que se corrige la base de datos radiométricas del GTER en el anterior proyecto.

Para estimar el error diario cometido en los días corregidos de la base de datos del GTER, se hacen uso de los valores de las acumuladas de radiación diaria. Para cuantificar un error diario, se aplican los errores calculados en el apartado anterior al valor de la radiación acumulada. Se obtiene una estimación del error cometido por día en unidades de energía [Wh/m²]. Hay que destacar que al ser días corregidos, las acumuladas no son de los valores medidos en la propia estación radiométrica, si no que han sido calculadas teóricamente en [1]. Por tanto, hay que tomar como hipótesis, que estos valores corregidos son válidos, puesto que no se disponen de los valores medidos. Los errores estimados para cada día se calculan como:

$$\text{Error diario percentil} \left[\frac{Wh}{m^2} \right] = \text{Acumulada diaria} \left[\frac{Wh}{m^2} \right] \cdot \frac{\text{percentil 90}}{100} [\%]$$

(Ec. 6.1)

$$\text{Error diario medio} \left[\frac{Wh}{m^2} \right] = \text{Acumulada diaria} \left[\frac{Wh}{m^2} \right] \cdot \frac{\text{mediana}}{100} [\%]$$

(Ec. 6.2)

Donde el valor del percentil o la mediana depende del tipo de hueco presente en el día, tablas 6.1 a 6.6. Para ambos indicadores, se hacen uso de los valores RMSE relativos diarios, siguiendo con la tendencia en los modelos predictivos en el ámbito de la energía solar.

	RMSE _r [%]				
	Hd				
DESCARTADOS	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	0,63	0,21	1,22	3,45	0,75
Percentil 90	4,70	0,58	7,20	15,31	1,53

Tabla 6. 1. Estimadores de error diario para días descartados - radiación directa normal.

	RMSE _r [%]				
	Hg				
DESCARTADOS	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	0,29	0,08	0,55	1,07	0,31
Percentil 90	0,60	0,09	0,66	0,80	0,22

Tabla 6. 2. Estimadores de error diario para días descartados - radiación global horizontal.

6. Extrapolación de resultados.

RMSE _r [%]								
Hd					Hg			
CASO1	A	B	C	D	A	B	C	D
Mediana	0,09	0,10	0,09	0,18	0,03	0,04	0,05	0,04
Percentil 90	0,19	0,37	0,20	0,69	0,07	0,10	0,09	0,13

Tabla 6. 3. Estimadores de error diario para el caso 1.

RMSE _r [%]					
Hd					
CASO 2	Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	0,23	0,11	0,41	0,83	0,25
Percentil 90	1,08	0,23	2,80	6,99	0,61

Tabla 6. 4. Estimadores de error diario para el caso 2.

RMSE _r [%]						
Hd			Hg			
CASO3	A /C	B/D	A	B	C	D
Mediana	0,11	0,41	0,03	0,04	0,05	0,05
Percentil 90	0,20	2,80	0,09	0,14	0,09	0,15

Tabla 6. 5. Estimadores de error diario para el caso 3.

RMSE _r [%]	
Hg	
CASO 4	Todos
Mediana	0,07
Percentil 90	0,10

Tabla 6. 6. Estimadores de error diario para el caso 4.

En el apartado 5, los valores obtenidos se identifican con errores cometidos en el tramo de la duración del hueco. En los casos 1 y 3 (componente global), en los que se han completado huecos de una hora de duración, los valores representan el RMSE relativo respecto a esa hora. Por tanto, estos resultados se adaptan al valor diario. Se calcula el error diario cometido por la presencia de un hueco de una hora. Para el resto de casos se mantienen los mismos valores calculados en el capítulo anterior. Se utilizan los valores de la mediana para estimar un error promedio, y el percentil 90, con el objetivo de fijar una incertidumbre máxima.

Una vez estimado el error en términos de energía para cada día, se dispone a evaluar la incertidumbre para cada año. Para ello se realiza el sumatorio de los errores diarios estimados para cada día corregido. En las siguiente tablas se muestran los resultados para un año servido como ejemplo, 2006. En la tabla 6.7, se presentan los errores acumulados para el conjunto de días del año en términos de energía, agrupados por caso y para cada parámetro calculado (mediana y percentil 90).

6. Extrapolación de resultados.

2006	Hd		Hg			
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]
Descartados	14072,33	2233,97	289,86	2661,06	792,21	244,09
Caso 1	Σ 1034,40	117,51	69,89	98,25	35,24	80,61
	a -	-	-	-	-	-
	b -	-	-	-	-	-
	c 19,45	8,83	9,85	5,63	3,61	6,62
	d 1014,96	108,68	60,05	92,61	31,63	73,99
Caso2	5029,77	870,15	276,14			
Caso 3	Σ 20402,13	3425,36	1051,17	1374,01	514,57	1037,29
	a -	-	-	-	-	-
	b -	-	-	-	-	-
	c 755,25	429,82	382,55	289,43	145,29	312,92
	d 19646,88	2995,54	668,62	1084,58	369,28	724,36
Caso 4	-	-	-	-	-	-
SUMATORIO DE CASOS						
Σ [kWh/m²]	40,54	6,65	1687,07	4,13	1,34	1361,98

Tabla 6. 7. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2006

A modo explicativo, la columna Σ RMSE Percentil90 para la irradiación directa normal, alberga el error acumulado en términos de Wh/m², para los distintos tipos de huecos con el empleo del percentil 90. Para el conjunto total de días descartados en 2006 se estima un error de 14072,33 Wh/m². A su vez se añade como información en la tabla, los valores de radiación acumulados para los días corregidos (columna Σ Hd), para más información del error estimado. La última fila alberga la incertidumbre estimado para el año completo en términos de energía. A modo de ejemplo, para la componente directa se ha estimado una incertidumbre anual de 40,54 kWh/m², al aplicarse un error caracterizado con el percentil 90. Para el caso de la mediana 6,65 kWh/m².

En la tabla 6.8, se muestran los mismos resultados en términos relativos a la radiación anual acumulada. Se resalta la incertidumbre asociada al año para las distintas variables en dicha tabla.

6. Extrapolación de resultados.

2006		Hd		Hg	
		Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana
		[%]	[%]	[%]	[%]
Descartados		0,71	0,11	0,15	0,04
Caso 1	Σ	0,05	0,01	0,01	0,00
	a	-	-	-	-
	b	-	-	-	-
	c	0,00	0,00	0,00	0,00
	d	0,05	0,01	0,01	0,00
Caso2		0,26	0,04	0,00	0,00
Caso 3	Σ	1,04	0,17	0,08	0,03
	a	-	-	-	-
	b	-	-	-	-
	c	0,04	0,02	0,02	0,01
	d	1,00	0,15	0,06	0,02
Caso 4		-	-	-	-
SUMATORIO DE CASOS					
Σ		0,71	0,11	0,15	0,04

Tabla 6. 8. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2006

La tabla muestra la incertidumbre de cada caso en valores de porcentaje sobre la radiación anual acumulada. A modo explicativo, en la columna Σ RMSE Mediana, se muestra la incertidumbre generada en términos de porcentaje por la mediana del RMSE para los distintos casos. Como ejemplo, la presencia de huecos del caso 2, genera una incertidumbre anual del 0,04 %. Para el conjunto de casos, se obtiene una incertidumbre total del 0,11 %.

Los resultados detallados para los años restantes se muestran en el anexo 1. Los resultados globales se muestran en la tabla 6.10. Previo a esta tabla se recuerdan el número de huecos por cada caso, tabla 6.9, pues explican las diferencias en los resultados de cada año.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Descartados	61	27	54	54	16	27	39	31	29	26
Caso 1	3	17	0	3	60	84	15	20	1	4
Caso 2	1	0	1	0	37	11	73	15	65	50
Caso 3	0	0	0	0	1	55	171	0	2	1
Caso 4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Σ (Casos 1 a 4)	6	17	1	3	98	150	259	35	68	105

Tabla 6. 9. Número de huecos agrupados por tipo y año en el periodo 2000-2009.

6. Extrapolación de resultados.

		Σ Mediana RMSE	Σ Percentil 90 RMSE	Σ anual	$\frac{\Sigma \text{ Mediana}}{\Sigma \text{ anual}}$ RMSE	$\frac{\Sigma \text{ Percentil90}}{\Sigma \text{ anual}}$ RMSE
		[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[%]	[%]
2000	Hd	4,22	21,85	2132,50	0,20	1,02
	Hg	1,27	3,02	1840,98	0,07	0,16
2001	Hd	1,36	7,70	1987,36	0,07	0,39
	Hg	0,95	3,36	1790,85	0,05	0,19
2002	Hd	3,63	15,05	1938,58	0,19	0,78
	Hg	1,23	2,38	1782,48	0,07	0,13
2003	Hd	4,58	22,24	2032,55	0,28	1,38
	Hg	1,40	3,12	1818,71	0,10	0,24
2004	Hd	1,49	6,05	2069,77	0,07	0,29
	Hg	0,33	1,05	1803,35	0,02	0,06
2005	Hd	4,11	20,88	2228,91	0,20	0,94
	Hg	1,04	2,71	1877,09	0,06	0,14
2006	Hd	6,65	40,54	1968,26	0,34	2,06
	Hg	1,34	4,13	1770,47	0,08	0,23
2007	Hd	4,27	16,52	2076,13	0,21	0,80
	Hg	0,93	1,94	1815,56	0,05	0,11
2008	Hd	2,14	12,56	2145,23	0,10	0,59
	Hg	0,56	1,47	1821,21	0,03	0,08
2009	Hd	2,06	8,18	2121,01	0,10	0,39
	Hg	0,42	1,10	1817,80	0,02	0,06

Tabla 6. 10. Estimación de la incertidumbre generada en el periodo de años 2000-2009.

En la tabla anterior, las dos primeras columnas indican el valor estimado de la incertidumbre anual en valores de energía, para cada uno de los años analizados en función del indicador empleado. La tercera columna hace referencia al valor de radiación anual acumulada. Mientras que las dos últimas, identifican la incertidumbre en términos de porcentajes. A la vista de los datos, la metodología empleada para la sustitución de huecos en la base de datos del GTER [1] genera una incertidumbre reducida en relación a los valores del RMSE relativo. Para el conjunto de años estudiados, 2000-2009, el error estimado medio máximo en la componente de radiación directa es del 0,34 % para el año 2006, lo que suponen 6,65 kWh/m². El año 2006 se caracteriza por disponer del mayor número de días corregidos, 298 en total. Si bien se considera que se comete un error máximo fijado con el percentil 90 en cada hueco, el porcentaje aumenta al 2,06 % para el mismo año, 40,54 kWh/m². Respecto a la componente global, el máximo valor empleando la mediana, se ubica nuevamente en 2003, con un valor del 0,10 % y 1,40 kWh/m². Dicho año, se caracteriza por un alto número de días descartados, los cuales se identifican con el RMSE relativo mayor. Con el cálculo mediante los percentiles 90, la incertidumbre máxima se eleva a un 0,24 % para el mismo año y 3,12 kWh/m².

En relación a los distintos tipos de hueco, se destaca que al trabajarse con huecos de reducida duración, caso 1 y caso 3 en la componente global horizontal, la influencia en la incertidumbre

6. Extrapolación de resultados.

final es muy reducida, como se ve en el año mostrado, tabla 6.8. Para un total de 171 días con este problema en la componente global, la incertidumbre generada en valores de la mediana es del 0,03 %. Por otra parte se comprueba como la incertidumbre generada depende en gran medida del número de días considerados descartados, caracterizado con los mayores RMSE relativos diarios. Los años 2001, 2004 y 2009, albergan en este sentido un menor número de días descartados, estimándose una incertidumbre menor. Si se compara la incertidumbre generada para las dos variables, debido a haberse determinado mayores errores para las técnicas de rellenado de la componente directa normal, las estimaciones son superiores en esta variable, en vista de los resultados.

7. Conclusiones.

7. Conclusiones.

En el presente proyecto se ha estimado la incertidumbre asociada a la metodología de rellenado de hueco utilizada para completar la base de datos radiométrica del GTER con medidas de radiación global horizontal y directa normal. Posteriormente, se han propagado los resultados obtenidos a los registros de la base de datos en el periodo de años 2000 - 2009.

DESCARTADOS		RMSE _r	[%]			
		Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	Hd	0,63	0,21	1,22	3,45	0,75
	Hg	0,29	0,08	0,55	1,07	0,31

Tabla 7. 1. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología de días descartados.

CASO 1		RMSE _r	[%]			
		A	B	C	D	
Mediana	Hd	4,51	11,07	2,75	5,95	
	Hg	4,65	5,75	4,93	5,88	

Tabla 7. 2. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología del caso 1.

CASO 2		RMSE _r	[%]			
		Todos	Claros	No claros	Cubiertos	Nublados
Mediana	Hd	0,23	0,11	0,37	0,83	0,25

Tabla 7. 3. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología del caso 2.

CASO 3		RMSE _r		[%]				
		Claros	No claros	A	B	C	D	
Mediana	Hd	0,11	0,45	Hg	7,12	19,61	1,69	4,56

Tabla 7. 4. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología del caso 3.

CASO 4		RMSE _r [%]	
		Todos	
Mediana	Hg	0,07	

Tabla 7. 5. Tendencia central de la incertidumbre para la metodología del caso 4.

Acerca de los resultados obtenidos se destacan los siguientes comentarios:

- La metodología aplicada para días descartados genera una incertidumbre elevada en relación a los modelos teóricos, seguidos para la generación de los valores de radiación directa normal (caso 2 y 3) y global horizontal (caso 4).

- El rellenado de huecos de una hora de duración en el orto o el ocaso, se ha caracterizado con el RMSE más elevado relativo a la duración del tramo corregido. Especialmente para la tipología de días no claros. En estos casos se toma como solución la linealización entre el orto u ocaso y el primer valor del que se disponen medidas. La búsqueda de un método más complejo para estos casos puede reducir notablemente el error característico.

- Se observa como al completarse huecos en días no claros se generan errores muy dispersos. Aumentar el número de días de estudios, bien aumentando el número de matrices aleatorias

7. Conclusiones.

generadas o siguiendo otra metodología para la distribución de los errores, debiera aumentar la precisión de los resultados para esta tipología de día. Si bien es cierto, para días claros, los resultados son satisfactorios.

		Σ Mediana RMSE	Σ Percentil 90 RMSE	Σ anual	Σ Mediana RMSE Σ anual	Σ Percentil90 RMSE Σ anual
		[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[%]	[%]
2000	Hd	4,22	21,85	2132,50	0,20	1,02
	Hg	1,27	3,02	1840,98	0,07	0,16
2001	Hd	1,36	7,70	1987,36	0,07	0,39
	Hg	0,95	3,36	1790,85	0,05	0,19
2002	Hd	3,63	15,05	1938,58	0,19	0,78
	Hg	1,23	2,38	1782,48	0,07	0,13
2003	Hd	4,58	22,24	2032,55	0,28	1,38
	Hg	1,40	3,12	1818,71	0,10	0,24
2004	Hd	1,49	6,05	2069,77	0,07	0,29
	Hg	0,33	1,05	1803,35	0,02	0,06
2005	Hd	4,11	20,88	2228,91	0,20	0,94
	Hg	1,04	2,71	1877,09	0,06	0,14
2006	Hd	6,65	40,54	1968,26	0,34	2,06
	Hg	1,34	4,13	1770,47	0,08	0,23
2007	Hd	4,27	16,52	2076,13	0,21	0,80
	Hg	0,93	1,94	1815,56	0,05	0,11
2008	Hd	2,14	12,56	2145,23	0,10	0,59
	Hg	0,56	1,47	1821,21	0,03	0,08
2009	Hd	2,06	8,18	2121,01	0,10	0,39
	Hg	0,42	1,10	1817,80	0,02	0,06

Tabla 7. 6. Estimación de la incertidumbre generada en el periodo de años 2000-2009.

La extrapolación de los resultados a la base de datos da como resultado una incertidumbre reducida en términos del RMSE. Si bien, se observan aspectos que podrían reducir la incertidumbre generada.

- El conjunto de días descartados conllevan la mayor incertidumbre en la base de datos. Estos son considerados como tales por múltiples causas. La presencia huecos de más de una hora en el orto o el ocaso, o de más de media hora durante el día ya son causa suficiente para considerar el día como descartado. Encontrar un método que solvente esta falta de registros, sin tener que recurrir a sustituir los valores diarios completos puede significar una reducción de la incertidumbre generada.

8. Bibliografía.

8. Bibliografía.

1. Metodología para el análisis y corrección de la base de datos del GTER. Proyecto fin de carrera, 2011. Elena Pérez Aparicio.
2. Restoration of long-term missing gaps in solar radiation. *Energy and Buildings*, 82, 580,591. Ogunsola, O.T., & Song, L
3. Development and test of gap filling procedures for solar radiation data of the Indian SRRRA measurement network
4. Restoration of 1–24 hour dry-bulb temperature gaps for use in building performance monitoring and analysis. Junjun Hu, Oluwaseyi T. Ogunsola, Li Song, Renee A. McPherson, Meijun Zhu, Yang Hong & Sheng Chen.
5. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Desarrollo Rural. Estaciones agroclimáticas.
www.mapa.es/siar/informacion.asp
6. ASHRAE, 1972; “Handbook of Fundamentals”, The American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers.
7. Silva Pérez, Manuel A. Estimación del Recurso Solar para Sistemas Termosolares de Concentración. Tesis doctoral, 2002.
8. Characteristic meteorological years from ground and satellite data. Solar Paces Conference, 1-8, 2009. Hoyer-Klick, C., Hustig, F., Schwandt, M.,&Meyer,R.
9. Restoration of 1–24 hour dry-bulb temperature gaps for use in building performance monitoring and analysis. Junjun Hu, Oluwaseyi T. Ogunsola, Li Song, Renee A. McPherson, Meijun Zhu, Yang Hong & Sheng Chen.

ANEXOS

ANEXO 1. Estimación de errores detallada para cada año.

Anexos.

2000	Hd		Hg				
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg	
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	
Descartados	21484,10	4182,25	320,87	3010,53	1269,42	264,19	
Caso 1	Σ	20,72	2,23	5,48	9,17	3,17	7,61
	a	-	-	-	-	-	-
	b	0,08	0,02	0,02	1,25	0,46	1,28
	c	-	-	-	-	-	-
	d	20,64	2,21	5,46	7,92	2,70	6,33
Caso2		342,59	40,48	4,90			
Caso 3	Σ	-	-	-	-	-	-
	a	-	-	-	-	-	-
	b	-	-	-	-	-	-
	c	-	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-	-
Caso 4		-	-	-	30,40	20,70	29,50
Σ [kWh/m²]		21,85	4,22	331,26	3,02	1,27	271,80

Tabla A.1. 1. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2000.

2000	Hd		Hg		
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	
	[%]	[%]	[%]	[%]	
Descartados		1,01	0,20	0,16	0,07
Caso 1	Σ	0,00	0,00	0,00	0,00
	a	-	-	-	-
	b	0,00	0,00	0,00	0,00
	c	-	-	-	-
	D	0,00	0,00	0,00	0,00
Caso2		0,02	0,00	-	-
Caso 3	Σ	-	-	-	-
	a	-	-	-	-
	b	-	-	-	-
	c	-	-	-	-
	d	-	-	-	-
Caso 4		-	-	0,00	0,00
	Σ	1,02	0,20	0,16	0,07

Tabla A.1. 2. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2000.

Anexos.

2001	Hd		Hg			
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]
Descartados	6410,74	1211,60	171,43	3255,25	908,18	155,48
Caso 1	Σ	1287,16	144,71	85,02	102,42	37,49
	a					
	b	0,97	0,27	0,26	0,26	0,09
	c	19,37	8,79	9,81	8,35	5,35
	d	1266,82	135,65	74,95	93,82	32,05
Caso2	-	-	-	-	-	-
Caso 3	Σ	-	-	-	-	-
	a	-	-	-	-	-
	b	-	-	-	-	-
	c	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-
Caso 4	-	-	-	-	-	-
Σ [kWh/m²]	7,70	1,36	256,45	3,36	0,95	255,04

Tabla A.1. 3. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2001.

2001	Hd		Hg		
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	
	[%]	[%]	[%]	[%]	
Descartados		0,32	0,06	0,18	0,05
Caso 1	Σ	0,06	0,01	0,01	0,00
	a				
	b	0,00	0,00	0,00	0,00
	c	0,00	0,00	0,00	0,00
	D	0,06	0,01	0,01	0,00
Caso2	-	-	-	-	-
Caso 3	Σ	-	-	-	-
	a	-	-	-	-
	b	-	-	-	-
	c	-	-	-	-
	d	-	-	-	-
Caso 4	-	-	-	-	-
	Σ	0,39	0,07	0,19	0,05

Tabla A.1. 4. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2001.

Anexos.

2002	Hd		Hg			
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]
Descartados	14992,60	3607,86	299,51	2384,65	1227,57	277,34
Caso 1	Σ	-	-	-	-	-
	a	-	-	-	-	-
	b	-	-	-	-	-
	c	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-
Caso2	59,48	24,67	9,69	-	-	-
Caso 3	Σ	-	-	-	-	-
	a	-	-	-	-	-
	b	-	-	-	-	-
	c	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-
Caso 4	-	-	-	-	-	-
Σ [kWh/m²]	15,05	3,63	309,19	2,38	1,23	277,34

Tabla A.1. 5. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2002.

2002	Hd		Hg	
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana
	[%]	[%]	[%]	[%]
Descartados	0,77	0,19	0,13	0,07
Caso 1	Σ	0,06	0,01	0,00
	a	-	-	-
	b	-	-	-
	c	-	-	-
	D	-	-	-
Caso2	0,00	0,00	-	-
Caso 3	Σ	-	-	-
	a	-	-	-
	b	-	-	-
	c	-	-	-
	d	-	-	-
Caso 4	-	-	-	-
	Σ	0,78	0,19	0,13
				0,07

Tabla A.1. 6. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2002.

Anexos.

2003	Hd		Hg			
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]
Descartados	22222,23	4572,25	325,67	3099,29	1394,30	276,35
Caso 1	Σ	16,78	4,12	4,55	16,78	1,38
	a					
	b	16,78	4,12	4,55	16,78	1,38
	c	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-
Caso2		-	-	-	-	-
Caso 3	Σ	-	-	-	-	-
	a	-	-	-	-	-
	b	-	-	-	-	-
	c	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-
Caso 4		-	-	-	-	-
Σ [kWh/m²]	22,24	4,58	330,22	3,12	1,40	282,31

Tabla A.1. 7. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2003.

2003	Hd		Hg	
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana
	[%]	[%]	[%]	[%]
Descartados		1,38	0,28	0,23
Caso 1	Σ	0,00	0,00	0,00
	a			
	b	-	-	-
	c	-	-	-
	D	-	-	-
Caso2		-	-	-
Caso 3	Σ	-	-	-
	a	-	-	-
	b	-	-	-
	c	-	-	-
	d	-	-	-
Caso 4		-	-	-
	Σ	1,38	0,28	0,23

Tabla A.1. 8. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2003.

Anexos.

2004	Hd		Hg				
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg	
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	
Descartados	3881,40	810,50	87,08	785,41	301,55	80,89	
Caso 1	Σ	267,74	124,28	276,03	255,91	25,68	163,17
	a	247,86	115,35	127,30	247,48	20,30	67,11
	b	0,51	0,14	138,92	0,09	0,03	88,51
	c	19,37	8,79	9,81	8,35	5,35	7,54
	d	-	-	-	-	-	-
Caso2		1700,96	527,35	271,76	-	-	-
Caso 3	Σ	202,50	30,87	6,89	9,14	2,71	6,34
	a						
	b	202,50	30,87	6,89	9,14	2,71	6,34
	c	-	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-	-
Caso 4		-	-	-	-	-	-
Σ [kWh/m²]		6,05	1,49	641,77	1,05	0,33	250,40

Tabla A.1. 9. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2004

2004	Hd		Hg		
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	
	[%]	[%]	[%]	[%]	
Descartados		0,19	0,04	0,04	0,02
Caso 1	Σ	0,01	0,01	0,01	0,00
	a	0,01	0,01	0,01	0,00
	b	0,00	0,00	0,00	0,00
	c	0,00	0,00	0,00	0,00
	D	-	-	-	-
Caso2		0,08	0,03		
Caso 3	Σ	0,01	0,00	0,00	0,00
	a	0,00	0,00	0,00	0,00
	b	-	-	-	-
	c	0,00	0,00	0,00	0,00
	d	-	-	-	-
Caso 4		-	-	-	-
	Σ	0,29	0,07	0,06	0,02

Tabla A.1. 10. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2004.

Anexos.

2005	Hd		Hg				
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg	
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	
Descartados	3881,40	810,50	87,08	785,41	301,55	80,89	
Caso 1	Σ	594,56	273,36	445,82	425,19	77,64	309,63
	a	303,55	141,26	298,49	275,64	22,61	156,50
	b	291,01	132,09	147,33	149,55	55,02	153,13
	c	-	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-	-
Caso2		2216,77	287,70	44,76	-	-	-
Caso 3	Σ	4044,62	693,96	225,29	183,88	56,07	146,33
	a	185,48	105,56	93,95	40,88	13,65	47,12
	b	3859,14	588,40	131,33	143,00	42,42	99,21
	c	-	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-	-
Caso 4		-	-	-	-	-	-
Σ [kWh/m²]		6,05	1,49	641,77	1,05	0,33	250,40

Tabla A.1. 11. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2005.

2005	Hd		Hg		
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	
	[%]	[%]	[%]	[%]	
Descartados		0,19	0,04	0,04	0,02
Caso 1	Σ	0,03	0,01	0,02	0,00
	a	0,01	0,01	0,01	0,00
	b	0,01	0,01	0,01	0,00
	c	-	-	-	-
	D	-	-	-	-
Caso2		0,10	0,01	0,00	0,00
Caso 3	Σ	0,18	0,03	0,01	0,00
	a	0,01	0,00	0,00	0,00
	b	0,17	0,03	0,01	0,00
	c	0,35	0,05	0,37	0,05
	d	-	-	-	-
Caso 4		-	-	-	-
	Σ	0,29	0,07	0,06	0,02

Tabla A.1. 12. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2005.

Anexos.

2007	Hd		Hg			
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]
Descartados	14046,74	2978,56	149,61	1800,98	886,12	135,01
Caso 1	Σ 202,98	920,52	93,11	142,82	40,25	96,20
	a 30,69	14,28	15,76	40,87	3,35	11,08
	b 60,57	17,01	16,43	16,04	5,90	14,41
	c 17,34	7,87	8,78	5,51	3,53	6,48
	d 94,37	881,35	52,14	80,39	27,46	64,22
Caso2	2269,23	369,58	96,21	-	-	-
Caso 3	Σ -	-	-	-	-	-
	a -	-	-	-	-	-
	b -	-	-	-	-	-
	c -	-	-	-	-	-
	d -	-	-	-	-	-
Caso 4	-	-	-	-	-	-
Σ [kWh/m²]	16,52	4,27	338,93	1,94	0,93	231,20

Tabla A.1. 13. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2007.

2007	Hd		Hg	
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana
	[%]	[%]	[%]	[%]
Descartados	0,68	0,14	0,10	0,05
Caso 1	Σ 0,01	0,04	0,01	0,00
	a 0,00	0,00	0,00	0,00
	b 0,00	0,00	0,00	0,00
	c 0,00	0,00	0,00	0,00
	D 0,00	0,04	0,00	0,00
Caso2	0,11	0,02	-	-
Caso 3	Σ -	-	-	-
	a -	-	-	-
	b -	-	-	-
	c -	-	-	-
	d -	-	-	-
Caso 4				
	Σ 0,80	0,21	0,11	0,05

Tabla A.1. 14. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2007.

Anexos.

2008	Hd		Hg				
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg	
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	
Descartados	5573,35	1055,30	166,53	1453,56	558,39	131,57	
Caso 1	Σ	202,98	920,52	93,11	142,82	40,25	96,20
	a	30,69	14,28	15,76	40,87	3,35	11,08
	b	60,57	17,01	16,43	16,04	5,90	14,41
	c	17,34	7,87	8,78	5,51	3,53	6,48
	d	94,37	881,35	52,14	80,39	27,46	64,22
Caso2	-	-	-	-	-	-	-
Caso 3	Σ	-	-	-	-	-	-
	a	-	-	-	-	-	-
	b	-	-	-	-	-	-
	c	-	-	-	-	-	-
	d	-	-	-	-	-	-
Caso 4	-	-	-	-	-	-	-
Σ [kWh/m²]	12,56	2,14	483,02	1,47	0,56	147,47	

Tabla A.1. 15. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2008.

2008	Hd		Hg		
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	
	[%]	[%]	[%]	[%]	
Descartados	0,26	0,05	0,08	0,03	
Caso 1	Σ	0,01	0,04	0,01	0,00
	a	0,00	0,00	0,00	0,00
	b	0,00	0,00	0,00	0,00
	c	0,00	0,00	0,00	0,00
	D	0,00	0,04	0,00	0,00
Caso2	0,11	0,02	-	-	
Caso 3	Σ	-	-	-	-
	a	-	-	-	-
	b	-	-	-	-
	c	-	-	-	-
	d	-	-	-	-
Caso 4	-	-	-	-	
Σ	0,59	0,10	0,08	0,03	

Tabla A.1. 16. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2008.

Anexos.

2009	Hd		Hg			
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hd	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ Hg
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[kWh/m ²]
Descartados	4893,15	1232,54	153,27	849,58	378,91	120,72
Caso 1	Σ 188,34	28,13	20,86	19,05	6,72	17,00
	a -	-	-	-	-	-
	b 45,82	12,87	12,42	7,91	2,91	8,10
	c -	-	-	-	-	-
	d 142,53	15,26	8,43	11,15	3,81	8,90
Caso2	2858,43	567,16	226,66			
Caso 3	Σ 235,50	235,36	235,31	228,68	33,82	4,10
	a -	-	-	-	-	-
	b 0,14	0,04	6,63	194,87	29,71	4,10
	c -	-	-	-	-	-
	d -	-	-	-	-	-
Caso 4	-	-	-	375,56	255,76	364,50
Σ [kWh/m²]	8,18	2,06	636,10	1,10	0,42	141,83

Tabla A.1. 17. Estimación de la incertidumbre generada en [Wh/m²] por tipo de hueco y conjunta - año 2009.

2009	Hd		Hg	
	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana	Σ RMSE Percentil90	Σ RMSE Mediana
	[%]	[%]	[%]	[%]
Descartados	0,23	0,06	0,05	0,02
Caso 1	Σ 0,01	0,00	0,00	0,00
	a -	-	-	-
	b 0,00	0,00	0,00	0,00
	c -	-	-	-
	D 0,01	0,00	0,00	0,00
Caso2	0,13	0,03	0,00	0,00
Caso 3	Σ 0,01	0,01	0,01	0,00
	a -	-	-	-
	b 0,00	0,00	0,01	0,00
	c -	-	-	-
	d -	-	-	-
Caso 4	-	-	-	-
	Σ 0,39	0,10	0,06	0,02

Tabla A.1. 18. Estimación de la incertidumbre generada en [%] por tipo de hueco y conjunta - año 2006.