Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Modelo para relacionar la radiación solar medida con célula fotovoltaica-piranómetro

Autor: Elías Núñez Ortega
Tutores: Isidoro Lillo Bravo
Miguel Larrañeta Gómez-Caminero

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

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Modelo para relacionar la radiación solar medida con célula fotovoltaica-piranómetro

Autor:
Elías Núñez Ortega

Tutores:
Isidoro Lillo Bravo
Miguel Larrañeta Gómez-Caminero

Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Modelo para relacionar la radiación solar medida con célula fotovoltaica-piranómetro

Autor: Elías Núñez Ortega

Tutores: Isidoro Lillo Bravo
Miguel Larrañeta Gómez-Caminero

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a toda mi familia, y en especial a mis padres y hermanas, por todo su apoyo y ánimo durante estos años. Por todo lo que me habéis enseñado desde pequeño y que me ha permitido llegar hasta aquí, por estar siempre a mi lado en los buenos y malos momentos.

A mis amigos ingenieros, los que he tenido la gran fortuna de conocer estos años. Gracias por haber estado siempre ahí, por vuestro apoyo, por tantos buenos momentos compartidos, y por ser parte de una de las etapas más importantes de mi vida.

A mi tutor Isidoro Lillo, por darme la oportunidad de realizar este trabajo y por su ayuda, total dedicación e interés durante estos meses. Gracias por todos los documentos, correcciones y sugerencias con los que he podido presentar este trabajo. También a Nativi, del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables, por su ayuda en la elaboración de los modelos.

Por último, agradecer a todos los profesores que he tenido, por aportarme los conocimientos necesarios para formarme como ingeniero.

Elías Núñez Ortega

Sevilla, 2018

Resumen

Este trabajo se centra en establecer una relación entre las medidas de irradiancia global horizontal de un piranómetro y de una célula fotovoltaica de silicio monocristalino. Para ello, primero se realiza una revisión bibliográfica para, principalmente, estudiar las variables que hacen que las medidas de ambos dispositivos sean diferentes y analizar distintos métodos propuestos que corrigen estas diferencias, así como la posibilidad de aplicarlos actualmente.

A continuación, se desarrollan y proponen una serie de modelos, en tres estaciones radiométricas con diferentes clasificaciones climáticas, para estimar las medidas de una célula a partir de los datos de un piranómetro, y viceversa.

Finalmente, se procede a la validación de los modelos obtenidos mediante un análisis visual y estadístico de los errores cometidos, en comparación con los que aparecen al utilizar las medidas de la célula o del piranómetro sin corregir.

Abstract

This project focuses on establishing a relationship between the global horizontal irradiance measurements of a pyranometer and a monocrystalline silicon solar cell. For this reason, a bibliographic review is first carried out to mainly study the variables which make the measurements of both devices different and analyse several proposed methods that correct these differences, as well as the possibility of applying them nowadays.

Then a series of models are developed and proposed, in three radiometric stations with various climatic classifications, to estimate the measurements of a reference cell from the data of a pyranometer, and vice versa.

Finally, the validation of the models obtained by means of visual and statistical analysis of the errors committed is made, in comparation with those that appear when using the uncorrected measurements of the reference cell or the pyranometer.

Índice

Agradecimientos **ix**

Resumen **xi**

Abstract **xiii**

Índice **xiv**

Índice de Tablas **xvi**

Índice de Figuras **xix**

Índice de Ilustraciones **xxi**

Notación **xxiii**

1 Introducción **1**

2 Objeto Del Trabajo **3**

3 Revisión Bibliográfica **5**

3.1 Introducción *5*

3.2 Diferencia entre los piranómetros y las células de referencia fotovoltaicas *5*

3.3 Comparación de la respuesta espectral para diferentes tipos de tecnologías *9*

3.3.1 Dependencia de la respuesta espectral 10

3.3.2 Formas de caracterizar las respuestas espectrales 12

3.4 Relación entre el espectro solar y el índice de claridad *13*

3.5 Procedimientos para corregir la irradiancia global medida por una célula de silicio *14*

3.6 Tratamiento de la irradiancia en distintos programas de cálculo de instalaciones fotovoltaicas *18*

3.7 Conclusiones *19*

4 Metodología **21**

4.1 Introducción *21*

4.2 Descripción de los equipos de medición *21*

4.3 Análisis de los datos *22*

4.4 Cálculo de los modelos piranómetro-célula *23*

4.4.1 Estación del GTER, Sevilla 23

4.4.2 Estación de California, EE. UU. 30

4.4.3 Estación de Australia 30

4.5 Cálculo de los modelos célula-piranómetro *31*

4.5.1 Estación del GTER, Sevilla 31

4.5.2 Estación de California, EE. UU. 37

4.5.3 Estación de Australia 37

4.6 Conclusiones de los modelos *38*

5 Validación **39**
5.1 Validación de los modelos piranómetro-célula *40*
5.1.1 Modelo de la estación del GTER, Sevilla 40
5.1.2 Modelo de la estación de EE. UU. 44
5.1.3 Modelo de la estación de Australia 47
5.2 Validación de los modelos célula-piranómetro *50*
5.2.1 Modelo de la estación del GTER, Sevilla 50
5.2.2 Modelo de la estación de EE. UU. 54
5.2.3 Modelo de la estación de Australia 57
6 Conclusiones y Líneas de Trabajo Futuras **61**
Referencias **63**
Anexo A **65**
Anexo B **67**
Anexo C **83**
Anexo D **93**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Localización y características climáticas de las estaciones utilizadas. Periodo de recogida de datos 22

Tabla 4-2. Coeficientes de ajuste obtenidos a partir de los valores de radiación global horizontal medidos por la célula y el piranómetro para cada uno de los subconjuntos de datos divididos en función de la altura solar y el índice de claridad. Modelo Piranómetro-Célula 24

Tabla 4-3. Coeficientes de ajuste promedio para cada subconjunto dependiente del índice de claridad. Modelo Piranómetro-Célula 25

Tabla 4-4. Coeficientes de la relación polinómica de grado 2 entre k_t y los coeficientes de ajuste, para cada altura solar igual o superior a 25°. Modelo Piranómetro-Célula 28

Tabla 4-5. Coeficientes de ajuste obtenidos a partir de los valores de radiación global horizontal medidos por la célula y el piranómetro para cada uno de los subconjuntos de datos divididos en función de la altura solar y el índice de claridad. Modelo Célula-Piranómetro 32

Tabla 4-6. Coeficientes de ajuste promedio para cada subconjunto dependiente del índice de claridad. Modelo Célula-Piranómetro 33

Tabla 4-7. Coeficientes de la relación polinómica de grado 2 entre k_t y los coeficientes de ajuste, para cada tramo de altura solar igual o superior a 25°. Modelo Célula-Piranómetro 36

Tabla 5-1. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por la célula. 43

Tabla 5-2. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por la célula. 43

Tabla 5-3. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas del piranómetro y de la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por la célula. 43

Tabla 5-4. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por la célula. 46

Tabla 5-5. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por la célula. 46

Tabla 5-6. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por la célula. 46

Tabla 5-7. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por la célula. 49

Tabla 5-8. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por la célula. 49

Tabla 5-9. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por la célula. 49

Tabla 5-10. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por el piranómetro. 53

Tabla 5-11. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por el piranómetro. 53

Tabla 5-12. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por el piranómetro. 53

Tabla 5-13. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por el piranómetro. 56

Tabla 5-14. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por el piranómetro. 56

Tabla 5-15. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por el piranómetro. 56

Tabla 5-16. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por el piranómetro. 59

Tabla 5-17. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por el piranómetro. 59

Tabla 5-18. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por el piranómetro. 59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Diferencia entre la radiación diaria medida con un piranómetro de termopila y una célula de referencia de silicio cristalino, debida a efectos espectrales. [1] 6

Figura 3-2. Incertidumbres en las mediciones de la irradiancia realizadas mediante un piranómetro de termopila y una célula de referencia, para un día representativo. [2] 7

Figura 3-3. Respuesta espectral de células de distintos materiales fotovoltaicos. [8] 9

Figura 3-4. Impacto de la masa de aire en el rendimiento de las tecnologías fotovoltaicas. [10] 10

Figura 3-5. Impacto del AOD en el rendimiento de las tecnologías fotovoltaicas. [10] 11

Figura 3-6. Impacto del PW en el rendimiento de las tecnologías fotovoltaicas. [10] 12

Figura 3-7. Respuesta relativa del piranómetro a la función AM_a. [18] 14

Figura 3-8. Respuesta relativa del piranómetro a la función AOI. [18] 15

Figura 3-9. Factores de corrección para la irradiancia global horizontal. [19] 17

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 4-1. Coeficiente de ajuste para el subconjunto de valores $20° \leq \alpha < 25°$ y $0.5 < k_t \leq 0.6$. Modelo Piranómetro-Célula 24

Ilustración 4-2. Relación entre los coeficientes de ajuste promedio y el índice de claridad para alturas solares menores de 25°. Modelo Piranómetro-Célula 25

Ilustración 4-3. Relación entre los coeficientes de ajuste y el índice de claridad para alturas solares iguales o superiores a 25°. Modelo Piranómetro-Célula 27

Ilustración 4-4. Relación entre los coeficientes de la tabla 4-4 y la altura solar. La serie azul se corresponde con k_t^2, la roja con k_t, y la verde con término independiente. Modelo Piranómetro-Célula 28

Ilustración 4-5. Coeficiente de ajuste para el subconjunto de valores $20° \leq \alpha < 25°$ y $0.2 < k_t \leq 0.3$. Modelo Célula-Piranómetro 32

Ilustración 4-6. Relación entre los coeficientes de ajuste promedio y el índice de claridad para alturas solares menores de 25°. Modelo Célula-Piranómetro 33

Ilustración 4-7. Relación entre los coeficientes de ajuste y el índice de claridad para los tramos de altura solar iguales o superiores a 25°. Modelo Célula-Piranómetro 35

Ilustración 4-8. Relación entre los coeficientes de la tabla 4-7 y la altura solar. La serie azul se corresponde con k_t^2, la roja con k_t, y la verde con término independiente. Modelo Célula-Piranómetro 36

Ilustración 5-1. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de Sevilla, Piranómetro-Célula 42

Ilustración 5-2. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de EE. UU., Piranómetro-Célula 45

Ilustración 5-3. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de Australia, Piranómetro-Célula 48

Ilustración 5-4. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de Sevilla, Célula-Piranómetro 52

Ilustración 5-5. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de EE. UU., Célula-Piranómetro 55

Ilustración 5-6. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de Australia, Célula-Piranómetro 58

Notación

I_{cc}	Corriente de cortocircuito
AOI	Ángulo de incidencia
DNI	Irradiancia directa normal
SF	Factor Espectral
AM	Masa de aire
AOD	Profundidad óptica del aerosol
PW	Humedad relativa
APE	Energía media de los fotones
UF	Fracción Útil
k_t	Índice de claridad
IAM	Modificador del ángulo de incidencia
I_{mp}	Intensidad del punto de máxima potencia
V_{mp}	Tensión del punto de máxima potencia
α	Altura solar
I_o	Irradiancia extraterrestre
RMSE	Error cuadrático medio
RR	Ramp Rate

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, existen muchos equipos capaces de medir la radiación global horizontal. Los principales son los piranómetros, las células fotovoltaicas y los fotodiodos. Los piranómetros son los dispositivos más precisos y se basan en el efecto Seebeck. Otros dispositivos de menor coste, como las células fotovoltaicas y los fotodiodos, tienen una mayor incertidumbre por no abarcar todo el espectro de la radiación solar.

Este trabajo se centrará en el estudio de los dos primeros equipos, analizando sus posibles diferencias y estableciendo un método para poder relacionar las mediciones de radiación de ambos.

Las aplicaciones de estos dispositivos son variadas, aunque en todas ellas no son igual de adecuados. Las células son muy útiles en el sector fotovoltaico, para determinar la irradiancia global que realmente es útil para el módulo fotovoltaico de la misma tecnología. Los piranómetros, por abarcar todo el espectro solar, son los idóneos para cuantificar realmente la irrandiancia global en un emplazamiento.

En la bibliografía existen diferentes métodos para corregir las desviaciones en las mediciones cuando no se dispone del dispositivo más adecuado. Sin embargo, en la práctica es difícil aplicarlos debido a que requieren parámetros que normalmente no están disponibles.

En este trabajo se proponen modelos simplificados y basados en muy pocos datos conocidos que simulan la radiación que mediría una célula a partir de los datos 5/10-minutales medidos por un piranómetro, y viceversa, con los datos 5/10-minutales medidos a través de las células estimar las mediciones que haría un hipotético piranómetro.

Como resultado, se demuestra mediante análisis visual y estadístico que estos modelos simplificados reducen considerablemente los errores cometidos al utilizar directamente los datos de los piranómetros o las células. Para conseguirlo, se basan en dos variables sencillas de obtener, como son la altura solar y el índice de claridad, calculables a partir de las propias mediciones de los equipos.

Además, se evalúa la posibilidad de que los modelos puedan ser aplicados universalmente, más allá del emplazamiento en el que fueron calculados, obteniéndose buenos resultados. Para ello se calculan y comprueban hasta en tres estaciones distintas, con clasificaciones climáticas diferentes.

2 OBJETO DEL TRABAJO

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar unos modelos simplificados que simulen la radiación que mediría una célula fotovoltaica de silicio monocristalino a partir de los datos medidos por un piranómetro. Asimismo, se desarrollan también modelos que, dados los datos medidos por una célula de silicio monocristalino, estimen las mediciones de un piranómetro. Con estos modelos se pretende disminuir los errores que se cometen en las aplicaciones en las que no se dispone del equipo más adecuado.

Otro propósito importante es estudiar si los modelos obtenidos pueden aplicarse de manera general independientemente del emplazamiento.

Para conseguir estos objetivos, el trabajo está dividido en distintas secciones. En la tercera, se realiza un análisis bibliográfico, en el que primero se evalúan las diferencias entre los piranómetros y las células fotovoltaicas, utilizados para medir la irradiancia global horizontal, para después centrarse, principalmente, en qué métodos existen para corregir las diferencias entre las mediciones de dichos equipos, y la posibilidad de aplicarlos actualmente. Además, se comparan las respuestas espectrales de las tecnologías fotovoltaicas más importantes.

En la sección 4 se describe la metodología para el desarrollo de los modelos. Los procedimientos seguidos son equivalentes, presentándose primero las series sintéticas de datos de radiación medidos por una célula dados los datos de un piranómetro. Posteriormente, se calculan las series que simulan la radiación captada por un piranómetro, partiendo de las mediciones de una célula. Para ello se cuenta con medidas de tres estaciones, en cada una de las cuales se calculan sus correspondientes modelos.

La sección 5 es el proceso de validación, mediante un análisis estadístico que permita determinar la exactitud de los modelos calculados, y la visualización de los errores cometidos en algunos días de los años escogidos para la comprobación.

Finalmente, se presentan las conclusiones alcanzadas y unas líneas de trabajo futuras.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introducción

Como se ha indicado, los dispositivos más frecuentemente utilizados para medir la radicación solar son los piranómetros, los fotodiodos y las células fotovoltaicas. La diferencia fundamental entre ellos es que el piranómetro mide la radiación solar en todo su espectro y la célula fotovoltaica no, ambos tienen diferentes tiempos de respuesta, el ángulo de incidencia, la temperatura de la célula, etc.

Se presenta una revisión bibliográfica de los factores más importantes que afectan a la medida de la radiación solar mediante un dispositivo fotovoltaico y mediante un piranómetro.

La respuesta de los diferentes tipos de tecnologías de células fotovoltaicas a la radiación incidente depende, entre otros factores, de su espectro de absorción, que es la capacidad de transformar fotones de una longitud de onda determinada en electricidad.

Esta dependencia, que no es igual y cambia según el tipo de tecnología, es importante que sea tenida en cuenta a la hora de seleccionar la más adecuada para un determinado proyecto.

Debido a ello, más adelante se comparará el espectro solar con los principales tipos de tecnologías fotovoltaicas.

3.2 Diferencia entre los piranómetros y las células de referencia fotovoltaicas

Para medir de manera precisa el rendimiento de un sistema fotovoltaico, se necesita emplear el sensor de medición de la radiación que presente menos incertidumbres. Actualmente, en las plantas se recurre a piranómetros y dispositivos de referencia fotovoltaicos calibrados.

Antes de evaluar las diferencias entre ambos tipos de tecnologías, se explica de manera resumida en qué consisten.

- Piranómetros

Existen de distintos tipos, como los térmicos (o basados en termopilas) o fotodiodos, aunque los más utilizados en las plantas son los de termopila. Este tipo de piranómetros están construidos con un disco negro cubierto por una cúpula, siendo el disco el que absorbe la radiación solar que se trasmite a través de la cúpula. Miden la irradiancia indirectamente midiendo la diferencia de temperatura entre las dos superficies [1], [2]. Además, se presuponen pocos errores de dirección y aquellos debidos a la suciedad del sensor [3].

- Células de referencia

Convierten los fotones con energía por encima de la banda prohibida del material fotovoltaico en electrones a través del efecto fotovoltaico. La corriente generada depende del número y la distribución espectral de los fotones. Estas células, al contrario que los piranómetros, están diseñadas directamente para medir la irradiancia disponible en un módulo fotovoltaico. Debido a que la respuesta espectral de la célula y el módulo es similar, la dispersión de datos por condiciones espectrales variables se ve reducida [4], [5].

Analizados los principios de funcionamiento de los dispositivos, es conveniente estudiar las diferencias que hacen que la irradiancia medida no sea igual en ambos.

Las principales variables que causan estas diferencias en las mediciones son el espectro incidente, el ángulo de incidencia, la temperatura y tiempo de respuesta de los dispositivos, el nivel de irradiancia, etc.

Los piranómetros, virtualmente, no muestran selectividad espectral, por lo que se puede considerar que tienen una respuesta plana a la luz solar desde el ultravioleta hasta el infrarrojo lejano, haciéndolos adecuados para medir toda la radiación incidente de onda corta. Debido a ello aparece un error por el desajuste de la respuesta espectral con respecto a los dispositivos fotovoltaicos. En cambio, las células de referencia si dependen del espectro y la respuesta cambia con el tipo de tecnología. Como se analizará posteriormente, las condiciones climáticas (masa de aire, aerosoles, vapor de agua, …) influyen en las tecnologías, siendo las de película delgada las que se ven más afectadas. Considerando una respuesta similar a la de los módulos fotovoltaicos, se deduce que el desajuste espectral se anula [1]–[4], [6].

En relación con el ángulo de incidencia, en los piranómetros aparecen errores pequeños para ángulos menores de 40°, y más altos por debajo de 60° y, además, responden a todos los ángulos. Las células de referencia se ven más afectadas por estos errores de dirección, que pueden ser altos cuando los ángulos de incidencia son grandes, y presentan una mayor reflectancia que reduce la eficiencia de la radiación incidente [1], [3], [4].

Respecto a la temperatura, los piranómetros presentan una salida estable independientemente de las condiciones ambientales, por lo que la temperatura tiene una influencia pequeña. Por el contrario, en las células causa un mayor impacto, que se verá potenciado en climas con temperaturas extremas [1], [4]. Se concluye que ambos dispositivos reaccionan de manera distinta a la temperatura.

El tiempo de respuesta también es diferente para las dos tecnologías. En los piranómetros es de 5-30 segundos (lo que puede suponer un problema a la hora de medir el rendimiento del sistema fotovoltaico), mucho mayor que en las células de referencia (milisegundos o menos, lo que permite que midan con precisión cambios de irradiancia muy abruptos) [1]–[4]. Sin embargo, esta diferencia puede ser poco relevante cuando se quiere garantizar un buen rendimiento a largo plazo, más que instantáneamente [1]. Si se utilizan piranómetros basados en fotodiodos, éstos tienen tiempos de respuesta menores que los de termopilas [7].

Si se compara la irradiancia diaria a cielo despejado entre un piranómetro y una célula, aparecen unos errores de hasta el 3% (muy variable durante días, semanas y meses), cuando únicamente se tienen en cuenta los efectos espectrales. Si se incluyen otros efectos (ángulo de incidencia, etc.), los errores pueden ser mayores [1].

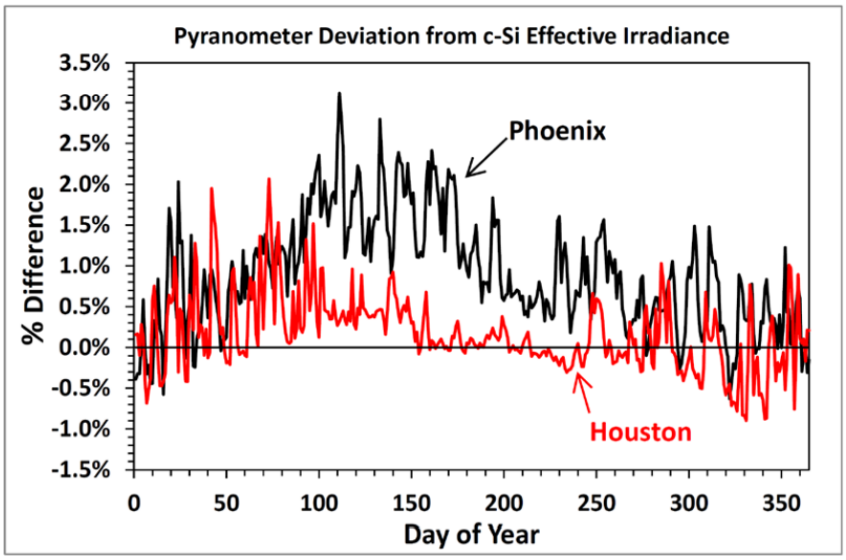


Figure 5. Example calculated differences (using clear-sky spectral modeling) from TMY data between daily insolation as measured with a thermopile pyranometer and a c-Si PV reference cell. Differences shown are due solely to spectral effects.

Figura 3-1. Diferencia entre la radiación diaria medida con un piranómetro de termopila y una célula de referencia de silicio cristalino, debida a efectos espectrales. [1]

Adicionalmente, existen otras incertidumbres cuando se utiliza un piranómetro de termopila o una célula de referencia que se comentan brevemente.

En los piranómetros las principales incertidumbres son en la medición de la tensión de salida y en la medición de la respuesta (relación entre la tensión de salida y la irradiancia medida). En esta última, que es la incertidumbre más influyente, las fuentes de error son, además de las comentadas anteriormente (ángulo de incidencia, desajuste espectral, tiempo de respuesta, …), la calibración, el offset térmico, el error de alineación angular y la no linealidad [1], [2].

El Offset térmico es debido a un error de polarización negativa en las medidas de la irradiancia, mientras que el error de alineación angular se debe a incertidumbres en la alineación del piranómetro en las direcciones azimutal y cenital. Por último, el error de respuesta angular aparece por la respuesta angular no ideal de los piranómetros [1], [2].

Respecto a las células, las incertidumbres aparecen en la medición de la corriente de cortocircuito (cuyas fuentes de error son la electrónica de medida, la no linealidad con la intensidad de la luz, la desviación de la tensión de circuito abierto y un error de alineación angular), en el coeficiente de temperatura de dicha intensidad, en la temperatura de la célula, etc. [1], [2].

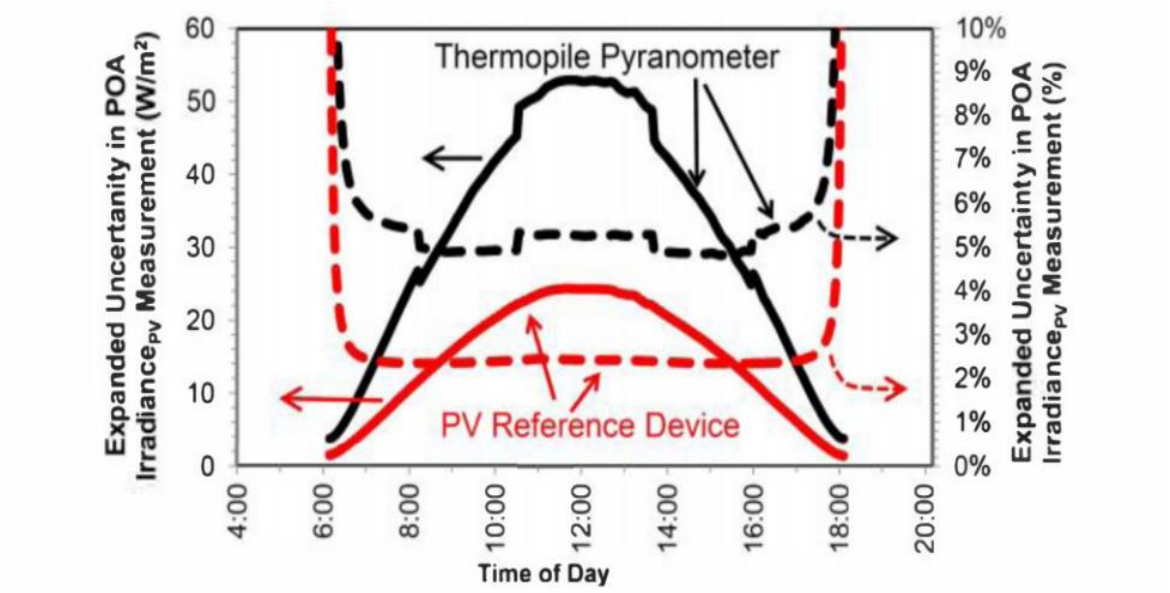


Figura 3-2. Incertidumbres en las mediciones de la irradiancia realizadas mediante un piranómetro de termopila y una célula de referencia, para un día representativo. [2]

En caso de utilizar dispositivos de no alta calidad o en condiciones atmosféricas distintas de cielo despejado, las incertidumbres en las mediciones pueden ser mucho mayores para los piranómetros de termopila, justo al contrario que en las células, en las que cambios en las condiciones atmosféricas no debería afectarles [1].

Según estudios, estas incertidumbres en las mediciones de la irradiancia son del orden del ± 5 % para piranómetros de termopila y ± 2.4 % para dispositivos de referencia fotovoltaicos. Por tanto, se observa que las células logran mejores resultados, que implican mediciones más precisas de rendimiento y la posibilidad de detectar degradación o desviaciones respecto al rendimiento esperado [1], [2].

Otro indicador de dicha conclusión es el índice "*Performance Ratio*" cuyo valor, cuando es calculado con bases de datos de piranómetros, es un 2 - 4 % inferior que cuando se utilizan las de células [3].

Una vez analizadas las fuentes de incertidumbre, parece necesario el desarrollo de modelos que permitan limitarlas, de cara a un aumento de la precisión de las medidas, o cuantificarlas de una manera sencilla.

En [5] se presenta una metodología para reducir el error en la medición de la corriente de cortocircuito de una célula de referencia, en concreto se nombran dos métodos.

El primero de ellos es independiente de la fuente de luz, y en él se utilizan una célula de referencia calibrada y un factor de desajuste espectral con el que se corrige la intensidad de cortocircuito con respecto a las condiciones estándar (mejorando la eficiencia de la célula). El resultado es el error reducido a menos de un 1 %.

El segundo método es independiente de la célula de referencia, y aunque es menos preciso, es igualmente aplicable ya que supondrá una mejora respecto a no realizar ninguna corrección en la I_{cc}.

David L. King et al. (1997) analizan en [6] otros procedimientos para medir los efectos de los cambios en el espectro solar y el ángulo de incidencia que dificultan la caracterización de los paneles fotovoltaicos y el rendimiento del sistema.

ASTM también introduce una ecuación de un término de desajuste espectral para corregir la corriente de cortocircuito medida al valor adecuado para una distribución espectral estándar. Además, se proporciona una segunda ecuación que ayuda a la corrección mediante una función de la masa de aire, dependiente únicamente del ángulo cenital del Sol y la altitud del emplazamiento.

Respecto al ángulo de incidencia (AOI), una función empírica relaciona la corriente de cortocircuito del módulo con el AOI de manera más profunda que las típicas pérdidas por el factor coseno. Esta función depende del ángulo de incidencia, la inclinación del módulo, el ángulo cenital del Sol y el ángulo acimutal del módulo y del Sol.

En otras publicaciones [7], se estudia la relación entre la irradiancia directa normal (DNI) y la distribución de radiación espectral (a su vez relacionada con la masa de aire). Se define la DNI como una función de la masa de aire y la altitud del emplazamiento.

3.3 Comparación de la respuesta espectral para diferentes tipos de tecnologías

La respuesta espectral, definida como los amperios generados por vatio de luz incidente de una longitud de onda dada, es la magnitud más relevante para comprender la conversión de los fotones incidentes en electricidad en los dispositivos fotovoltaicos.

La siguiente figura muestra las respuestas espectrales normalizadas típicas de las tecnologías más importantes.

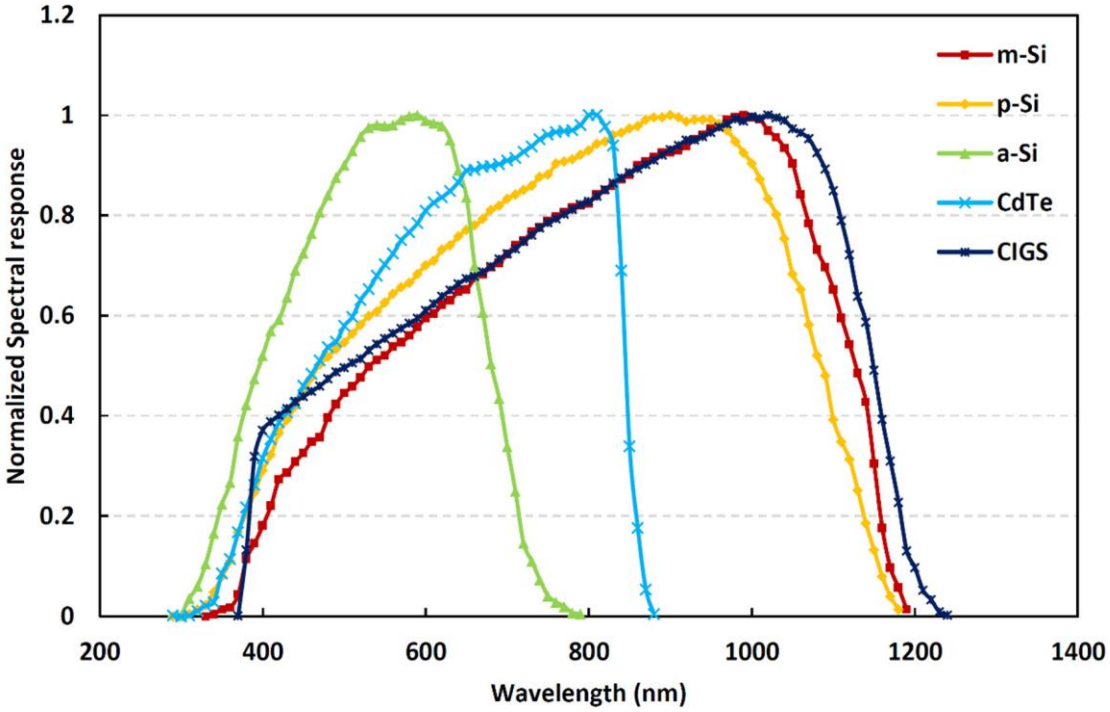


Figura 3-3. Respuesta espectral de células de distintos materiales fotovoltaicos. [8]

Como se observa, la tecnología CIGS es la que tiene una respuesta espectral mayor, por encima del silicio monocristalino y policristalino, seguidas del teluro de cadmio y, por último, el silicio amorfo. Los máximos de las respuestas se alcanzan en longitudes de onda largas en el silicio cristalino y CIGS, y en longitudes más cortas para el silicio amorfo.

Además, los materiales con baja brecha energética (banda prohibida), silicio cristalino y CIGS (con amplias bandas de absorción), muestran un rendimiento espectral estable y, por tanto, una baja dependencia espectral. En cambio, aquellos materiales con alta brecha energética, teluro de cadmio y silicio amorfo, que cuentan con bajas bandas de absorción, manifiestan una notable dependencia espectral [8], [9].

Comentada la dependencia espectral de las tecnologías, cabe preguntarse qué perdidas o ganancias podrán tener lugar. Para ello se recurre al índice *Factor Espectral* (SF, por sus siglas en inglés), que indica la influencia del espectro de la radiación solar incidente en la energía de salida [10]. De esta manera, se utilizará para estimar las ganancias o pérdidas energéticas relativas en un dispositivo en particular, debidas a las diferencias entre el espectro real incidente y el de referencia.

En las tecnologías de silicio cristalino, el SF es bastante homogéneo, prevaleciendo las pérdidas espectrales. Estas pérdidas pueden alcanzar el 3 % (principalmente en primavera y principios del verano), mientras que las ganancias son de hasta el 2 % (principalmente en otoño, invierno y parte del verano) [9], [11]. Estas pérdidas y ganancias representan la relación entre la I_{cc} producida en el material fotovoltaico y la obtenida bajo el espectro solar estándar.

Por el contrario, los dispositivos de película delgada (silicio amorfo y teluro de cadmio) tienen una mayor variabilidad, mostrando altas ganancias en primavera y verano, y mayores pérdidas espectrales durante los meses de otoño e invierno [9], [11]. La tecnología más sensible es el a-Si, con ganancias y pérdidas de hasta el 10 %.

Mediante estos análisis, se puede deducir que, mientras más estrecha es la respuesta de un dispositivo, más sensible es el *Factor Espectral*.

Asimismo, es conveniente indicar que la distribución espectral de la radiación depende también del emplazamiento, siendo las tecnologías de película delgada las que se ven las afectadas por la latitud y las diferentes condiciones climáticas [11].

Una vez definido el espectro solar de algunos dispositivos, se analizan a continuación qué variables influyen en la respuesta espectral y las funciones o parámetros que pueden caracterizarlas.

3.3.1 Dependencia de la respuesta espectral

Las principales variables de las que depende la respuesta espectral de los dispositivos fotovoltaicos son la masa de aire, los aerosoles y el vapor de agua [8], [10]–[13]. Otras variables son las condiciones del emplazamiento (clima, contaminación, polvo, …), metano, oxígeno, dióxido de carbono, ozono, ... [8], [13].

3.3.1.1 Masa de aire

Cuantifica el efecto de la cantidad de materia de la atmósfera que debe atravesar los rayos solares con respecto a una trayectoria vertical. Su aumento produce una gran atenuación en la región ultravioleta del espectro. Además, es el parámetro con mayor impacto en el rendimiento de los dispositivos fotovoltaicos [8].

Los materiales con alta brecha energética (CdTe y a-Si) se ven más afectados [8], [10], con pequeñas ganancias espectrales para bajos valores de AM y altas pérdidas cuando AM aumenta [10]. En cambio, los materiales con baja brecha energética (silicio cristalino) muestran un comportamiento más estable [8], [10], con pequeñas pérdidas espectrales para bajos valores de AM [10].

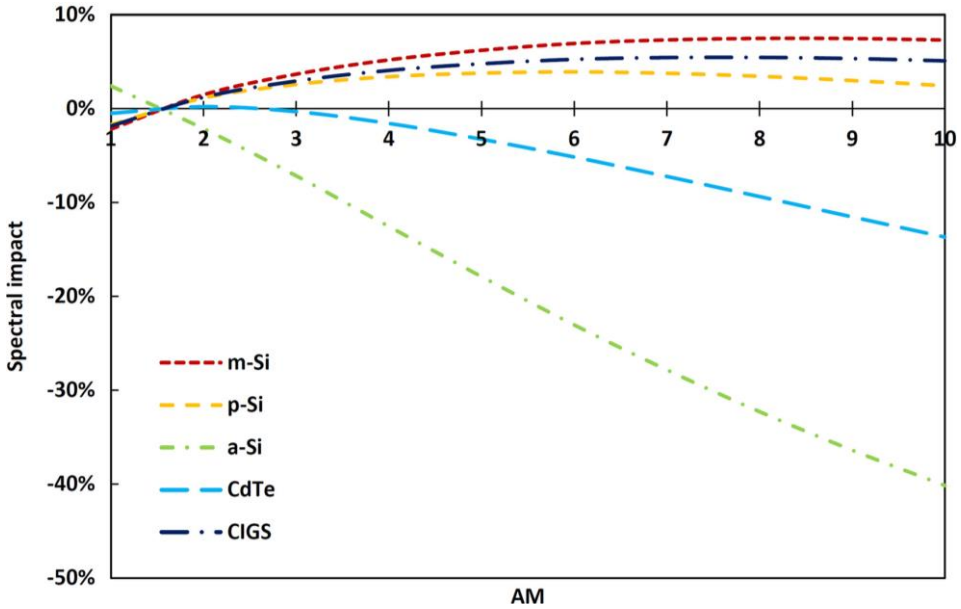


Figura 3-4. Impacto de la masa de aire en el rendimiento de las tecnologías fotovoltaicas. [10]

3.3.1.2 Aerosoles

La atenuación de la irradiancia espectral debida a los aerosoles en la atmósfera se puede aproximar mediante la fórmula de Ångström (AOD, profundidad óptica del aerosol), que depende del parámetro AOD_{550} (cantidad de aerosoles en una columna vertical de la atmósfera a 550 nm) y el coeficiente de Ångström α [8].

$$AOD = AOD_{550} \cdot (\lambda/0.55)^{-\alpha} \quad (3\text{-}1)$$

Un aumento del AOD_{550} produce una mayor atenuación en la región ultravioleta-visible del espectro. Además, tiene un impacto mayor en la irradiancia directa normal que en la global [8].

Los materiales con alta brecha energética, con ganancias espectrales para bajos AOD_{550} y significativas pérdidas para valores altos del parámetro, se ven más afectados que aquellos que tienen baja brecha energética, en los que las variaciones de AOD_{550} tienen poca influencia [8], [10].

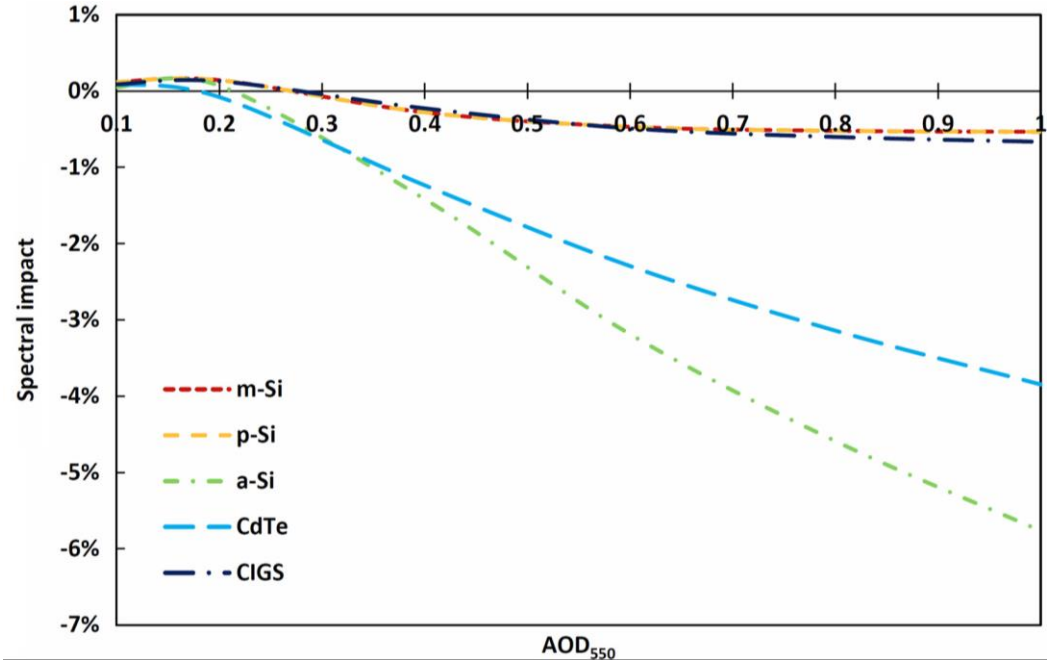


Figura 3-5. Impacto del AOD en el rendimiento de las tecnologías fotovoltaicas. [10]

3.3.1.3 Vapor de agua

Su presencia en la atmósfera causa una importante absorción en la distribución espectral que llega a la superficie terrestre. Estos efectos se cuantifican mediante la humedad relativa (PW) [8].

Un incremento de la humedad relativa produce una atenuación significativa de la irradiancia espectral en la región cercana al infrarrojo del espectro [8].

Aquellos materiales con alta brecha energética, con pérdidas espectrales para bajos valores de PW y ganancias cuando éste aumenta, se ven más afectados que los materiales con baja brecha energética [8], [10].

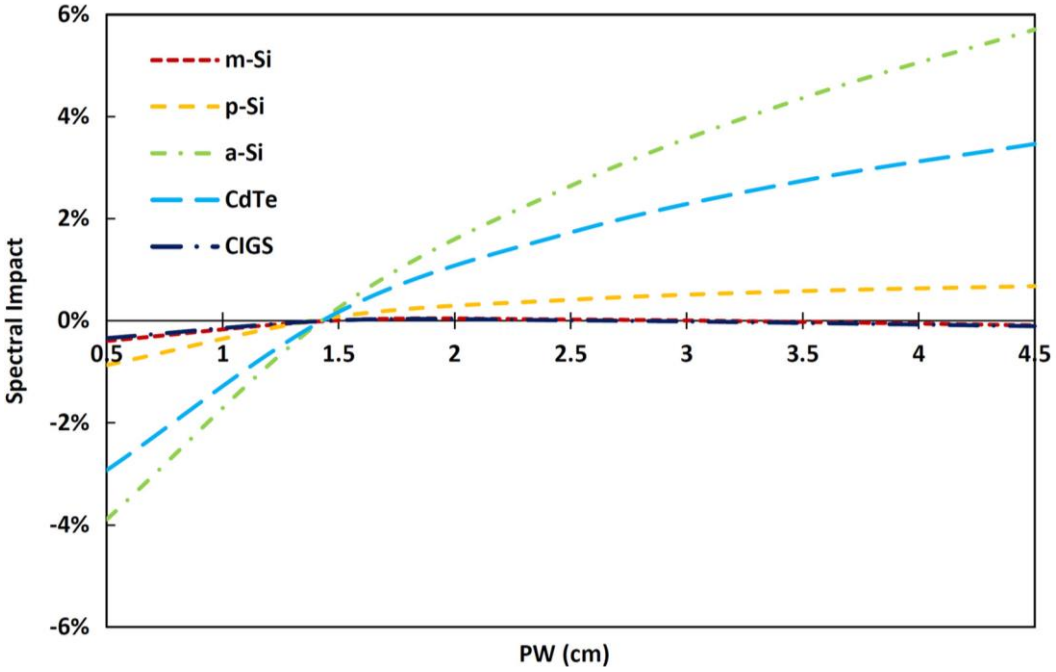


Figura 3-6. Impacto del PW en el rendimiento de las tecnologías fotovoltaicas. [10]

Respecto a la influencia de las condiciones atmosféricas, los parámetros que más afectan, en condiciones de cielo despejado, son los aerosoles y el vapor de agua [11]. Como se ha comentado, éstos tienen un gran impacto en las tecnologías de película delgada.

3.3.2 Formas de caracterizar las respuestas espectrales

Para caracterizar la respuesta espectral de los dispositivos fotovoltaicos, se acude a una serie de parámetros, exponiéndose a continuación los más utilizados:

- APE

Este parámetro, independiente del dispositivo y propuesto por Jardine et al. (2002), representa la energía promedio de todos los fotones que inciden sobre una superficie, y describe la calidad espectral de la irradiancia solar [14]. Además, relaciona la energía de un espectro solar dado con la masa de aire y el índice de claridad [9].

APE está relacionado con el color del espectro solar. Por ello, un valor alto se corresponde con un espectro rico en azul, mientras que un APE bajo indica un espectro rico en rojo [11]. En diferentes estudios ha sido utilizado estadísticamente para evaluar el rendimiento exterior de los módulos fotovoltaicos (Minemoto et al., 2009b) [10], [11].

- Factor Espectral (SF)

Este índice, comentado anteriormente, sí depende del dispositivo fotovoltaico. Como se indicó, describe el rendimiento relativo de un módulo operando bajo el espectro solar estándar con respecto al rendimiento bajo irradiancia incidente arbitraria [11].

Propuesto por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), un valor de SF > 1 indica ganancias espectrales, mientras que si el valor es < 1 significa pérdidas en el dispositivo (siempre con respecto al espectro de referencia) [8], [10].

- Fracción Útil (UF)

Este parámetro representa la fracción del espectro solar disponible para la conversión fotovoltaica [8], [9].

Adicionalmente, existen otros muchos índices espectrales más o menos utilizados. Una lista detallada de algunos de ellos está disponible en [8].

3.4 Relación entre el espectro solar y el índice de claridad

Uno de los parámetros que aparecerá en los modelos desarrollados más adelante será el índice de claridad k_t, definido como el cociente entre la radiación global horizontal y la radiación extraterrestre. Este parámetro mide la transparencia de la atmósfera, aportando información sobre la presencia de nubes o calimas.

Por ello, es conveniente analizar la relación entre los parámetros atmosféricos que alteran el espectro solar incidente y el índice de claridad.

Si se utiliza el parámetro APE para caracterizar el espectro solar, se observa que su valor se verá reducido al aumentar el índice de claridad (lo que índice que APE disminuye cuando lo hace la cantidad de nubes) y, también, cuando aumenta AM. Por tanto, se concluye que el espectro solar tiene una estrecha relación con k_t y AM [15].

Otra variable influyente en el espectro es la cantidad de aerosoles, que atenúan la radiación solar (debido a que favorecen la formación de nubes) y definen el grado de turbidez del cielo (la atenuación aumentará con la turbidez) [16]. Además, la irradiancia directa normal también se ve afectada por los aerosoles en áreas influenciadas por intrusiones de polvo del desierto y actividades antropogénicas intensas. Dicha atenuación es importante ya que puede alcanzar valores de hasta el 35 – 45 %, dependiendo del área en cuestión y la época del año [17].

3.5 Procedimientos para corregir la irradiancia global medida por una célula de silicio

En la bibliografía existen diferentes modelos, de mayor o menor complejidad, para estimar la irradiancia que mediría un piranómetro a partir de los datos medidos por una célula de silicio cristalino, utilizando ciertos parámetros. A continuación, se presentan algunos de ellos, indicando los procedimientos que siguen y las principales variables de las que dependen.

- David L. King and Daryl R. Myers, 1997. [18]

Se proporciona una expresión para corregir la respuesta medida (R) de un piranómetro de fotodiodo de silicio para las influencias del espectro solar, el ángulo de incidencia y la temperatura. Con esta respuesta corregida se puede conseguir una mejora en la estimación de la irradiancia total (E_t). El modelo es también aplicable a células o módulos de referencia fotovoltaicos.

$$R = f_1(AM_a) \cdot \left[C_1 \cdot \frac{E_{dni}}{E_o} \cdot cos(AOI) \cdot f_2(AOI) + C_2 \cdot \frac{E_{diff}}{E_o}\right] \cdot [1 - \alpha \cdot (T - T_o)]^{-1} \quad (3\text{–}2)$$

La influencia del espectro solar se contabiliza mediante la función $f_1(AM_a)$, relacionada con la masa de aire absoluta, calculable a partir de la hora del día y la latitud, longitud y altitud del emplazamiento. Para los efectos del ángulo de incidencia, se incluye la función $f_2(AOI)$. Mientras que para la influencia de la temperatura se utiliza un coeficiente α.

En las siguientes figuras se muestran las respuestas del piranómetro a las influencias de la masa de aire y el ángulo de incidencia.

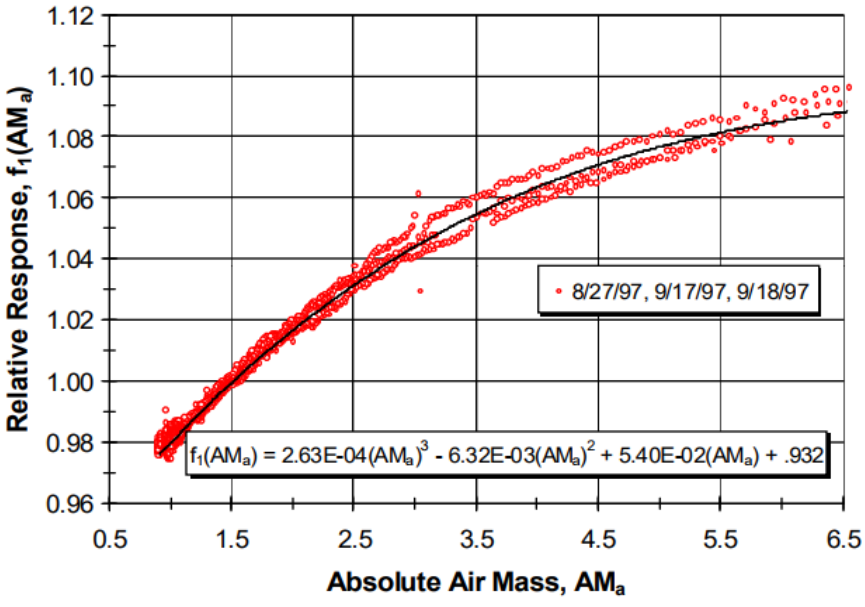


Figura 3-7. Respuesta relativa del piranómetro a la función AM_a. [18]

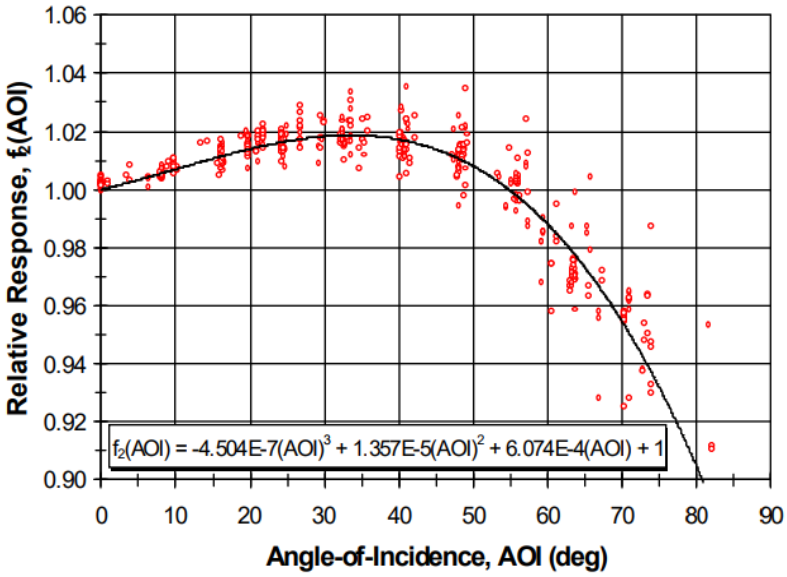


Figura 3-8. Respuesta relativa del piranómetro a la función AOI. [18]

Finalmente, la irradiancia total propuesta queda como:

$$E_t = \left\{\frac{R \cdot E_o \cdot [1 - \alpha \cdot (T - T_o)]}{C_1 \cdot f_1(AM_a) \cdot f_2(AOI)}\right\} \cdot \left\{1 + k \cdot \left[\frac{C_2}{C_1 \cdot f_2(AOI)} - 1\right]\right\}^{-1} \quad (3\text{–}3)$$

con k: relación entre la irradiancia difusa y la total.

- J. J. Michalsky et al., 1991. [19]

Se describe un procedimiento cuyo objetivo es hacer coincidir las respuestas de los piranómetros de células de silicio y los de termopila.

En primer lugar, se corrige la respuesta normalizando a una temperatura estándar de 30 °C con la ecuación

$$respuesta\ actual = (0.9815 + 0.0006 \cdot T[°C]) \cdot respuesta\ a\ 30\ °C \tag{3–4}$$

siendo T la temperatura del sensor.

El proceso para convertir las medidas de los dispositivos de células de silicio en valores de irradiancia solar comienza agrupando los datos en categorías dependiendo de la claridad del cielo, el brillo del tragaluz y el ángulo cenital del Sol (los parámetros de los dos primeros son, respectivamente, ϵ y Δ).

El parámetro ϵ es una función de la cantidad de nubes y aerosoles y se define como:

$$\epsilon = \frac{\left(\frac{(dif(hu) + dir(nu))}{dif(hu)} + 1.041 \cdot z^3\right)}{(1 + 1.041 \cdot z^3)} \tag{3–5}$$

siendo *dif(hu)* y *dir(nu)*, las medidas de irradiancia difusa y directa normal sin corregir, respectivamente, y z, el ángulo cenital solar en radianes.

El parámetro Δ sigue la ecuación:

$$\Delta = \frac{dif(hu)}{(I_0 \cdot \cos(z))} \tag{3–6}$$

con I_0 radiación extraterrestre en W/m^2.

Por último, se forman distintos grupos dependiendo de los parámetros z, ϵ y Δ en los que se definen los factores de corrección para relacionar las medidas de irradiancia de los piranómetros de termopila y de células de silicio.

Table A1. Total horizontal irradiance corrections

z: 75-90 deg Δ: ε:	dark	...	...	...	...	bright
cloudy	1.300	1.230	1.174	1.107	1.046	0.995
.	1.250	0.999	1.214	1.121	1.026	0.997
.	0.999	0.999	1.198	1.071	1.017	0.976
.	0.999	1.110	1.171	1.041	1.007	0.959
.	0.999	1.030	1.078	1.015	0.980	0.965
.	0.999	0.980	0.988	0.990	0.932	0.946
.	0.999	0.983	0.979	0.911	0.999	0.999
clear	1.006	0.971	0.928	0.999	0.999	0.999

z: 65-75 deg Δ: ε:	dark	...	...	...	...	bright
cloudy	1.240	1.120	1.046	1.033	1.014	0.983
.	0.999	0.999	1.105	1.046	1.003	0.983
.	1.000	0.999	1.079	1.030	0.999	0.975
.	0.999	1.030	1.035	1.008	0.983	0.970
.	0.999	1.030	1.030	0.996	0.969	0.956
.	0.999	1.031	0.992	0.981	0.950	0.999
.	0.999	0.993	0.991	0.999	0.999	0.999
clear	0.989	0.985	0.999	0.999	0.999	0.999

z: 50-65 deg Δ: ε:	dark	...	...	...	...	bright
cloudy	1.098	1.027	1.008	0.999	0.992	0.981
.	0.999	0.999	1.059	1.039	0.998	0.985
.	0.999	0.999	1.040	1.017	0.995	0.985
.	0.999	0.999	1.016	1.005	0.990	0.974
.	0.999	0.999	1.017	0.992	0.980	0.963
.	0.999	1.000	0.996	0.988	0.983	0.999
.	0.999	0.996	0.994	0.999	0.999	0.999
clear	0.992	0.992	0.985	0.999	0.999	0.999

z: 35-50 deg Δ: ε:	dark	...	...	...	...	bright
cloudy	1.032	0.994	0.989	0.988	0.983	0.989
.	0.999	1.000	1.006	1.021	0.992	0.987
.	0.999	0.999	1.056	1.030	0.995	0.989
.	0.999	0.999	1.021	1.006	0.992	0.990
.	0.999	0.999	1.023	0.995	0.991	1.001
.	0.999	1.000	1.000	0.993	0.994	0.999
.	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999
clear	1.006	1.002	1.005	0.999	0.999	0.999

z: 0-35 deg Δ: ε:	dark	...	...	...	...	bright
cloudy	1.052	0.992	0.981	0.976	0.977	0.985
.	0.999	0.999	1.057	1.012	0.980	0.981
.	0.999	0.999	1.057	1.022	0.992	0.985
.	0.999	0.999	1.040	1.014	0.994	0.990
.	0.999	0.999	1.013	1.005	0.996	0.990
.	0.999	0.999	1.001	1.001	1.003	0.999
.	0.999	1.001	1.004	0.999	0.999	0.999
clear	1.012	1.006	1.006	0.999	0.999	0.999

Figura 3-9. Factores de corrección para la irradiancia global horizontal. [19]

- L. Alados-Arboledas et al., 1995. [20]

Se presenta un método para corregir los valores medidos por sensores fotovoltaicos de silicio a las mediciones que harían los piranómetros de termopila. Los datos de entrada del modelo son los valores sin corregir de irradiancia global horizontal y difusa horizontal obtenidos por los piranómetros de silicio.

Se sigue un procedimiento similar al descrito en [19], obteniéndose igualmente los parámetros z, ϵ y Δ para elaborar una tabla con los factores de corrección de la irradiancia global y difusa medidas por el sensor de silicio. Los resultados alcanzados son equivalentes a los de la *figura 3-9*.

3.6 Tratamiento de la irradiancia en distintos programas de cálculo de instalaciones fotovoltaicas

Los programas de cálculo de instalaciones fotovoltaicas utilizan bases de datos obtenidas, por lo general, con piranómetros. Como ya se ha comentado, estos datos de irradiancia difieren de los que realmente medirán los módulos del campo solar. Para corregir estas desviaciones, los programas pueden utilizar diferentes modelos, asignar directamente unos valores de pérdidas o incluso no tenerlas en cuenta.

En este apartado se analiza el tratamiento que hacen de las pérdidas espectrales y angulares, debidas al espectro incidente y ángulo de incidencia, que afectan a la irradiancia efectiva que alcanza la superficie de los módulos fotovoltaicos, dos de los principales programas:

- SAM (System Advisor Model), de NREL (Laboratorio Nacional de Energía Renovable), que forma parte del Departamento de Energía de Estados Unidos.
- PVsyst, software de fotovoltaica.

Desde el punto de vista de los efectos espectrales, el modelo de PVsyst incluye una corrección para los módulos amorfos, pero no para otras tecnologías como las cristalinas. Esta corrección se basa en una parametrización en función de la masa de aire y el índice de claridad. En cambio, para los módulos cristalinos no se aplica la corrección debido a su menor sensibilidad a las variaciones espectrales.

En el caso de SAM, el modelo *Sandia* incluye una función F_1 que relaciona los efectos espectrales en la corriente de cortocircuito y la variación de la masa de aire a lo largo del día mediante un polinomio:

$$F_1 = a_0 + a_1 \cdot AM + a_2 \cdot AM^2 + a_3 \cdot AM^3 + a_4 \cdot AM^4 \quad (3\text{–}7)$$

donde $a_{0\ldots4}$ son coeficientes de la masa de aire.

Para las pérdidas angulares, PVsyst aplica una función *IAM* a las componentes directa y difusa, calculable hasta por tres procedimientos distintos.

SAM, nuevamente en el modelo *Sandia*, y de manera similar al polinomio F_1, relaciona los efectos ópticos en la corriente de cortocircuito y el ángulo de incidencia *AOI* mediante la función F_2.

$$F_2 = b_0 + b_1 \cdot AOI + b_2 \cdot AOI^2 + b_3 \cdot AOI^3 + b_4 \cdot AOI^4 + b_5 \cdot AOI^5 \quad (3\text{–}8)$$

siendo $b_{0\ldots5}$ coeficientes del *IAM*.

A través de las funciones F_1 y F_2, las irradiancias efectiva directa, difusa y reflejada, la temperatura de la célula y el coeficiente de temperatura de cortocircuito, SAM calcula la I_{cc}. Finalmente, esta intensidad se utiliza para determinar la irradiancia efectiva en la superficie del módulo, parámetro que influye en la I_{mp} y V_{mp} que calcula el modelo *Sandia*.

3.7 Conclusiones

Como se ha analizado, existen diferencias significativas entre las medidas de radiación de los piranómetros y los dispositivos fotovoltaicos. Una vez conocidas estas diferencias, parece necesaria la aplicación de correcciones que relacionen ambas mediciones. Para ello existen distintos procedimientos en la bibliografía, algunos de los cuales han sido comentados.

Estos modelos consiguen estimar la irradiancia total o la que mediría un piranómetro de termopila a partir de dispositivos fotovoltaicos de silicio con unos errores reducidos, utilizando bases de datos de diferentes emplazamientos. Otro aspecto importante es la posible aplicabilidad universal de los modelos, más allá de los lugares con los que fueron desarrollados. Mientras que en [19] sí se discute satisfactoriamente esta cuestión, en [18] se indica la necesidad de comprobar las correcciones presentadas en una gama más amplia de emplazamientos y condiciones de operación.

A pesar de sus buenos resultados, en la práctica estos modelos difícilmente podrán ser aplicables debido a su complejidad, ya que en muchas ocasiones no se dispone de todos los parámetros requeridos (irradiancia directa normal, difusa, relación entre la radiación difusa y la total, …), por lo cual su uso se haya limitado. En consecuencia, resulta interesante el desarrollo de otros modelos que dependan de menos variables o éstas sean fácilmente calculables.

4 METODOLOGÍA

En esta sección se va a realizar el cálculo detallado de los modelos que simulan la irradiancia medida por una célula de silicio dados los datos medidos por un piranómetro, y las mediciones de irradiancia de un piranómetro partiendo de los datos de una célula de silicio. Una vez concluida la explicación de la metodología, se presentan las ecuaciones que definen los modelos.

4.1 Introducción

Partiendo de datos de radiación medidos por la estación del GTER de Sevilla, se han desarrollado unos modelos sencillos que solo requieren del propio dato de radiación solar y la posición del Sol respecto a la superficie horizontal.

Los modelos permiten estimar los valores de irradiancia que mediría una célula fotovoltaica de silicio monocristalino a partir de las medidas de un piranómetro o, de manera viceversa, simular lo que mediría un piranómetro conocida la radiación medida por una célula fotovoltaica de silicio monocristalino. Además, se han calculado los modelos para otras dos estaciones, con diferentes clasificaciones climáticas.

4.2 Descripción de los equipos de medición

En los modelos se ha utilizado la base de datos de la estación radiométrica del GTER, situada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, y otras dos estaciones localizadas en el Estado de California (EE. UU.) y en la costa este de Australia.

El periodo de datos para la estación de Sevilla abarca desde julio de 2012 hasta diciembre de 2016. Para el caso de EE. UU. se dispone de los años 2016 y 2017 completos, mientras que de la estación de Australia los datos disponibles corresponden a tres meses de 2016 y seis meses de 2017. Todos estos datos han sido filtrados con el objetivo de eliminar las mediaciones de radiación erróneas que pudieran alterar los resultados.

Las grabaciones de datos efectuadas por las estaciones se han realizado en intervalos de 5 segundos mediante dispositivos radiométricos y meteorológicos.

Los equipos de medición utilizados son piranómetros CMP21 de Kipp&Zone y células de silicio monocristalino, situados en posición horizontal y debidamente calibrados según especificaciones ISO.

Para el estudio se emplearán medidas 5-minutales y 10-minutales de la radiación global horizontal registrada a través de ambos equipos.

La desviación típica de los dispositivos de medida es (según datos experimentales):

- Piranómetro: 1.9 %.
- Célula de silicio monocristalino: 1.8 %.

Las tres localizaciones se corresponden con distintas clases dentro de la clasificación climática Köppen-Geiger, lo que permitirá validar los modelos en diferentes climas, aumentándose así su fiabilidad.

Tabla 4-1. Localización y características climáticas de las estaciones utilizadas. Periodo de recogida de datos

Número de estación	Localización de la estación	Latitud (°N)	Longitud (°O)	Clasificación climática Köppen-Geiger	Longitud periodo de datos (meses)
1	GTER, Sevilla, España	37.41	-6.002	Csa: clima templado con veranos secos y calurosos	54
2	California, EE. UU.	34.6655	-118.29	Csb: clima Mediterráneo de veranos frescos	24
3	Australia	-23.55	145.32	BSh: clima semiárido cálido	9

4.3 Análisis de los datos

Se persigue desarrollar modelos de una serie sintética (SyS) de datos 5/10-minutales de radiación de una célula de silicio monocristalino a partir de los datos 5/10-minutales registrados por el piranómetro.

Para la elaboración de dichos modelos los datos de entrada serán:

- Irradiancia global horizontal medida por el piranómetro, G_{pir}.
- Altura solar, α.
- Índice de claridad, k_t.
- Irradiancia extraterrestre, G_0.

De manera similar, se calcularán también modelos inversos, que permitan simular la radiación 5/10-minutal que captaría un piranómetro, dados los datos 5/10-minutales grabados por una célula de silicio monocristalino.

Las variables de entrada necesarias para dichas series serán:

- Irradiancia global medida por la célula, $G_{célula}$.
- Altura solar, α.
- Índice de claridad, k_t.
- Irradiancia extraterrestre, G_0.

En primer lugar, se obtendrán modelos a partir de la estación de Sevilla, debido a que de ella se cuenta con un periodo de datos mayor. Seguidamente, se realizará el mismo procedimiento para las otras dos estaciones, con el objeto de intentar demostrar que las series sintéticas alcanzadas son similares, propósito que reforzaría la idea de una posible aplicabilidad universal del modelo de Sevilla. Todo ello estará además acompañado de un proceso de validación en la sección siguiente.

4.4 Cálculo de los modelos piranómetro-célula

4.4.1 Estación del GTER, Sevilla

El procedimiento seguido estará dividido en dos partes, la primera será el cálculo de los dos tramos que compondrán una serie discreta, y la segunda la suavización de dicha serie para eliminar las discontinuidades. Debido a que esta sección está centrada en la obtención de modelos continuos, la serie discreta alcanzada se presentará en el *Anexo A*.

Los datos de Sevilla utilizados abarcan desde julio de 2012 hasta diciembre de 2015, reservando el año 2016 para la valoración.

- Desarrollo de la serie sintética discreta.

1) Se consideran los valores de la altura solar e irradiancia extraterrestre 10-minutales para el conjunto completo de años de Sevilla.

2) Se calcula el índice de claridad 10-minutal (k_t) como el cociente de la irradiancia medida por el piranómetro y la extraterrestre para todo el conjunto de años.

$$k_t^{10min} = \frac{G_{pir}^{10min}}{G_0^{10min}} \tag{4–1}$$

3) Se divide el conjunto de valores en 9 grupos, dependiendo del valor de la altura solar:
   a) Valores correspondientes a $10° \leq \alpha < 15°$.
   b) Valores correspondientes a $15° \leq \alpha < 20°$.
   c) Valores correspondientes a $20° \leq \alpha < 25°$.
   d) Valores correspondientes a $25° \leq \alpha < 30°$.
   e) Valores correspondientes a $30° \leq \alpha < 35°$.
   f) Valores correspondientes a $35° \leq \alpha < 40°$.
   g) Valores correspondientes a $40° \leq \alpha < 50°$.
   h) Valores correspondientes a $50° \leq \alpha < 60°$.
   i) Valores correspondientes a $\alpha \geq 60°$.

4) Cada grupo anterior, se divide en 9 subconjuntos dependiendo del valor del índice de claridad:
   a) $0 < k_t \leq 0.1$.
   b) $i < k_t \leq i + 0.1$, con i desde 0.1 hasta 0.7.
   c) $k_t > 0.8$.

Se obtiene una matriz de 81 subconjuntos de valores. En cada uno de ellos se calcula un coeficiente de ajuste lineal entre los valores medidos por el piranómetro y por la célula, representando gráficamente ambas mediciones y relacionándolos linealmente. Se presenta la *ilustración 4-1* como un ejemplo del procedimiento.

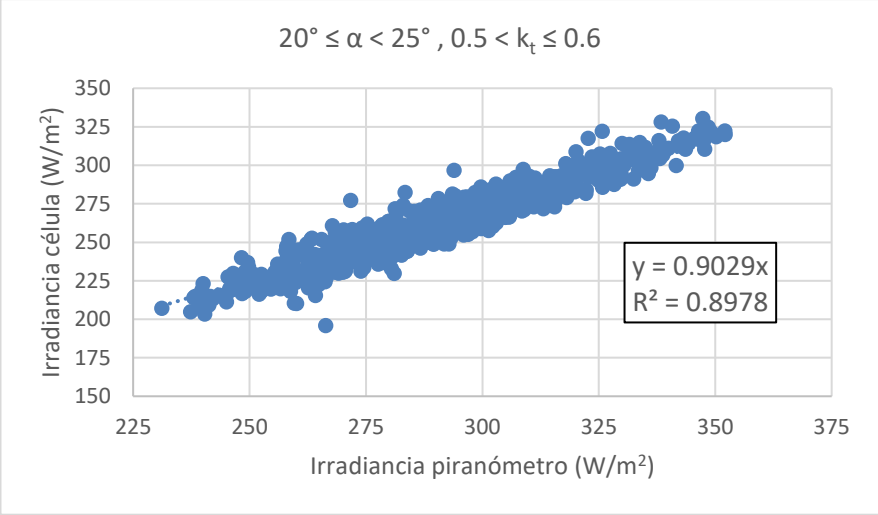


Ilustración 4-1. Coeficiente de ajuste para el subconjunto de valores $20° \leq \alpha < 25°$ y $0.5 < k_t \leq 0.6$. Modelo Piranómetro-Célula

Tabla 4-2. Coeficientes de ajuste obtenidos a partir de los valores de radiación global horizontal medidos por la célula y el piranómetro para cada uno de los subconjuntos de datos divididos en función de la altura solar y el índice de claridad. Modelo Piranómetro-Célula

Índice de claridad	$10° \leq \alpha < 15°$	$15° \leq \alpha < 20°$	$20° \leq \alpha < 25°$	$25° \leq \alpha < 30°$	$30° \leq \alpha < 35°$
$k_t \leq 0.1$	1.0438	1.0506	1.0563	1.0516	1.0654
$0.1 < k_t \leq 0.2$	0.9942	1.0012	1.0045	1.0079	1.0167
$0.2 < k_t \leq 0.3$	0.9606	0.9658	0.9715	0.9757	0.9809
$0.3 < k_t \leq 0.4$	0.9223	0.9413	0.9493	0.9565	0.9613
$0.4 < k_t \leq 0.5$	0.8368	0.9071	0.9302	0.9443	0.9497
$0.5 < k_t \leq 0.6$	0.7985	0.8597	0.9029	0.9298	0.9435
$0.6 < k_t \leq 0.7$	0.8104	0.8573	0.8947	0.9211	0.9362
$0.7 < k_t \leq 0.8$	0.8136	0.87	0.9016	0.9249	0.939
$k_t > 0.8$	0.8452	0.8874	0.9145	0.9315	0.9437

Índice de claridad	$35° \leq \alpha < 40°$	$40° \leq \alpha < 50°$	$50° \leq \alpha < 60°$	$\alpha \geq 60°$
$k_t \leq 0.1$	1.0586	1.0624	1.0579	1.0485
$0.1 < k_t \leq 0.2$	1.0219	1.0217	1.0249	1.0156
$0.2 < k_t \leq 0.3$	0.9814	0.9872	0.9901	0.9839
$0.3 < k_t \leq 0.4$	0.9674	0.9667	0.9697	0.9703
$0.4 < k_t \leq 0.5$	0.9536	0.9597	0.9627	0.9642
$0.5 < k_t \leq 0.6$	0.9513	0.9562	0.9601	0.9604
$0.6 < k_t \leq 0.7$	0.9459	0.9532	0.9581	0.9589
$0.7 < k_t \leq 0.8$	0.9486	0.9563	0.9598	0.9602
$k_t > 0.8$	0.9499	0.9535	0.9564	0.9554

A continuación, se pasa a obtener, con los coeficientes de ajuste, los dos tramos del modelo discreto:

a) Primer tramo: altura solar menor de 25°.

Este tramo abarca los tres primeros subconjuntos (27 valores). Para cada rango de índice de claridad, se calcula el promedio aritmético de los valores de los coeficientes de ajuste, resultando un único valor, independiente de la altura solar.

Tabla 4-3. Coeficientes de ajuste promedio para cada subconjunto dependiente del índice de claridad. Modelo Piranómetro-Célula

Índice de claridad	$10° \leq \alpha < 15°$	$15° \leq \alpha < 20°$	$20° \leq \alpha < 25°$	Promedio
$k_t \leq 0.1$	1.0438	1.0506	1.0563	1.0502
$0.1 < k_t \leq 0.2$	0.9942	1.0012	1.0045	1.0000
$0.2 < k_t \leq 0.3$	0.9606	0.9658	0.9715	0.9660
$0.3 < k_t \leq 0.4$	0.9223	0.9413	0.9493	0.9376
$0.4 < k_t \leq 0.5$	0.8368	0.9071	0.9302	0.8914
$0.5 < k_t \leq 0.6$	0.7985	0.8597	0.9029	0.8537
$0.6 < k_t \leq 0.7$	0.8104	0.8573	0.8947	0.8541
$0.7 < k_t \leq 0.8$	0.8136	0.87	0.9016	0.8617
$k_t > 0.8$	0.8452	0.8874	0.9145	0.8824

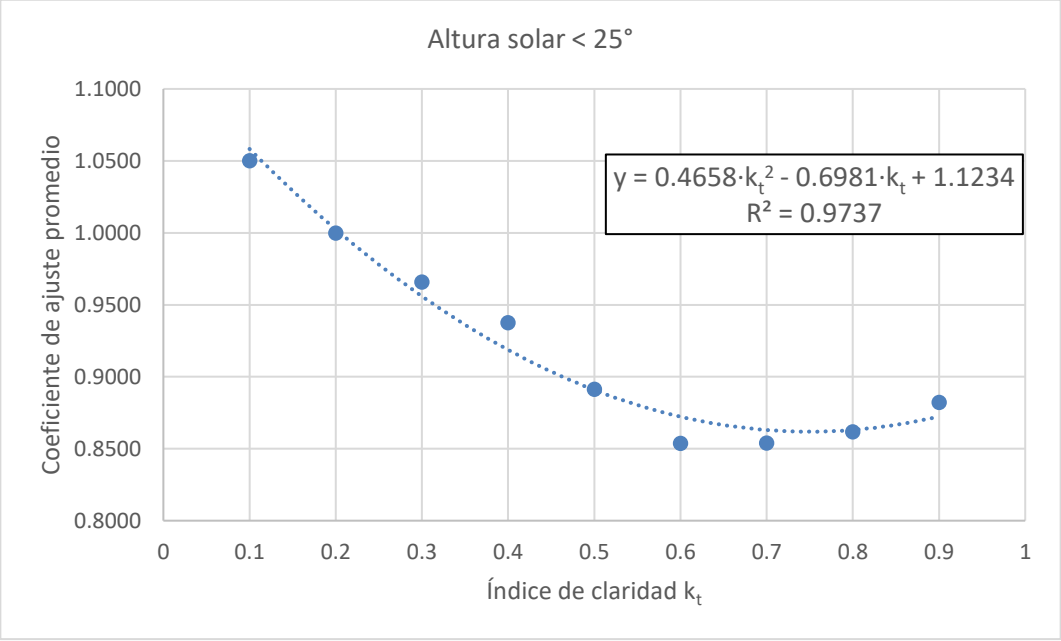
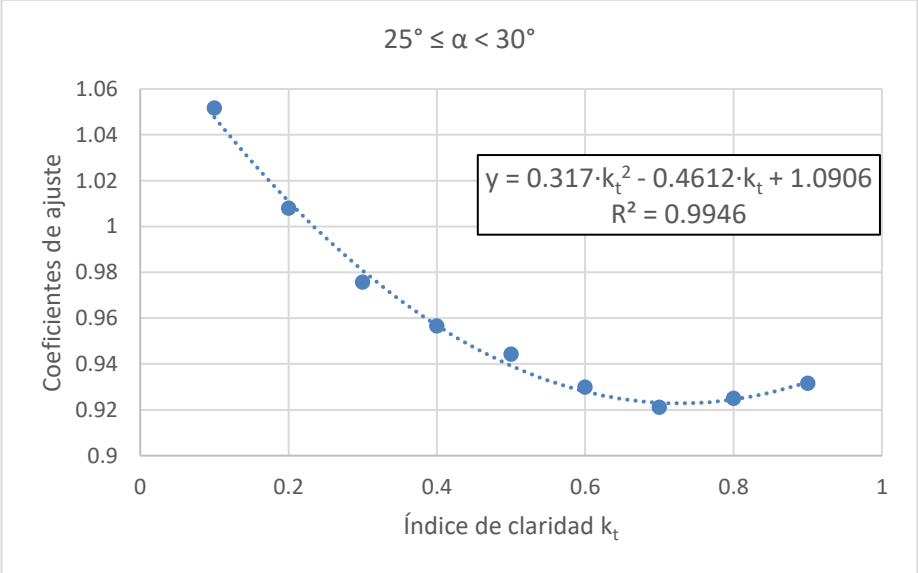


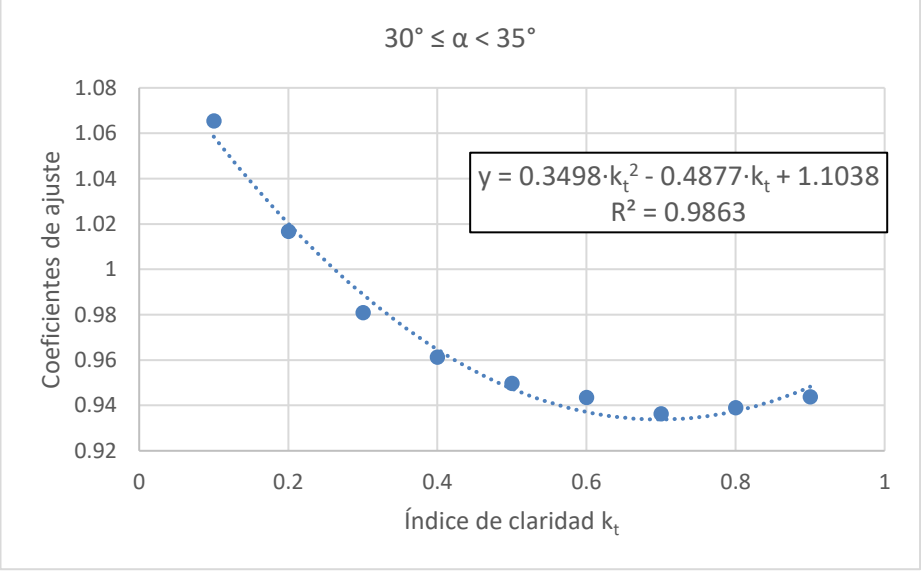
Ilustración 4-2. Relación entre los coeficientes de ajuste promedio y el índice de claridad para alturas solares menores de 25°. Modelo Piranómetro-Célula

En la *ilustración 4-2* se realiza un ajuste polinómico de grado 2 en función del índice de claridad. La ecuación resultante define el primer tramo de la serie sintética discreta.

b) Segundo tramo: altura solar igual o mayor de 25°.

Este tramo abarca los 6 subconjuntos restantes (54 valores). Para cada uno de ellos se representan gráficamente los coeficientes de ajuste frente a sus respectivos índices de claridad (*ilustración 4-3*):





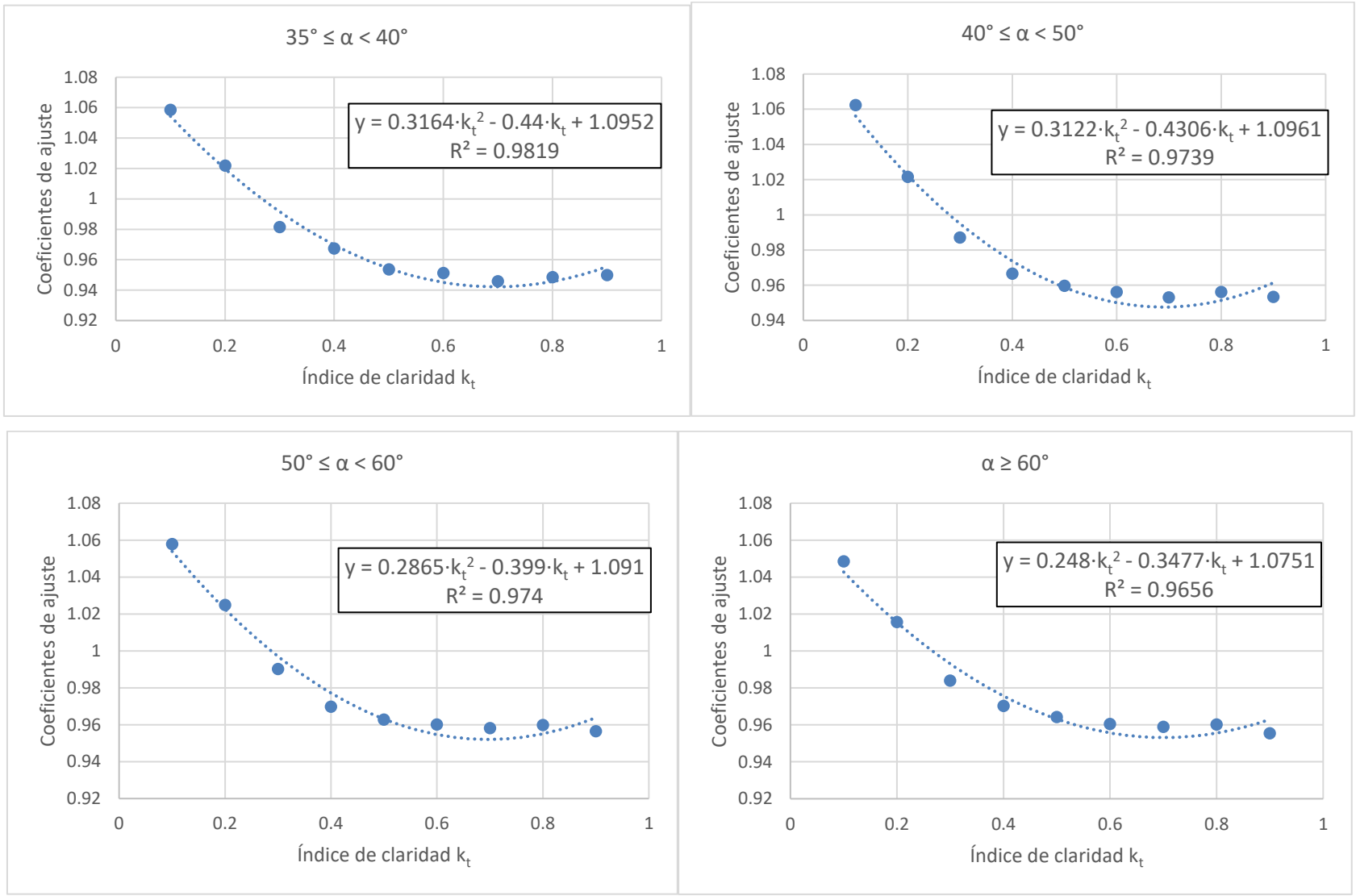


Ilustración 4-3. Relación entre los coeficientes de ajuste y el índice de claridad para alturas solares iguales o superiores a 25°. Modelo Piranómetro-Célula

Como se observa en la ilustración, en cada una de las gráficas se ha calculado la relación polinómica de grado 2 entre los índices de claridad y los coeficientes de ajuste:

Tabla 4-4. Coeficientes de la relación polinómica de grado 2 entre k_t y los coeficientes de ajuste, para cada altura solar igual o superior a 25°. Modelo Piranómetro-Célula

Altura solar (°)	k_t^2	k_t	Término independiente
25	0.317	-0.4612	1.0906
30	0.3498	-0.4877	1.1038
35	0.3164	-0.44	1.0952
40	0.3122	-0.4306	1.0961
50	0.2865	-0.399	1.091
60	0.248	-0.3477	1.0751

Para determinar la ecuación del segundo tramo de la serie discreta, se representan los coeficientes de la *tabla 4-4* y los valores de altura solar. A continuación, se relacionan linealmente, resultando tres series dependientes de la altura solar:

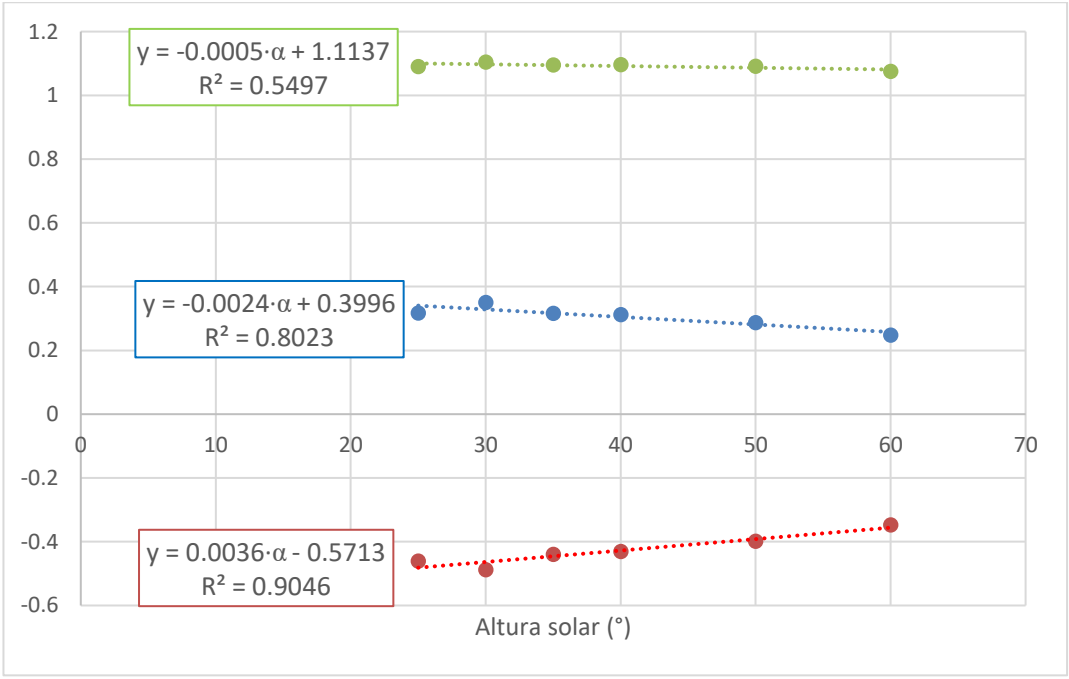


Ilustración 4-4. Relación entre los coeficientes de la tabla 4-4 y la altura solar. La serie azul se corresponde con k_t^2, la roja con k_t, y la verde con término independiente. Modelo Piranómetro-Célula

La ecuación del segundo tramo queda de la forma:

$$(-0.0024 \cdot \alpha + 0.3996) \cdot {k_t}^2 + (0.0036 \cdot \alpha - 0.5713) \cdot k_t + (-0.0005 \cdot \alpha + 1.1137)$$

- Desarrollo de la serie sintética continua.

Con los dos tramos se genera una ecuación a trozos que se podría considerar una buena estimación de los valores de radiación que mediría una célula de silicio monocristalino dados los captados por un piranómetro, pero, a fin de evitar las discontinuidades, se procede a su suavización. Para ello se siguen los siguientes pasos:

1) Se utiliza la función tangente hiperbólica para unir los dos tramos del modelo discreto mediante una suma, de la forma:

$$0.5 \cdot \{\left(0.4658 \cdot {k_t}^2 - 0.6981 \cdot k_t + 1.1234\right) \cdot (1 - tanh(\alpha - 25)) + ((-0.0024 \cdot \alpha + 0.3996) \cdot {k_t}^2 + (0.0036 \cdot \alpha - 0.5713) \cdot k_t + (-0.0005 \cdot \alpha + 1.1137)) \cdot (1 + tanh(\alpha - 25))\}$$

2) Para optimizar la serie obtenida, se utiliza un coeficiente β (siempre en el intervalo de 0 a 1) que multiplicará las diferencias *(α - 25)* de las funciones *tanh*. El valor de β será aquel que minimice el error RMSE cometido por el modelo que, para este emplazamiento (estación del GTER, Sevilla) se corresponde con 0.25 (menor RMSE posible de la serie sintética frente a la irradiancia real que mediría la célula, con los datos de 2016). Este error RMSE se detalla en la sección siguiente de validación de los modelos.

$$RMSE\ (\beta = 0.25, n\ datos\ 10\ \text{minutales}\ de\ 2016) = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(G_{SyS}^{10min} - G_{pir}^{10min}\right)^2}$$

El **modelo continuo** resultante, que será función de la altura solar y del índice de claridad, estará definido por la siguiente fórmula:

$$G_{SyS}^{10min} = \left(0.5 \cdot \{a \cdot \left(1 - tanh\left(0.25 \cdot (\alpha - 25)\right)\right) + b \cdot \left(1 + tanh\left(0.25 \cdot (\alpha - 25)\right)\right)\}\right) \cdot G_{pir}^{10min} \qquad (4\text{–}2)$$

$$con\ a = \left(0.4658 \cdot {k_t}^2 - 0.6981 \cdot k_t + 1.1234\right) \qquad y$$

$$b = \left((-0.0024 \cdot \alpha + 0.3996) \cdot {k_t}^2 + (0.0036 \cdot \alpha - 0.5713) \cdot k_t + (-0.0005 \cdot \alpha + 1.1137)\right)$$

Nota: El procedimiento es igualmente válido para otros intervalos de medidas de la radiación. Por ejemplo, los casos de EE. UU. y Australia que los datos serán 5-minutales.

4.4.2 Estación de California, EE. UU.

Siguiendo la metodología explicada, y aplicando los datos del año 2016 (los de 2017 se utilizarán para la validación), se alcanza un modelo continuo de ecuación:

$$G_{SyS}^{5min} = \left(0.5 \cdot \left\{a \cdot \left(1 - tanh\left(0.10 \cdot (\alpha - 25)\right)\right) + b \cdot \left(1 + tanh\left(0.10 \cdot (\alpha - 25)\right)\right)\right\}\right) \cdot G_{pir}^{5min} \qquad (4\text{–}3)$$

$$con\ a = \left(0.1844 \cdot {k_t}^2 - 0.3942 \cdot k_t + 1.05\right) \qquad y$$

$$b = \left((0.0009 \cdot \alpha + 0.3076) \cdot {k_t}^2 + (-0.0012 \cdot \alpha - 0.4328) \cdot k_t + (0.0004 \cdot \alpha + 1.0907)\right)$$

4.4.3 Estación de Australia

De igual forma que para EE. UU., se utilizan los datos de 2017 (seis meses) para el desarrollo del modelo, mientras que con los tres meses restantes de 2016 se realizará la validación.

Empleando el procedimiento seguido para Sevilla, el modelo de Australia queda como:

$$G_{SyS}^{5min} = \left(0.5 \cdot \left\{a \cdot \left(1 - tanh\left(0.15 \cdot (\alpha - 25)\right)\right) + b \cdot \left(1 + tanh\left(0.15 \cdot (\alpha - 25)\right)\right)\right\}\right) \cdot G_{pir}^{5min} \qquad (4\text{–}4)$$

$$con\ a = \left(0.1445 \cdot {k_t}^2 - 0.2915 \cdot k_t + 0.9996\right) \qquad y$$

$$b = \left((-0.0096 \cdot \alpha + 0.1811) \cdot {k_t}^2 + (0.0138 \cdot \alpha - 0.2932) \cdot k_t + (-0.0039 \cdot \alpha + 1.0388)\right)$$

4.5 Cálculo de los modelos célula-piranómetro

4.5.1 Estación del GTER, Sevilla

De manera similar al modelo piranómetro-célula, se divide el procedimiento en dos partes, para los cálculos de los dos tramos de la serie discreta, cuya ecuación se mostrará en el *Anexo A*, y la serie continua. Asimismo, se utiliza el conjunto de datos desde julio de 2012 a diciembre de 2015 para el desarrollo del modelo, mientras que los del año 2016 para la validación.

- Desarrollo de la serie sintética discreta.

1) Se consideran los valores de radiación extraterrestre 10-minutal y altura solar para todo el conjunto de años.

2) Se calcula el índice de claridad 10-minutal como el cociente de la irradiancia medida por la célula y la extraterrestre para el conjunto de años.

$$k_t^{10min} = \frac{G_{célula}^{10min}}{G_0^{10min}} \tag{4–5}$$

3) Se divide el conjunto de valores en 9 grupos que dependerán del valor de altura solar:
   a) Valores correspondientes a $10° \leq \alpha < 15°$.
   b) Valores correspondientes a $15° \leq \alpha < 20°$.
   c) Valores correspondientes a $20° \leq \alpha < 25°$.
   d) Valores correspondientes a $25° \leq \alpha < 30°$.
   e) Valores correspondientes a $30° \leq \alpha < 35°$.
   f) Valores correspondientes a $35° \leq \alpha < 40°$.
   g) Valores correspondientes a $40° \leq \alpha < 50°$.
   h) Valores correspondientes a $50° \leq \alpha < 60°$.
   i) Valores correspondientes a $\alpha \geq 60°$.

4) Cada uno de los grupos se divide en otros 9 subconjuntos en función del índice de claridad:
   a) $0 \leq k_t < 0.1$.
   b) $i < k_t \leq i + 1$, con i desde 0.1 hasta 0.7.
   c) $k_t > 0.8$.

Nuevamente, se obtiene una matriz de 81 subconjuntos de valores en función de la altura solar y el índice de claridad. En cada uno de estos subconjuntos se calcula un coeficiente de ajuste lineal entre los valores medidos por la célula y el piranómetro, para ello se representan gráficamente ambas mediciones y se relacionan de manera lineal (ejemplo en la *ilustración 4-5*).

En la *tabla 4-5* se muestran los coeficientes de ajuste una vez se ha realizado el procedimiento en todos los subconjuntos de la matriz.

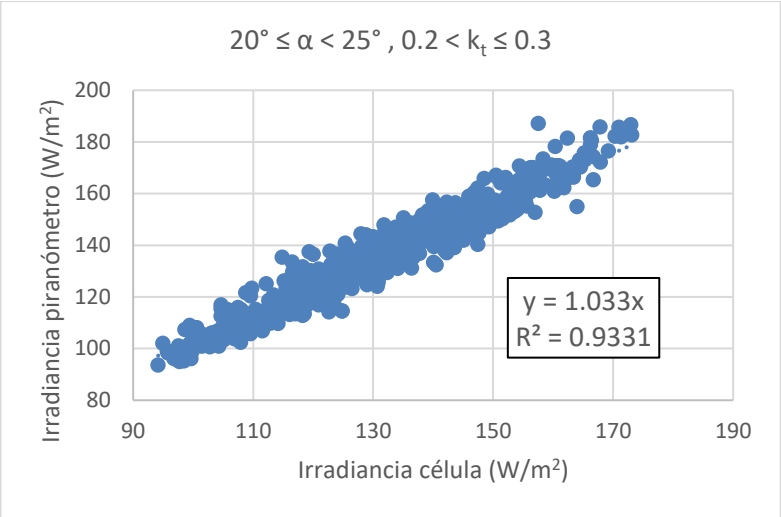


Ilustración 4-5. Coeficiente de ajuste para el subconjunto de valores $20° \leq \alpha < 25°$ y $0.2 < k_t \leq 0.3$. Modelo Célula-Piranómetro

Tabla 4-5. Coeficientes de ajuste obtenidos a partir de los valores de radiación global horizontal medidos por la célula y el piranómetro para cada uno de los subconjuntos de datos divididos en función de la altura solar y el índice de claridad. Modelo Célula-Piranómetro

Índice de claridad	$10° \leq \alpha < 15°$	$15° \leq \alpha < 20°$	$20° \leq \alpha < 25°$	$25° \leq \alpha < 30°$	$30° \leq \alpha < 35°$
$k_t \leq 0.1$	0.9595	0.9517	0.9457	0.9571	0.9425
$0.1 < k_t \leq 0.2$	1.0169	1.0052	1.002	0.9968	0.9873
$0.2 < k_t \leq 0.3$	1.0816	1.0403	1.033	1.0268	1.0215
$0.3 < k_t \leq 0.4$	1.2089	1.0844	1.0605	1.0484	1.0422
$0.4 < k_t \leq 0.5$	1.2367	1.1702	1.0987	1.0651	1.0551
$0.5 < k_t \leq 0.6$	1.2053	1.1606	1.1236	1.09	1.065
$0.6 < k_t \leq 0.7$	1.162	1.1329	1.1056	1.0822	1.0678
$0.7 < k_t \leq 0.8$	1.1534	1.1187	1.0879	1.0723	1.0599
$k_t > 0.8$	1.1534	1.1187	1.0743	1.0638	1.0566

Índice de claridad	$35° \leq \alpha < 40°$	$40° \leq \alpha < 50°$	$50° \leq \alpha < 60°$	$\alpha \geq 60°$
$k_t \leq 0.1$	0.9485	0.9482	0.9438	0.9501
$0.1 < k_t \leq 0.2$	0.9871	0.9789	0.9764	0.9835
$0.2 < k_t \leq 0.3$	1.0189	1.0147	1.0133	1.0181
$0.3 < k_t \leq 0.4$	1.0368	1.0367	1.0332	1.0324
$0.4 < k_t \leq 0.5$	1.0497	1.0435	1.039	1.0375
$0.5 < k_t \leq 0.6$	1.0539	1.047	1.0421	1.0431
$0.6 < k_t \leq 0.7$	1.0578	1.05	1.0458	1.0463
$0.7 < k_t \leq 0.8$	1.0511	1.0448	1.0416	1.0414
$k_t > 0.8$	1.0475	1.0449	1.0427	1.0453

Se procede a calcular la ecuación de los dos tramos que compondrán el modelo discreto:

a) Primer tramo: altura solar menor de 25°.

Este tramo abarca los tres primeros subconjuntos de altura solar (27 valores). Se pasa a obtener un único subconjunto que solo dependerá del índice de claridad. Para ello, en cada uno de sus 9 rangos de valores, se calcula el coeficiente de ajuste promedio (aritmético).

Tabla 4-6. Coeficientes de ajuste promedio para cada subconjunto dependiente del índice de claridad. Modelo Célula-Piranómetro

Índice de claridad	$10° \leq \alpha < 15°$	$15° \leq \alpha < 20°$	$20° \leq \alpha < 25°$	Promedio
$k_t \leq 0.1$	0.9595	0.9517	0.9457	0.9523
$0.1 < k_t \leq 0.2$	1.0169	1.0052	1.002	1.0080
$0.2 < k_t \leq 0.3$	1.0816	1.0403	1.033	1.0516
$0.3 < k_t \leq 0.4$	1.2089	1.0844	1.0605	1.1179
$0.4 < k_t \leq 0.5$	1.2367	1.1702	1.0987	1.1685
$0.5 < k_t \leq 0.6$	1.2053	1.1606	1.1236	1.1632
$0.6 < k_t \leq 0.7$	1.162	1.1329	1.1056	1.1335
$0.7 < k_t \leq 0.8$	1.1534	1.1187	1.0879	1.12
$k_t > 0.8$	1.1534	1.1187	1.0743	1.1155

La ecuación del tramo será la relación polinómica de grado 2 entre los coeficientes de ajuste promedio y el índice de claridad.

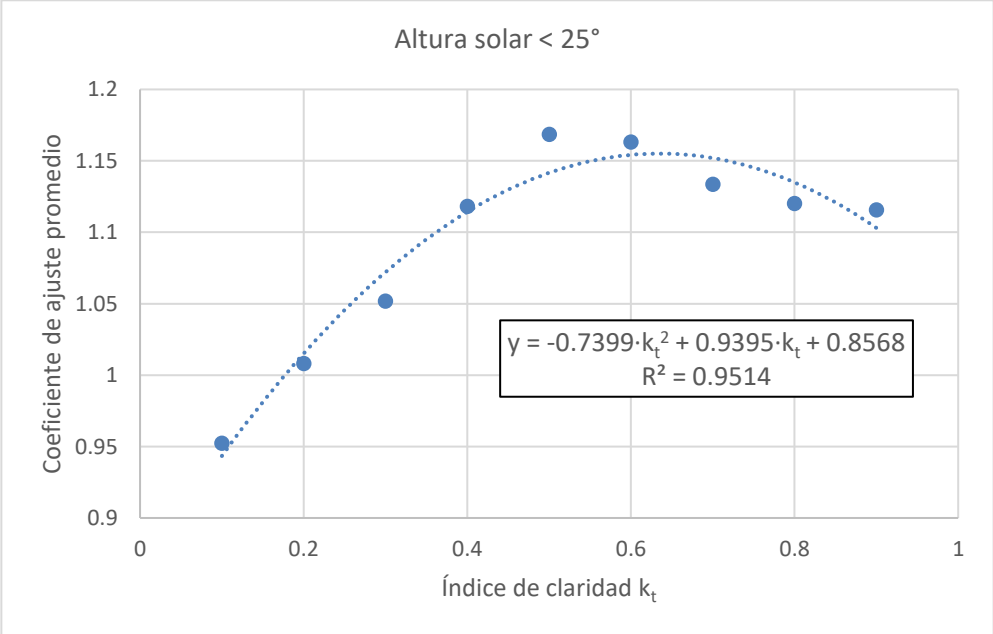
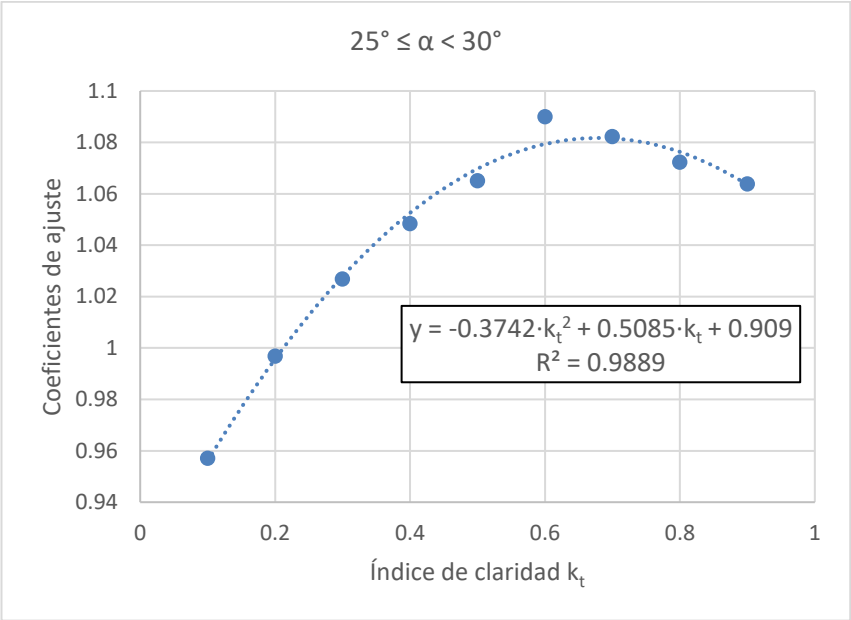
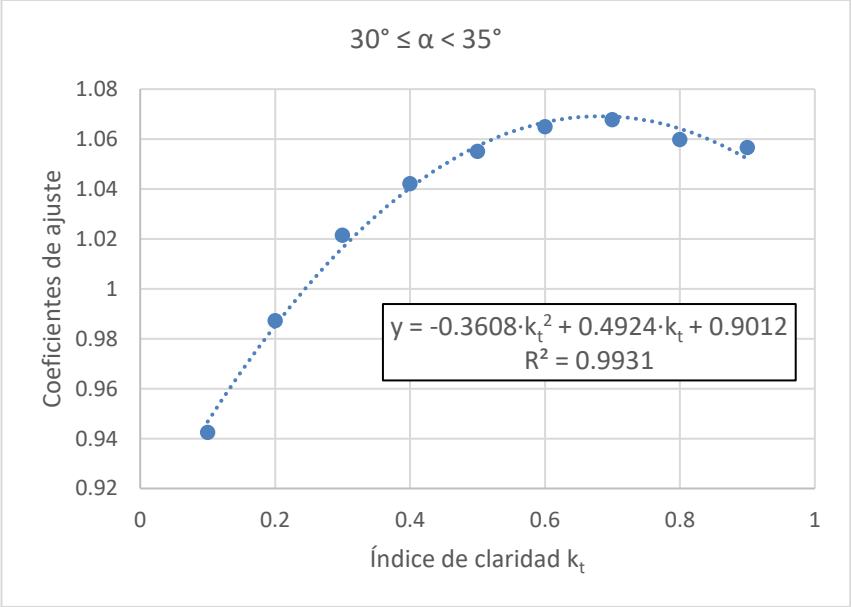


Ilustración 4-6. Relación entre los coeficientes de ajuste promedio y el índice de claridad para alturas solares menores de 25°. Modelo Célula-Piranómetro

b) Segundo tramo: altura solar igual o mayor de 25°.

Se analizan los 6 subconjuntos restantes (54 valores) dependientes de la altura solar. En cada uno de ellos se calcula la relación polinómica de grado 2 entre los índices de claridad y los coeficientes de ajuste, como se muestra en la *ilustración 4-7*.





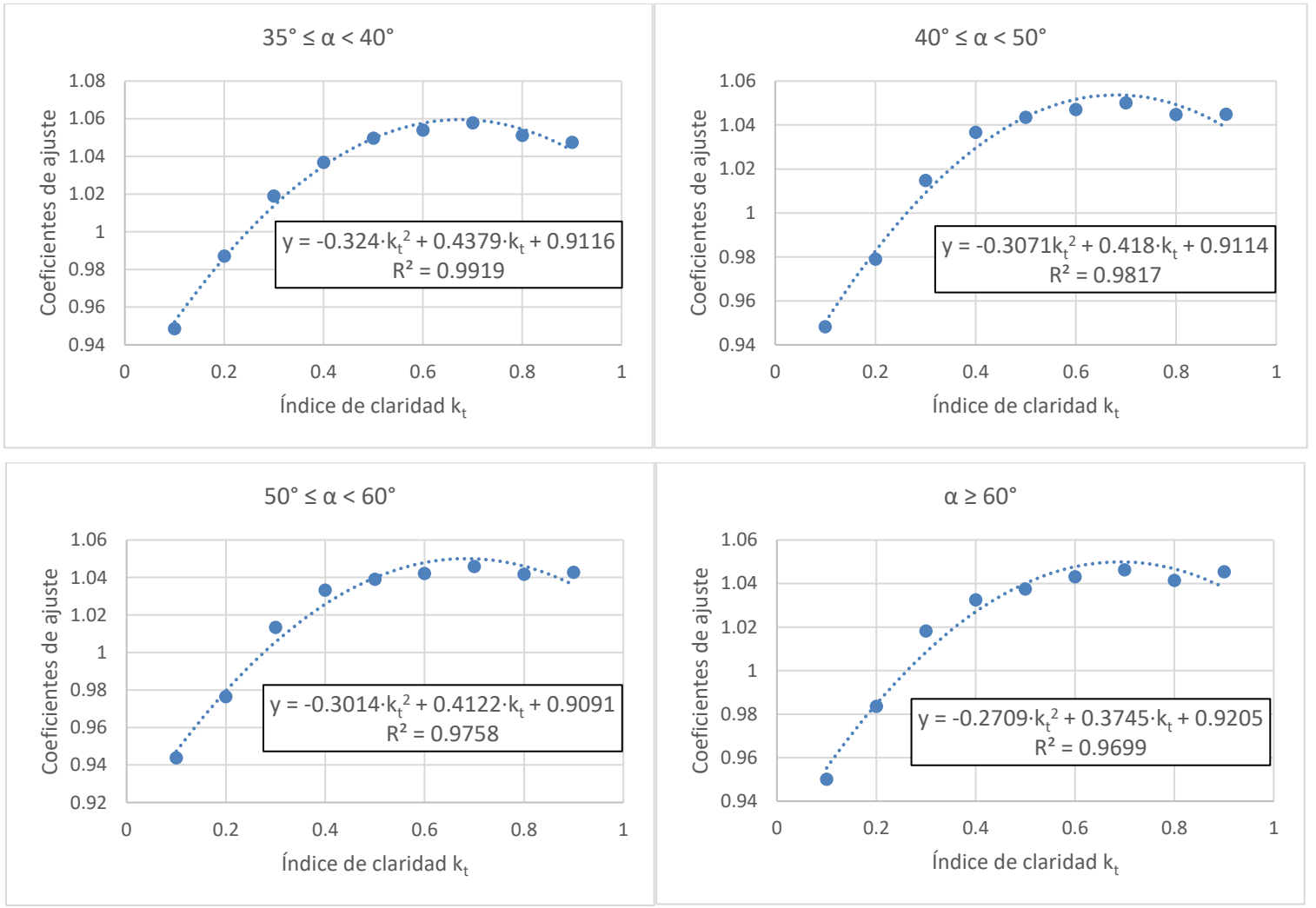


Ilustración 4-7. Relación entre los coeficientes de ajuste y el índice de claridad para los tramos de altura solar iguales o superiores a 25°. Modelo Célula-Piranómetro

De las relaciones polinómicas establecidas se obtienen una serie de nuevos coeficientes, dependiendo del valor de altura solar considerado.

Tabla 4-7. Coeficientes de la relación polinómica de grado 2 entre k_t y los coeficientes de ajuste, para cada tramo de altura solar igual o superior a 25°. Modelo Célula-Piranómetro

Altura solar (°)	k_t^2	k_t	Término independiente
25	-0.3742	0.5085	0.909
30	-0.3608	0.4924	0.9012
35	-0.324	0.4379	0.9116
40	-0.3071	0.418	0.9114
50	-0.3014	0.4122	0.9091
60	-0.2709	0.3745	0.9205

Para definir la ecuación del tramo, se representan los coeficientes de la *tabla 4-7* y los valores de altura solar, relacionándolos linealmente. Como resultando se obtienen tres series dependientes de la altura solar.

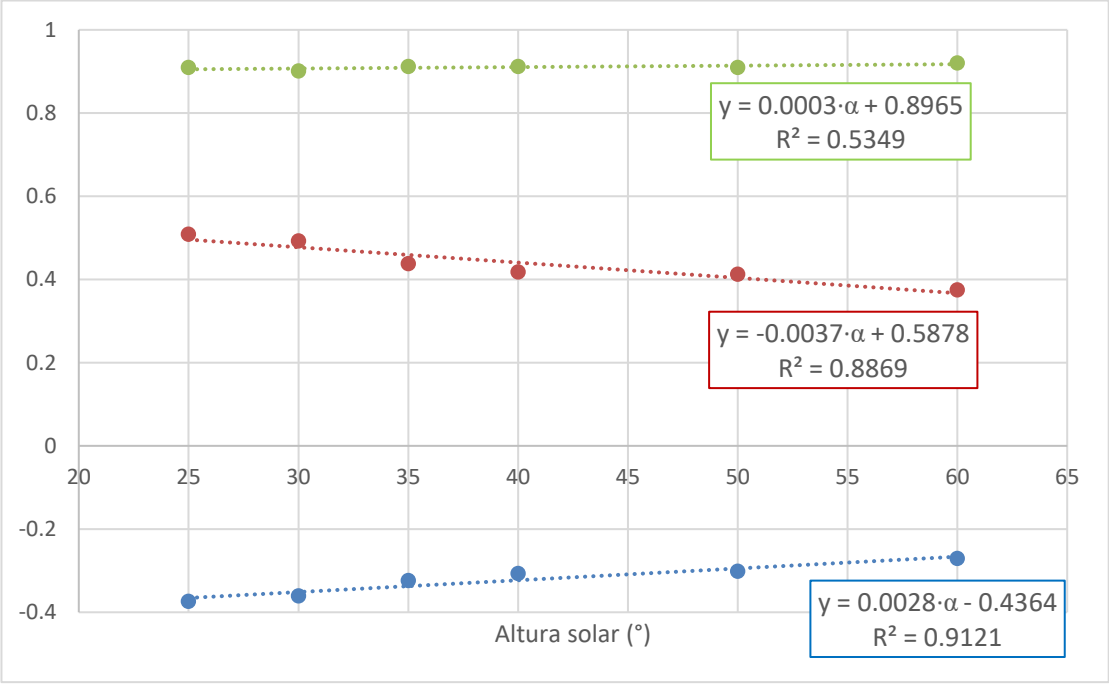


Ilustración 4-8. Relación entre los coeficientes de la tabla 4-7 y la altura solar. La serie azul se corresponde con k_t^2, la roja con k_t, y la verde con término independiente. Modelo Célula-Piranómetro

La ecuación del segundo tramo será:

$$(0.0028 \cdot \alpha - 0.4364) \cdot {k_t}^2 + (-0.0037 \cdot \alpha + 0.5878) \cdot k_t + (0.0003 \cdot \alpha + 0.8965)$$

- Desarrollo de la serie sintética continua.

1) Mediante la función tangente hiperbólica, se unen los dos tramos del modelo discreto a través de una suma:

$$0.5 \cdot \{\left(-0.7399 \cdot {k_t}^2 + 0.9395 \cdot k_t + 0.8568\right) \cdot (1 - tanh(\alpha - 25)) + ((0.0028 \cdot \alpha - 0.4364) \cdot {k_t}^2 + (-0.0037 \cdot \alpha + 0.5878) \cdot k_t + (0.0003 \cdot \alpha + 0.8965)) \cdot (1 + tanh(\alpha - 25))\}$$

2) Con el coeficiente β (explicado en el modelo piranómetro-célula) se optimiza la serie obtenida. El valor de β, para los datos de 2016 del GTER, que minimiza el error RMSE comedido por la serie sintética (menor RMSE posible frente a la irradiancia real que mediría el piranómetro) es de 0.22.

De este modo, el **modelo continuo** resultante (dependiente de la altura solar y el índice de claridad) será:

$$G_{SyS}^{10min} = \left(0.5 \cdot \left\{a \cdot \left(1 - tanh\left(0.22 \cdot (\alpha - 25)\right)\right) + b \cdot \left(1 + tanh\left(0.22 \cdot (\alpha - 25)\right)\right)\right\}\right) \cdot G_{célula}^{10min} \qquad (4\text{–}6)$$

$$con\ a = \left(-0.7399 \cdot {k_t}^2 + 0.9395 \cdot k_t + 0.8568\right) \qquad y$$

$$b = \left((0.0028 \cdot \alpha - 0.4364) \cdot {k_t}^2 + (-0.0037 \cdot \alpha + 0.5878) \cdot k_t + (0.0003 \cdot \alpha + 0.8965)\right)$$

4.5.2 Estación de California, EE. UU.

Nuevamente, se utilizan los datos de 2016 para el desarrollo del modelo, y los de 2017 para la validación.

Siguiendo el procedimiento descrito, la ecuación alcanzada es:

$$G_{SyS}^{5min} = \left(0.5 \cdot \left\{a \cdot \left(1 - tanh\left(0.12 \cdot (\alpha - 25)\right)\right) + b \cdot \left(1 + tanh\left(0.12 \cdot (\alpha - 25)\right)\right)\right\}\right) \cdot G_{célula}^{5min} \qquad (4\text{–}7)$$

$$con\ a = \left(-0.558 \cdot {k_t}^2 + 0.7665 \cdot k_t + 0.8969\right) \qquad y$$

$$b = \left((0.0062 \cdot \alpha - 0.6047) \cdot {k_t}^2 + (-0.007 \cdot \alpha + 0.7618) \cdot k_t + (0.0017 \cdot \alpha + 0.8323)\right)$$

4.5.3 Estación de Australia

El modelo de Australia, a partir de los meses disponibles de 2017, y aplicando la metodología detallada anteriormente, es:

$$G_{SyS}^{5min} = \left(0.5 \cdot \left\{a \cdot \left(1 - tanh\left(0.14 \cdot (\alpha - 25)\right)\right) + b \cdot \left(1 + tanh\left(0.14 \cdot (\alpha - 25)\right)\right)\right\}\right) \cdot G_{célula}^{5min} \qquad (4\text{–}8)$$

$$con\ a = \left(-0.5276 \cdot {k_t}^2 + 0.646 \cdot k_t + 0.9602\right) \qquad y$$

$$b = \left((0.0014 \cdot \alpha + 0.0384) \cdot {k_t}^2 + (-0.0036 \cdot \alpha + 0.0036) \cdot k_t + (0.0008 \cdot \alpha + 1.0581)\right)$$

4.6 Conclusiones de los modelos

Analizando los modelos piranómetro-célula, se observa que las funciones $a = f(k_t)$ tienen coeficientes similares, que van disminuyendo (en valor absoluto) con la latitud del emplazamiento. Por otro lado, la función $b = f(k_t, \alpha)$ para EE. UU., cuenta con coeficientes con signos diferentes, pero en valor absoluto todos ellos son similares en las tres estaciones. Por tanto, se confirma que, aunque la forma de las funciones cambia dependiendo del emplazamiento, esta diferencia es pequeña y se puede considerar que todos los modelos son válidos independientemente de la localización de la estación.

Para el caso de los modelos célula-piranómetro, el análisis es equivalente. Los coeficientes de las funciones $a = f(k_t)$ son similares, mientras que los pequeños cambios se presentan en las funciones $b = f(k_t, \alpha)$, y principalmente en el modelo de Australia. Por consiguiente, se deduce una forma de los modelos similar cualquiera que sea el emplazamiento, y cuyos coeficientes cambiarán por los diferentes datos de radiación utilizados.

Respecto al coeficiente β, en todos los modelos presenta valores pequeños, que oscilan entre 0.1 y 0.25.

5 VALIDACIÓN

Una vez se han calculado los modelos, se procede a su validación. Para ello se utilizan las bases de datos de las estaciones mencionadas anteriormente, con series de datos 10-minutales y 5-minutales registrados por el piranómetro y la célula de silicio monocristalino.

De las tres estaciones se dispone de datos de, al menos, dos años diferentes. Para el desarrollo de sus modelos se escogió uno de estos periodos de datos, y el otro se reservó para la validación. De este modo, los modelos a partir de los datos del GTER (calculados con el periodo julio 2012-diciembre 2015), se analizarán con el año 2016 y, adicionalmente, con los otros datos de las dos estaciones restantes. De manera similar se procederá con los modelos de Australia y EE. UU., que se evaluarán con los periodos reservados de sus estaciones correspondientes (tres meses de 2016 y el año 2017 completo, respectivamente), y con los demás periodos de las otras dos estaciones.

Esta validación se compondrá de un análisis visual de los errores cometidos por las series calculadas y por los piranómetros/células para distintos días de los años escogidos. Además, se incorpora un análisis estadístico que permite determinar la exactitud de los modelos, utilizándose para ello dos parámetros típicos como son el error cuadrático medio (RMSE), introducido en la sección anterior, y el Ramp Rate (RR).

- RMSE: analiza las desviaciones en las estimaciones de un modelo respecto a los valores reales medidos. Cuanto menor sea su valor, mayor es la precisión del modelo, en términos absolutos. Sus unidades se corresponden con las de las mediciones, W/m^2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(G_{SyS}^{t} - G_{pir/célula}^{t}\right)^2} \tag{5–1}$$

siendo *n* el número de mediciones, G_{SyS}^{t} la serie sintética, $G_{pir/célula}^{t}$ la serie medida por el piranómetro o por la célula, y *t* el intervalo de tiempo entre mediciones (5-minutal o 10-minutal).

- Ramp Rate (RR): calculado como la diferencia entre datos sucesivos en los intervalos de tiempo. Sus unidades son W/m^2·min.

$$RR = \left(\left(G_{pir/célula/SyS_{i+1}}^{t} - G_{pir/célula/SyS_i}^{t}\right) - \left(G_{0_{i+1}}^{t} - G_{0_i}^{t}\right)\right)/\Delta t \tag{5–2}$$

siendo $G_{pir/célula/SyS}^{t}$ la irradiancia medida por el piranómetro, por la célula o la estimada por la serie sintética, respectivamente, G_0^t la irradiancia extraterrestre, y Δt el intervalo de tiempo entre mediciones (5-minutal o 10-minutal).

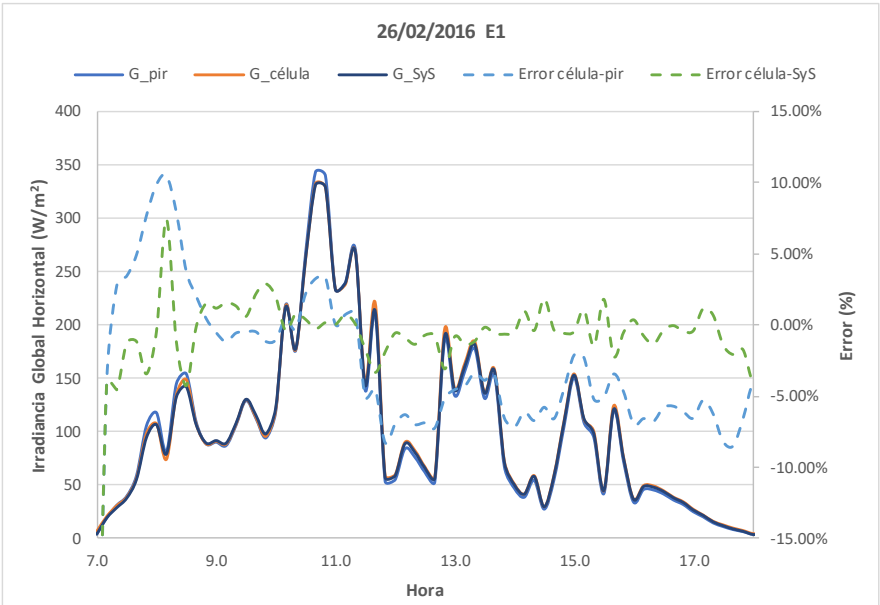
En esta sección se presentan los valores del RMSE aplicado a los datos de irradiancia de las células y los piranómetros, y los estimados con los modelos. Para contrastar los resultados obtenidos se estudiará el RR, mediante una serie de gráficas, en el *Anexo B*.

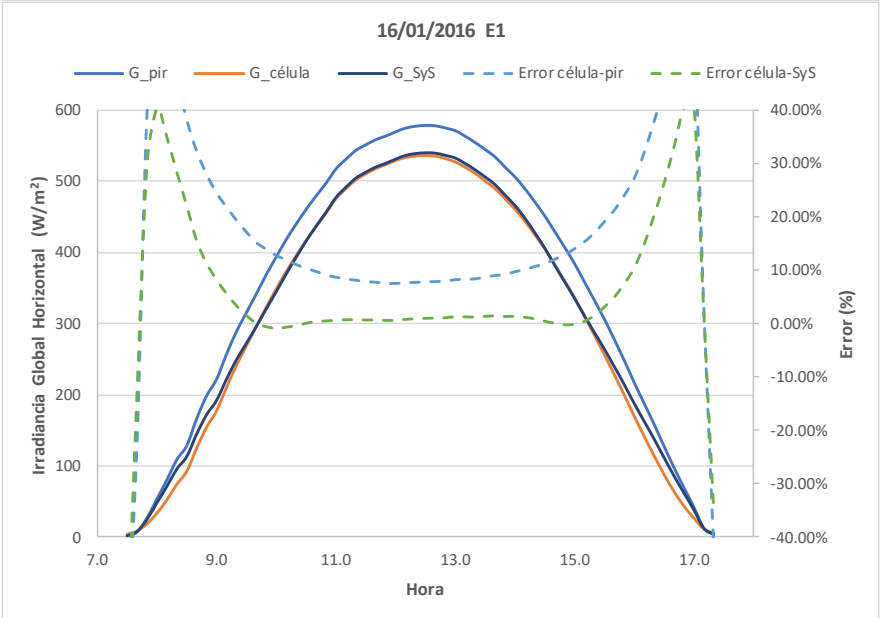
5.1 Validación de los modelos piranómetro-célula

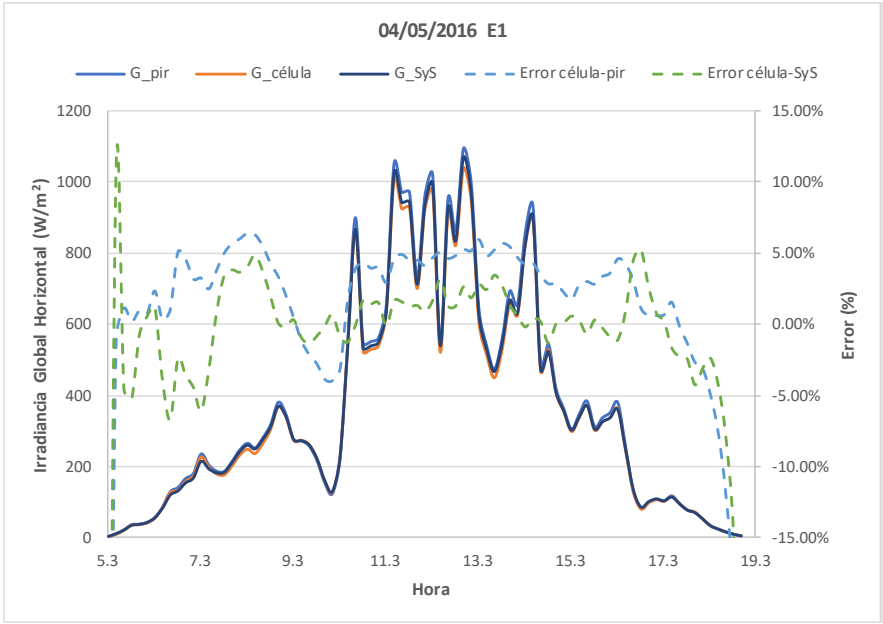
5.1.1 Modelo de la estación del GTER, Sevilla

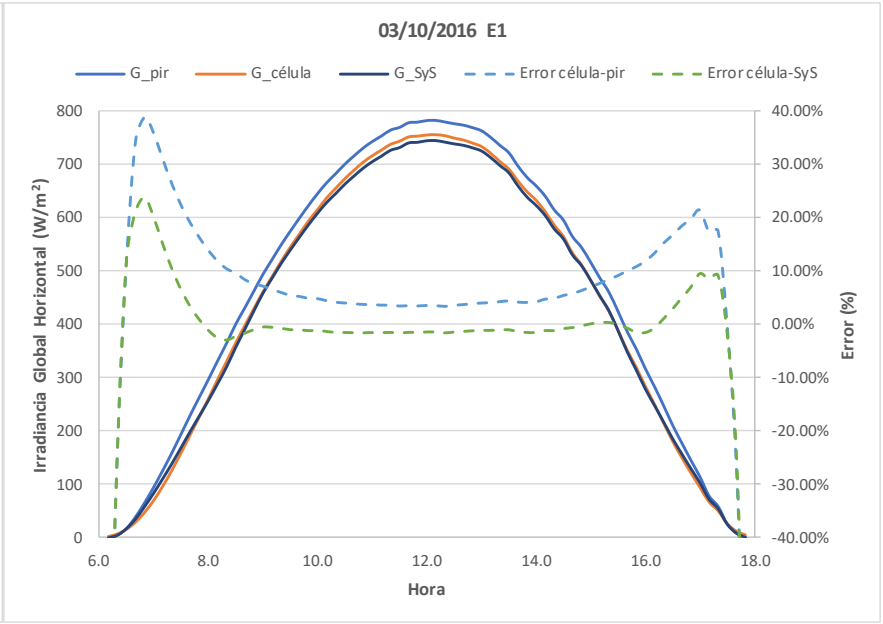
Se aplica la *ecuación 4-2* a los valores de 2016 y/o 2017 medidos por los piranómetros de las tres estaciones, obteniéndose las series sintéticas de los valores de radiación que mediría una célula, comparándose a continuación con los datos reales captados por la célula de las estaciones.

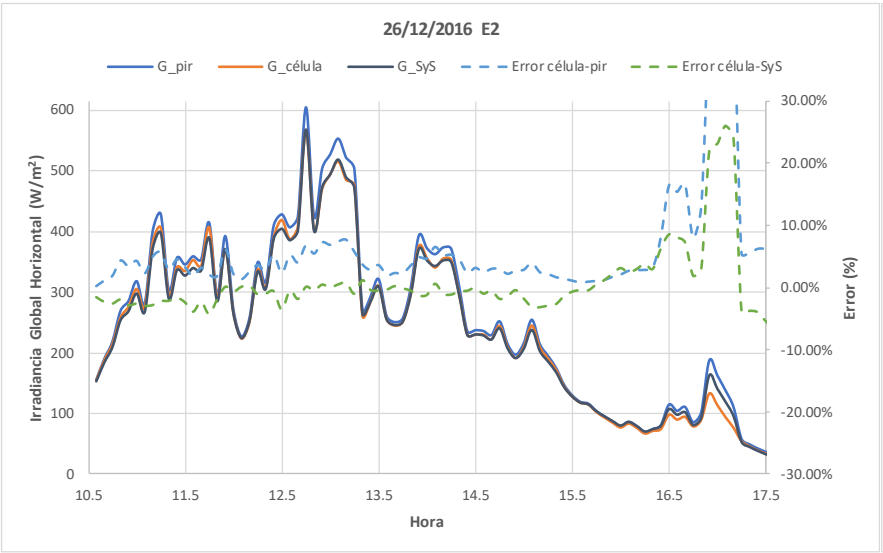
Se muestran abajo las gráficas de distintos días de los años 2016 y 2017 (con alternancia de días nublados y despejados), representándose los valores de radiación reales y estimados y sus correspondientes errores, para el conjunto de las tres estaciones. Se observan unos errores de la serie sintética significativamente inferiores en comparación con los obtenidos a partir de las medidas de los piranómetros, independientemente del tipo de día. Estos errores son menores del 5 % excepto en algunos tramos del día correspondientes a las primeras y últimas horas de radiación (siendo también inferiores a los obtenidos con el piranómetro), aunque en dichos tramos cabe reseñar que la radiación se puede considerar despreciable dentro del cómputo global diario.

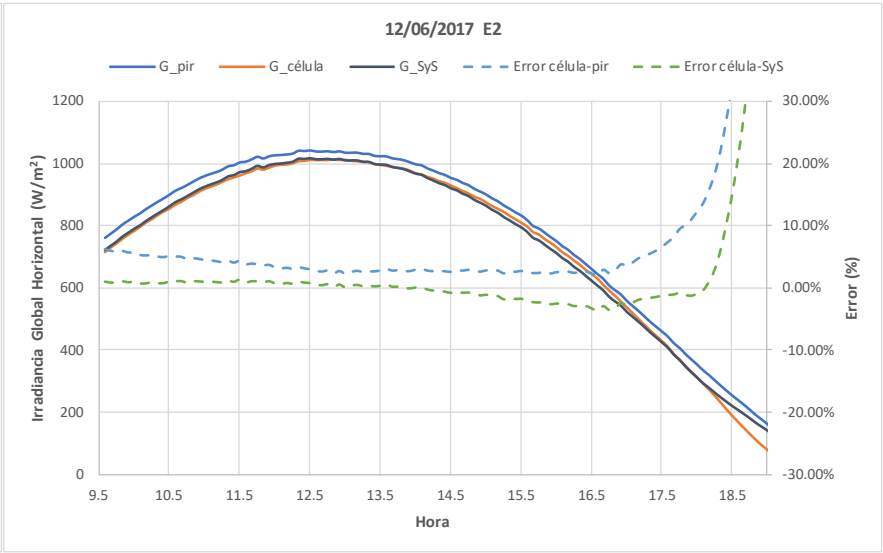





04/05/2016 E1
G_pir
G_célula
G_SyS
Error célula-pir
Error célula-SyS
Irradiancia Global Horizontal (W/m²)
Error (%)
Hora


03/10/2016 E1
G_pir
G_célula
G_SyS
Error célula-pir
Error célula-SyS
Irradiancia Global Horizontal (W/m²)
Error (%)
Hora


26/12/2016 E2
G_pir
G_célula
G_SyS
Error célula-pir
Error célula-SyS
Irradiancia Global Horizontal (W/m²)
Error (%)
Hora


12/06/2017 E2
G_pir
G_célula
G_SyS
Error célula-pir
Error célula-SyS
Irradiancia Global Horizontal (W/m²)
Error (%)
Hora

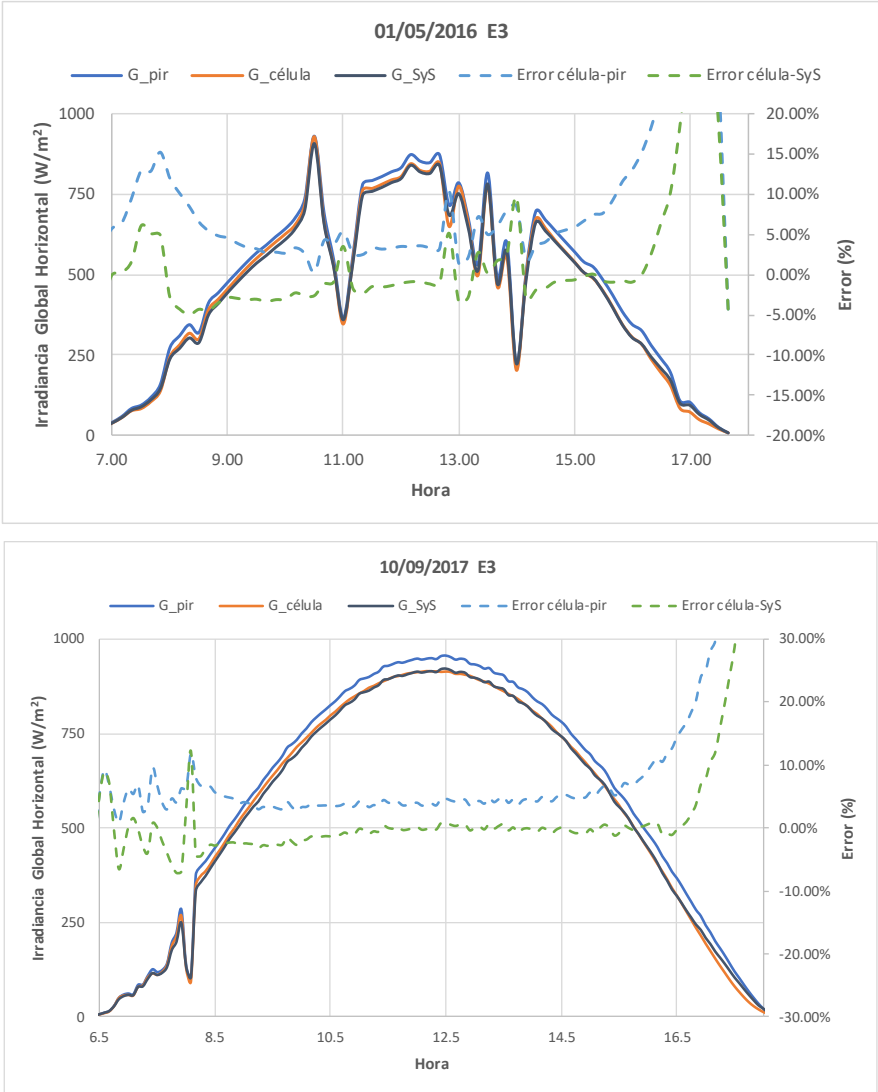


Ilustración 5-1. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de Sevilla, Piranómetro-Célula

- Análisis estadístico.

Se aplica el estadístico RMSE a los valores 10-minutales y/o 5-minutales medidos por los piranómetros y las células en los periodos de las estaciones considerados para la validación, además de a los datos calculados a partir del modelo de Sevilla, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 5-1. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por la célula.

		RMSE (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Piranómetro	Serie sintética
E1	2016 (10-min)	29.62	9.42
E2	2016 (5-min)	42.52	20.80
	2017 (5-min)	41.58	22.01
E3	2016 (10-min)	29.15	11.51
	2017 (5-min)	29.31	14.85

Además, se indican también los valores horarios y diarios de RMSE:

Tabla 5-2. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por la célula.

		RMSE horario (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Piranómetro	Serie sintética
E1	2016	27.97	7.73
E2	2016	33.94	14.30
	2017	35.94	16.00
E3	2016	26.75	9.04
	2017	26.90	11.80

Tabla 5-3. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas del piranómetro y de la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por la célula.

		RMSE diario ($W \cdot h/m^2$)	
Estación	Año de validación	Piranómetro	Serie sintética
E1	2016	334.56	62.88
E2	2016	314.54	101.61
	2017	326.69	100.82
E3	2016	291.73	34.93
	2017	294.16	77.86

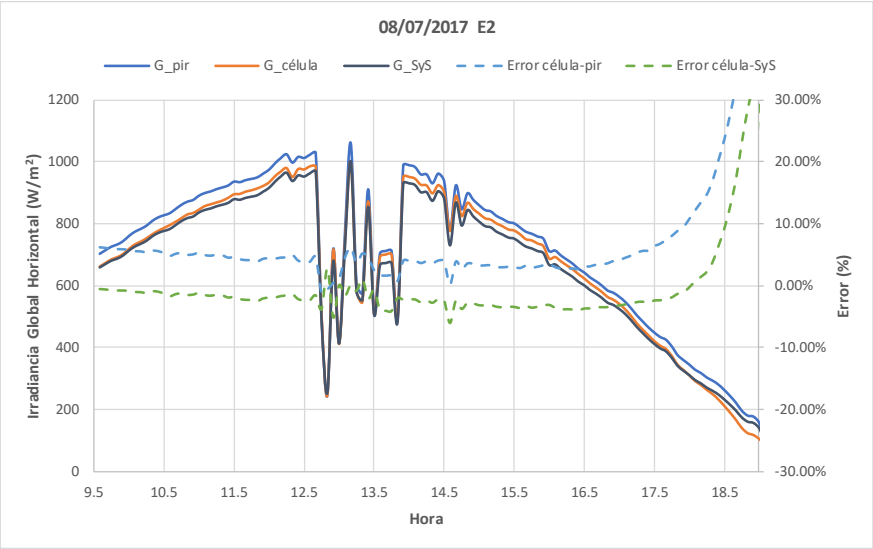
El estadístico confirma que la serie sintética calculada se aproxima más a los valores de irradiancia medidos por las células que las series obtenidas de los piranómetros. Este hecho ocurre en todas las estaciones, lo que indica que el modelo desarrollado presenta un error inferior en comparación con utilizar directamente los datos registrados de los piranómetros como estimación de las mediciones de las células.

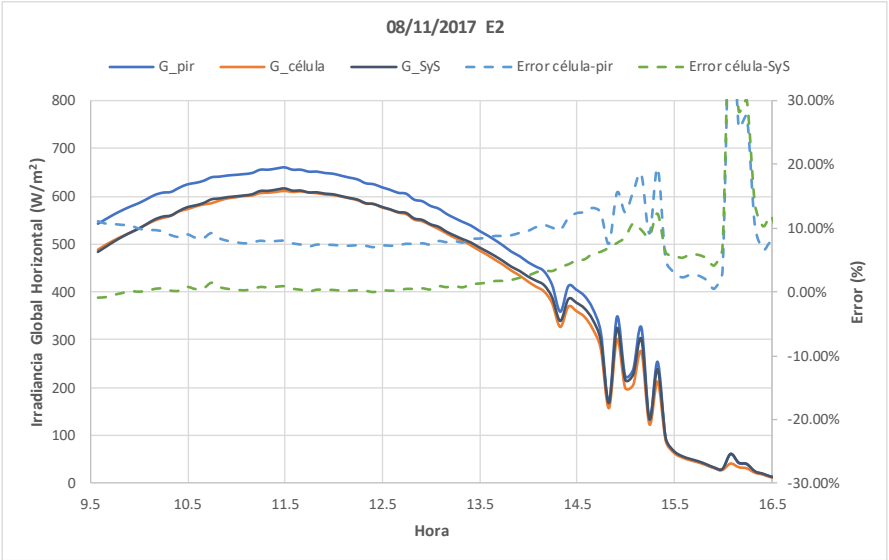
Debido a que se ha utilizado el modelo de Sevilla (calculado además con un periodo de datos de 42 meses), es natural que los errores cometidos en este emplazamiento sean menores que los producidos en las otras dos estaciones. En cualquier caso, se puede afirmar que la serie sintética generada es una mejor aproximación de los valores de las células que los datos registrados por los piranómetros.

5.1.2 Modelo de la estación de EE. UU.

De igual manera que para el modelo de Sevilla, se aplica la *ecuación 4-3* a los valores de 2016 y/o 2017 medidos por los piranómetros de las tres estaciones, para obtener las series sintéticas de la irradiancia que mediría la célula y compararla con los datos registrados realmente.

A continuación, se muestran gráficas de distintos días de 2016 y 2017. Se observan unos errores de la serie sintética inferiores a los obtenidos con las medidas de los piranómetros. El máximo de estos errores vuelve a estar en el entorno del 5 %, excepto a las primeras y últimas horas de radiación de los días.





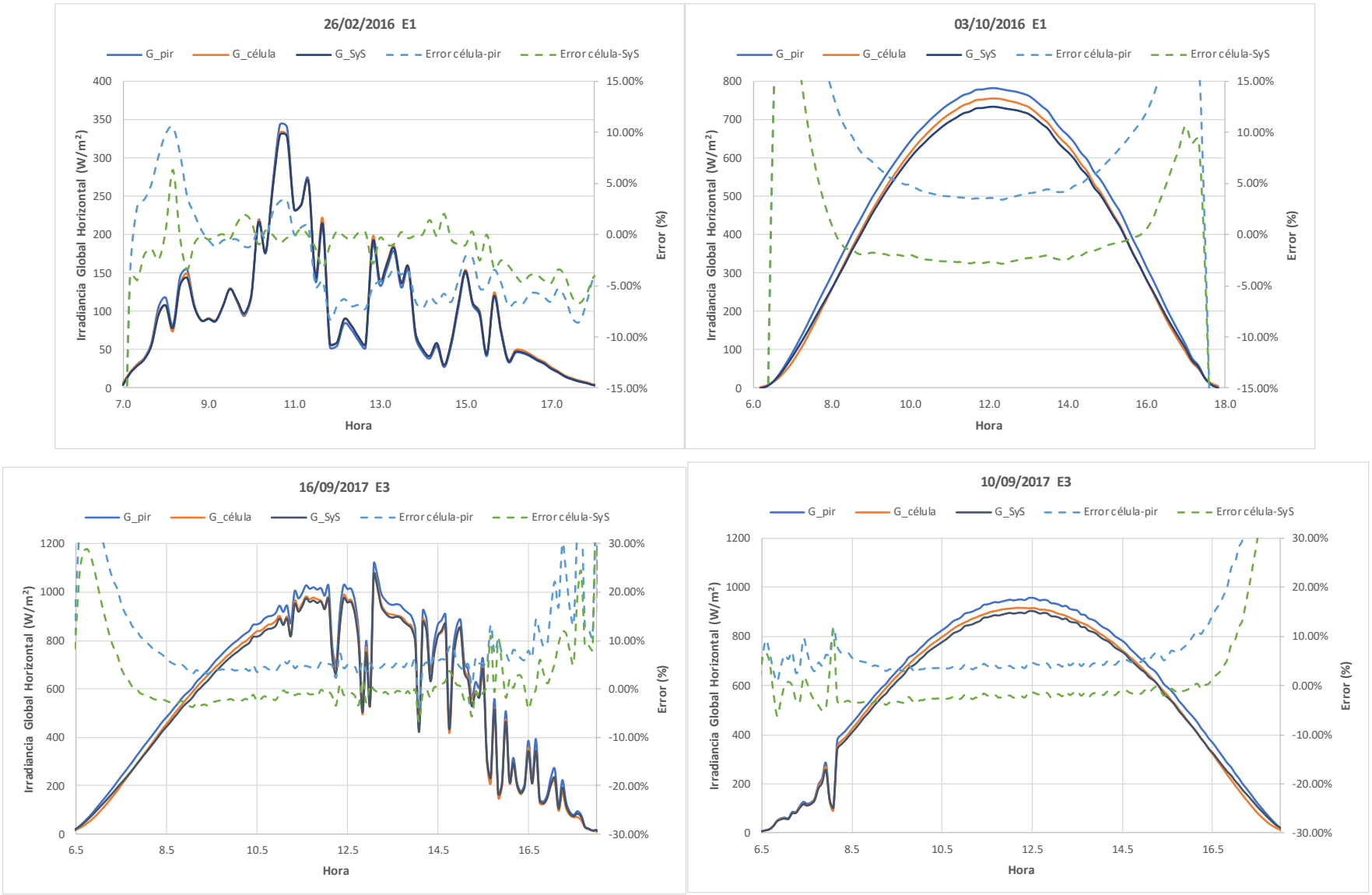


Ilustración 5-2. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de EE. UU., Piranómetro-Célula

- Análisis estadístico.

Se analiza la aplicación del RMSE a los valores de radiación medidos por las estaciones de validación y a los datos calculados mediante el modelo de EE. UU.

Tabla 5-4. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por la célula.

		RMSE (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Piranómetro	Serie sintética
E1	2016 (10-min)	29.62	11.76
E2	2017 (5-min)	41.58	22.18
E3	2016 (10-min)	29.15	14.44
	2017 (5-min)	29.31	19.44

Tabla 5-5. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por la célula.

		RMSE horario (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Piranómetro	Serie sintética
E1	2016	27.97	10.17
E2	2017	35.94	16.65
E3	2016	26.75	12.07
	2017	26.90	16.39

Tabla 5-6. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por la célula.

		RMSE diario ($W \cdot h/m^2$)	
Estación	Año de validación	Piranómetro	Serie sintética
E1	2016	334.56	60.51
E2	2017	326.69	85.70
E3	2016	291.73	57.65
	2017	294.16	113.53

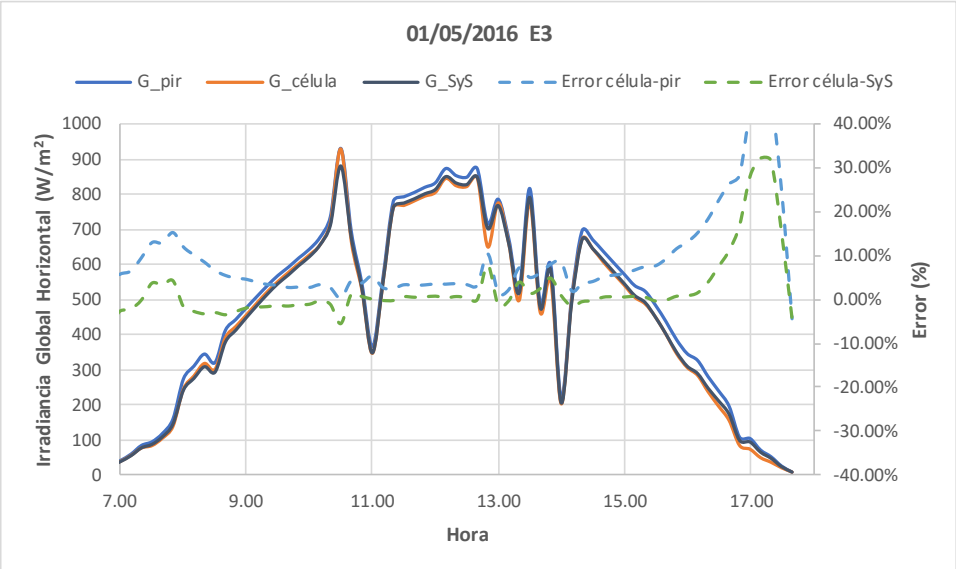
Se corrobora también para el modelo de EE. UU. que la serie sintética calculada se aproxima mejor a los valores de irradiancia medidos por las células que las series obtenidas de los piranómetros, en todas las estaciones.

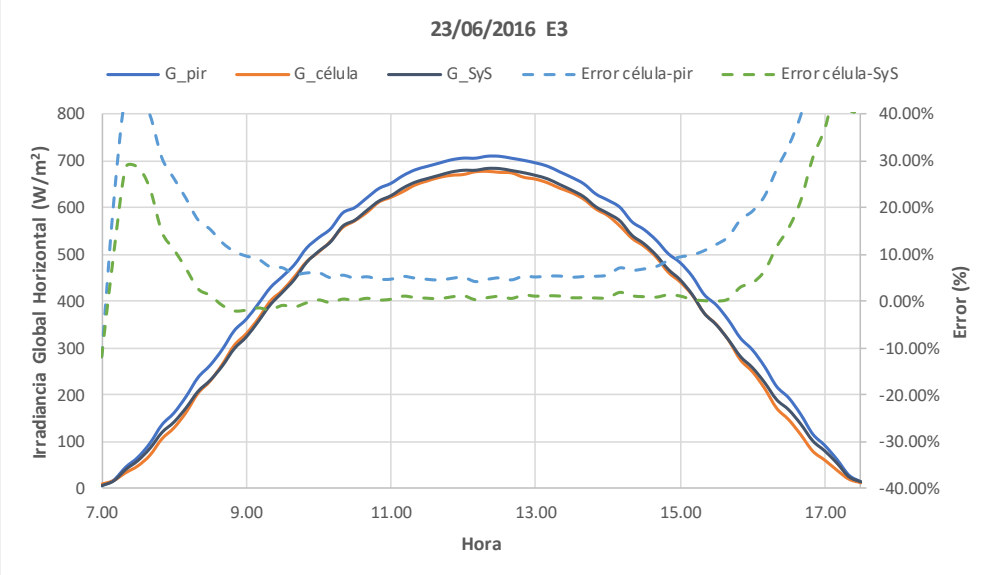
Era de esperar unos errores superiores a los cometidos por el modelo de Sevilla (que suceden principalmente en la estación de Australia) debido a la menor cantidad de datos utilizados para el desarrollo del modelo (en este caso un año). Por ello, sería interesante el uso de periodos de mediciones más amplios que permitan alcanzar una serie sintética que simule con mayor precisión los datos que registraría la célula.

5.1.3 Modelo de la estación de Australia

Nuevamente, se aplica la ecuación del modelo correspondiente (*ecuación 4-4*) a los valores de 2016 y/o 2017 que registraron los piranómetros de las estaciones, con el objetivo de calcular las series sintéticas de irradiancia que mediría la célula y su comparación con los datos verdaderamente registrados.

Con las gráficas de los distintos días de 2016 y 2017, se estiman unas desviaciones pequeñas, aunque en algunos días pueden alcanzar hasta el 10 %, más allá de hacerlo en los tramos iniciales y finales de radiación diarios.





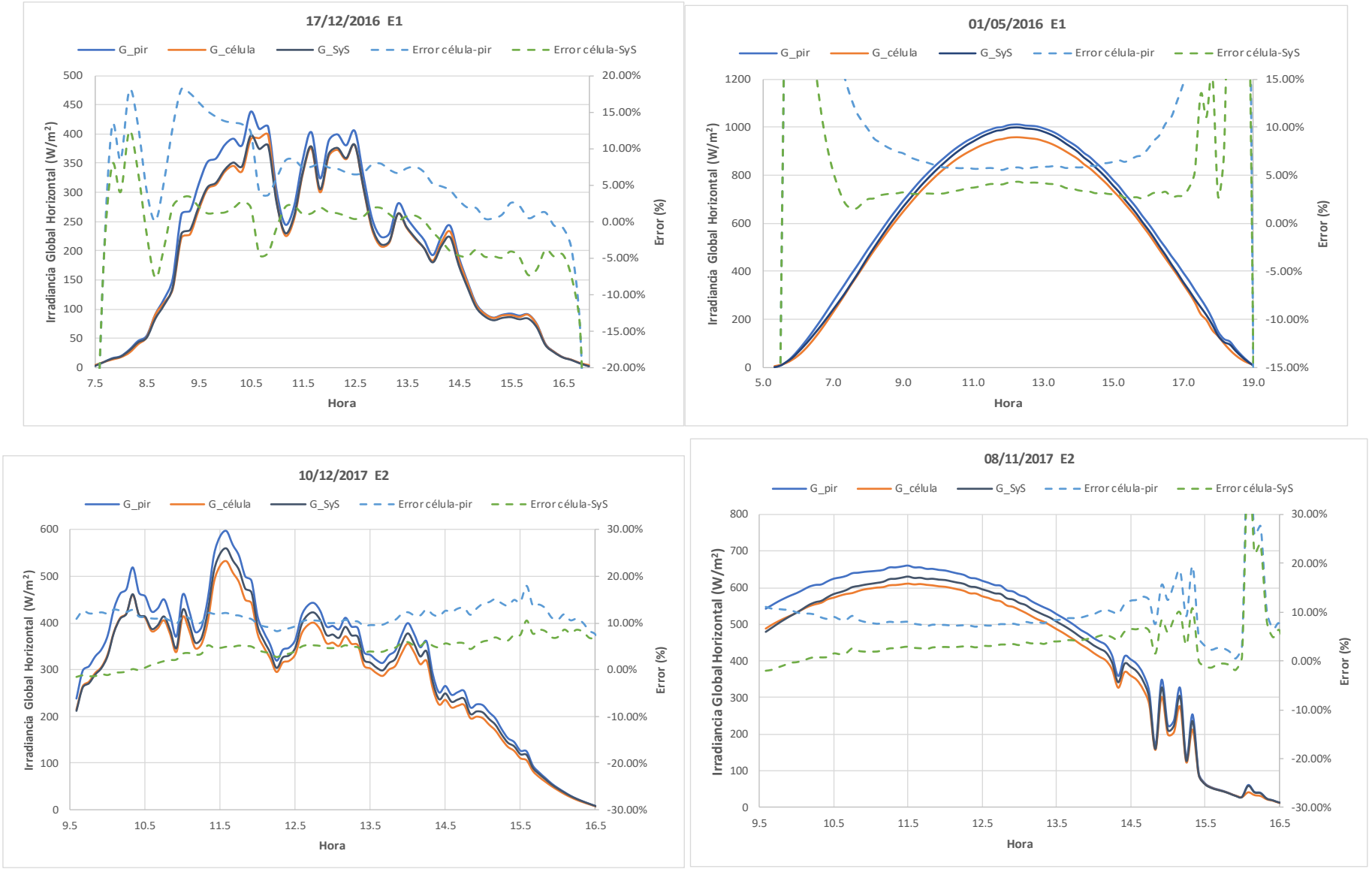


Ilustración 5-3. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de Australia, Piranómetro-Célula

- Análisis estadístico.

Aplicando el estadístico RMSE a los valores de radiación medidos por las estaciones y a los datos calculados con el modelo de Australia se cometen los siguientes errores:

Tabla 5-7. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por la célula.

		RMSE (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Piranómetro	Serie sintética
E1	2016 (10-min)	29.62	14.42
E2	2016 (5-min)	42.52	25.85
	2017 (5-min)	41.58	25.89
E3	2016 (10-min)	29.15	10.42

Tabla 5-8. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por la célula.

		RMSE horario (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Piranómetro	Serie sintética
E1	2016	27.97	12.95
E2	2016	33.94	19.22
	2017	35.94	20.51
E3	2016	26.75	8.16

Tabla 5-9. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas del piranómetro y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por la célula.

		RMSE diario ($W \cdot h/m^2$)	
Estación	Año de validación	Piranómetro	Serie sintética
E1	2016	334.56	135.54
E2	2016	314.54	156.12
	2017	326.69	157.53
E3	2016	291.73	50.83

De manera similar al modelo de EE. UU., el estadístico muestra unos niveles de errores un poco superiores a los cometidos por la serie de Sevilla. Como se comentó, un periodo de datos de Australia mayor permitiría desarrollar la serie sintética con más precisión y, con ella, alcanzar errores más similares a los de Sevilla.

Aun así, se comprueba que este modelo es también válido y se asemeja más a los valores que medirían las células que el simple uso de las mediciones de los piranómetros.

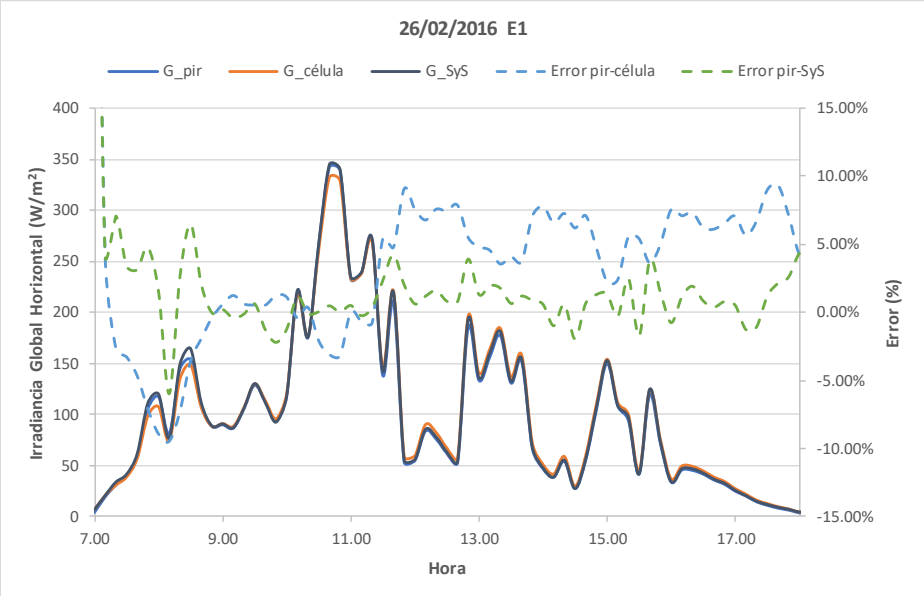
5.2 Validación de los modelos célula-piranómetro

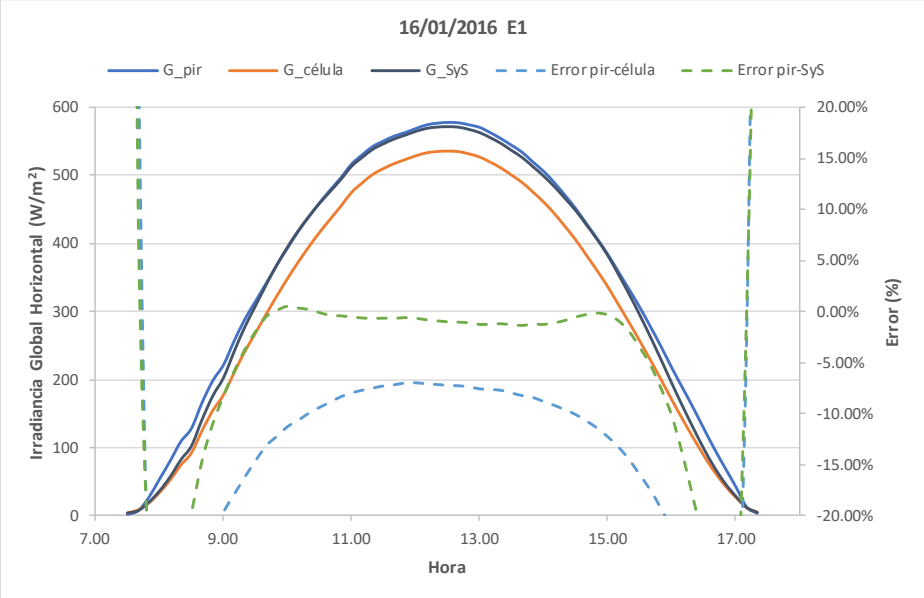
Se procede a realizar el análisis del apartado anterior (*5.1*) a los modelos célula-piranómetro. Para ello se aplican las ecuaciones *4-6*, *4-7* y *4-8* a las mediciones de radiación de las células de las estaciones de validación correspondientes, obteniéndose las estimaciones de los valores de radiación que medirían los piranómetros, y se comparan con los datos realmente captados por dichos equipos.

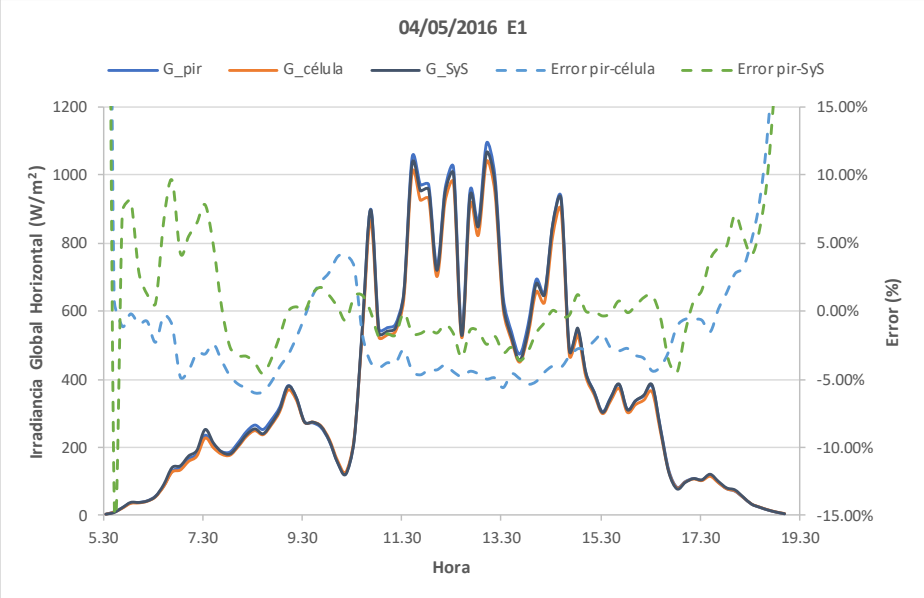
Para el análisis visual de los resultados, se presentan a continuación las gráficas de distintos días de los años 2016 y 2017 para cada uno de los tres modelos aplicados a las diferentes estaciones. En ellas se representan los valores de radiación reales y estimados junto con sus correspondientes errores. Nuevamente, se observa que los mejores resultados aparecen con el modelo de Sevilla, con errores de la serie sintética cercanos a cero y casi siempre por debajo del 5 %, confirmándose que estas series estiman con gran acierto las mediciones de los piranómetros (en comparación con las generadas a partir de los valores captados por las células). En los modelos de EE. UU. y Australia, los errores son algo mayores, pudiendo alcanzar el 10 % con este último, aunque siempre mejorando los obtenidos con las células. Desviaciones superiores al 5 – 10 % ocurren en los primeros y últimos tramos de los días, momentos en los que la radicación es pequeña en comparación al valor total diario.

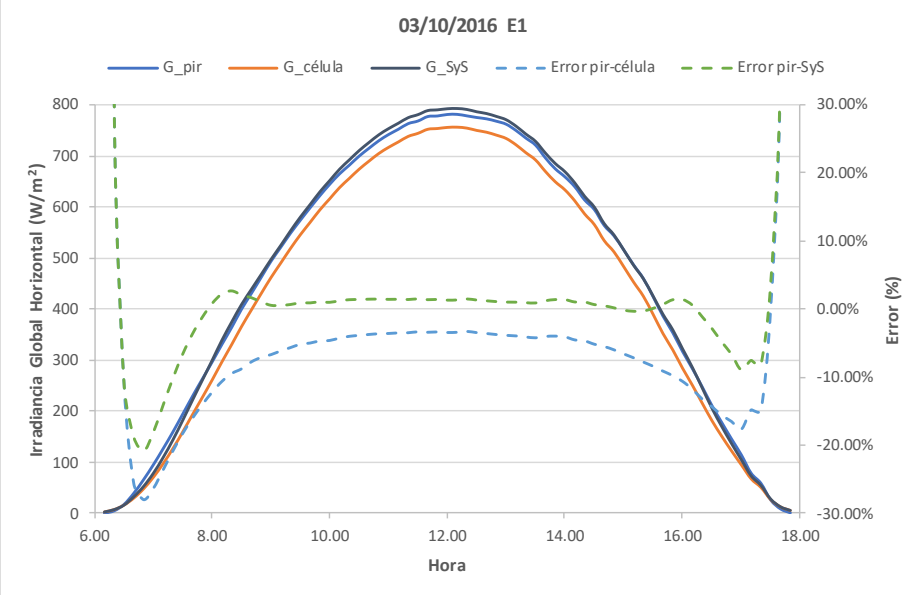
Respecto a la evaluación estadística, se verifica que las series sintéticas calculadas simulan mejor los valores de radiación medidos por los piranómetros que las series obtenidas de las células, hecho que sucede aplicando cualquiera de los modelos a las tres estaciones. Como se podía esperar los menores errores ocurren con el modelo de Sevilla, ya que para su obtención se utilizó un amplio periodo de datos (42 meses). Los otros dos (EE. UU. y Australia) generan desviaciones un poco mayores, aunque a pesar de haber sido calculados a partir de un año o seis meses de datos, también reducen en buena medida los errores cometidos por las células.

5.2.1 Modelo de la estación del GTER, Sevilla




16/01/2016 E1
G_pir
G_célula
G_SyS
Error pir-célula
Error pir-SyS
Irradiancia Global Horizontal (W/m²)
Error (%)
Hora
600
500
400
300
200
100
0
20.00%
15.00%
10.00%
5.00%
0.00%
-5.00%
-10.00%
-15.00%
-20.00%
7.00
9.00
11.00
13.00
15.00
17.00


04/05/2016 E1
G_pir
G_célula
G_SyS
Error pir-célula
Error pir-SyS
Irradiancia Global Horizontal (W/m²)
Error (%)
Hora
1200
1000
800
600
400
200
0
15.00%
10.00%
5.00%
0.00%
-5.00%
-10.00%
-15.00%
5.30
7.30
9.30
11.30
13.30
15.30
17.30
19.30


03/10/2016 E1
G_pir
G_célula
G_SyS
Error pir-célula
Error pir-SyS
Irradiancia Global Horizontal (W/m²)
Error (%)
Hora
800
700
600
500
400
300
200
100
0
30.00%
20.00%
10.00%
0.00%
-10.00%
-20.00%
-30.00%
6.00
8.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00

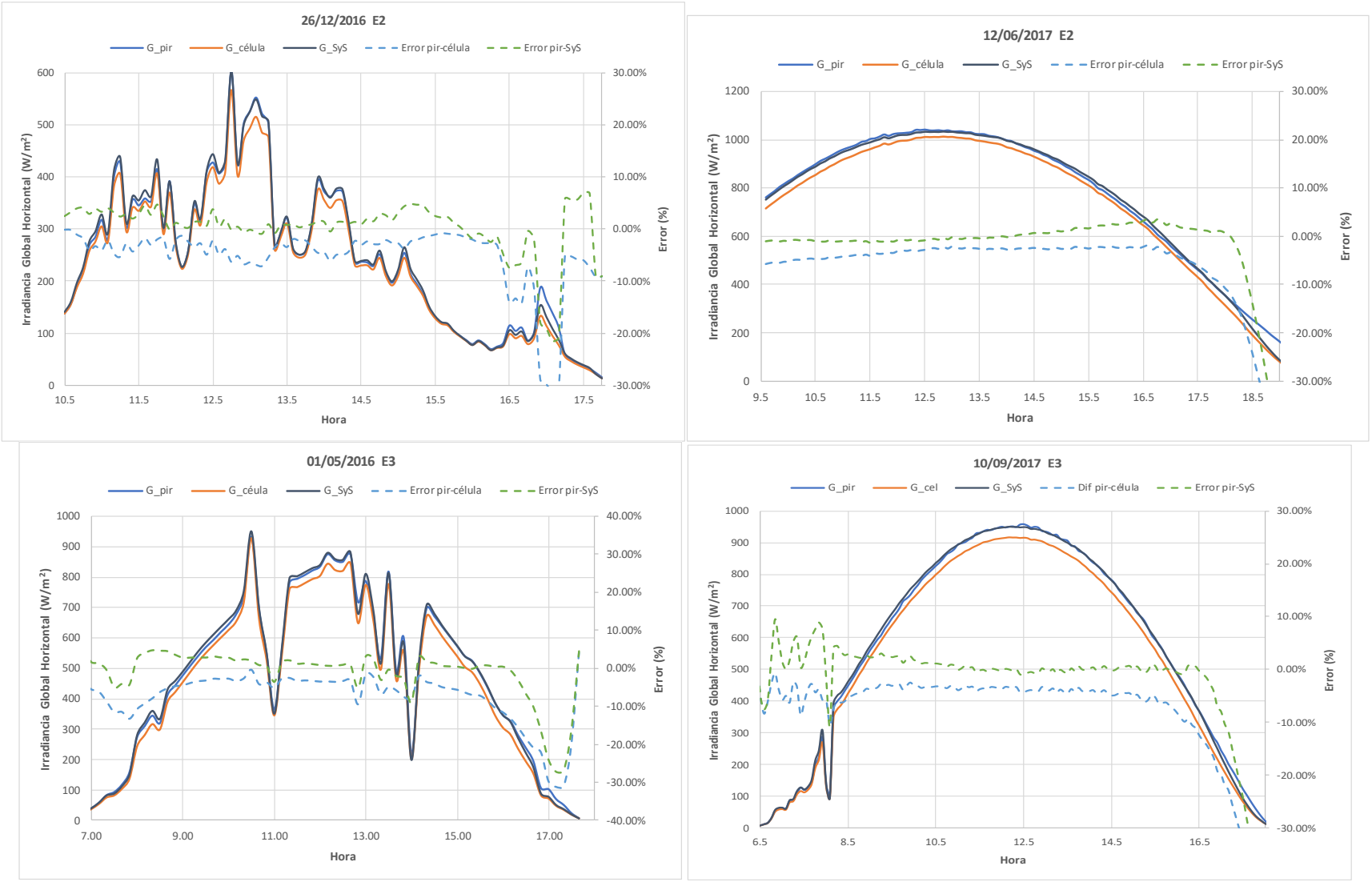


Ilustración 5-4. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de Sevilla, Célula-Piranómetro

- Análisis estadístico.

Tabla 5-10. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por el piranómetro.

		RMSE (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Célula	Serie sintética
E1	2016 (10-min)	29.62	10.76
E2	2016 (5-min)	41.54	22.53
	2017 (5-min)	41.81	24.29
E3	2016 (10-min)	29.15	12.58
	2017 (5-min)	29.31	15.62

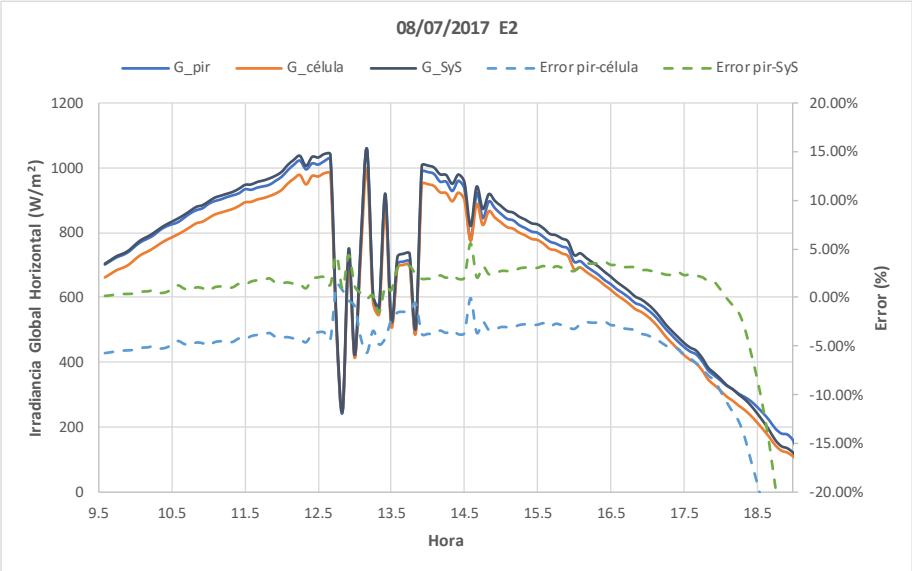
Tabla 5-11. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por el piranómetro.

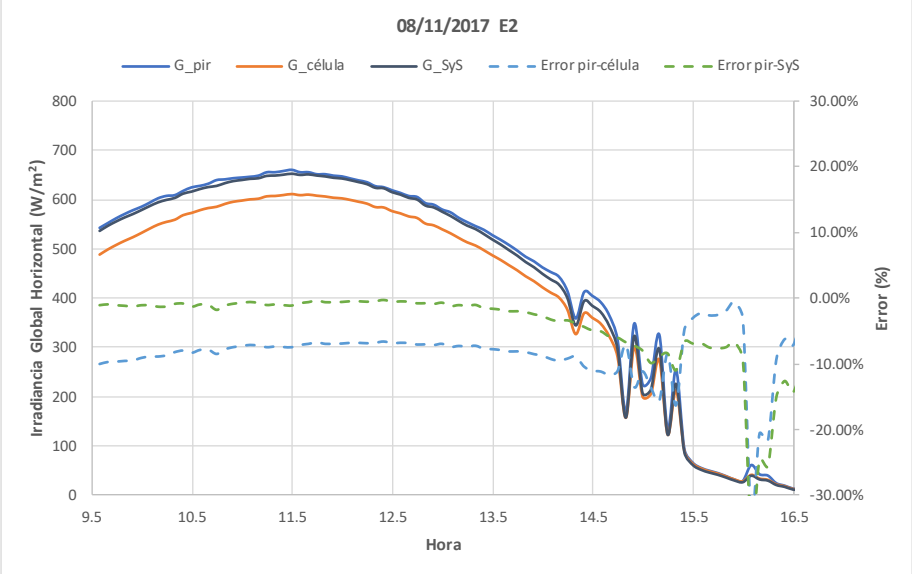
		RMSE horario (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Célula	Serie sintética
E1	2016	27.97	8.79
E2	2016	33.94	15.85
	2017	35.94	17.81
E3	2016	26.75	9.90
	2017	26.90	12.35

Tabla 5-12. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Sevilla) con los valores reales medidos por el piranómetro.

		RMSE diario ($W \cdot h/m^2$)	
Estación	Año de validación	Célula	Serie sintética
E1	2016	334.56	73.55
E2	2016	314.54	113.81
	2017	326.69	113.80
E3	2016	291.73	35.05
	2017	294.16	76.76

5.2.2 Modelo de la estación de EE. UU.





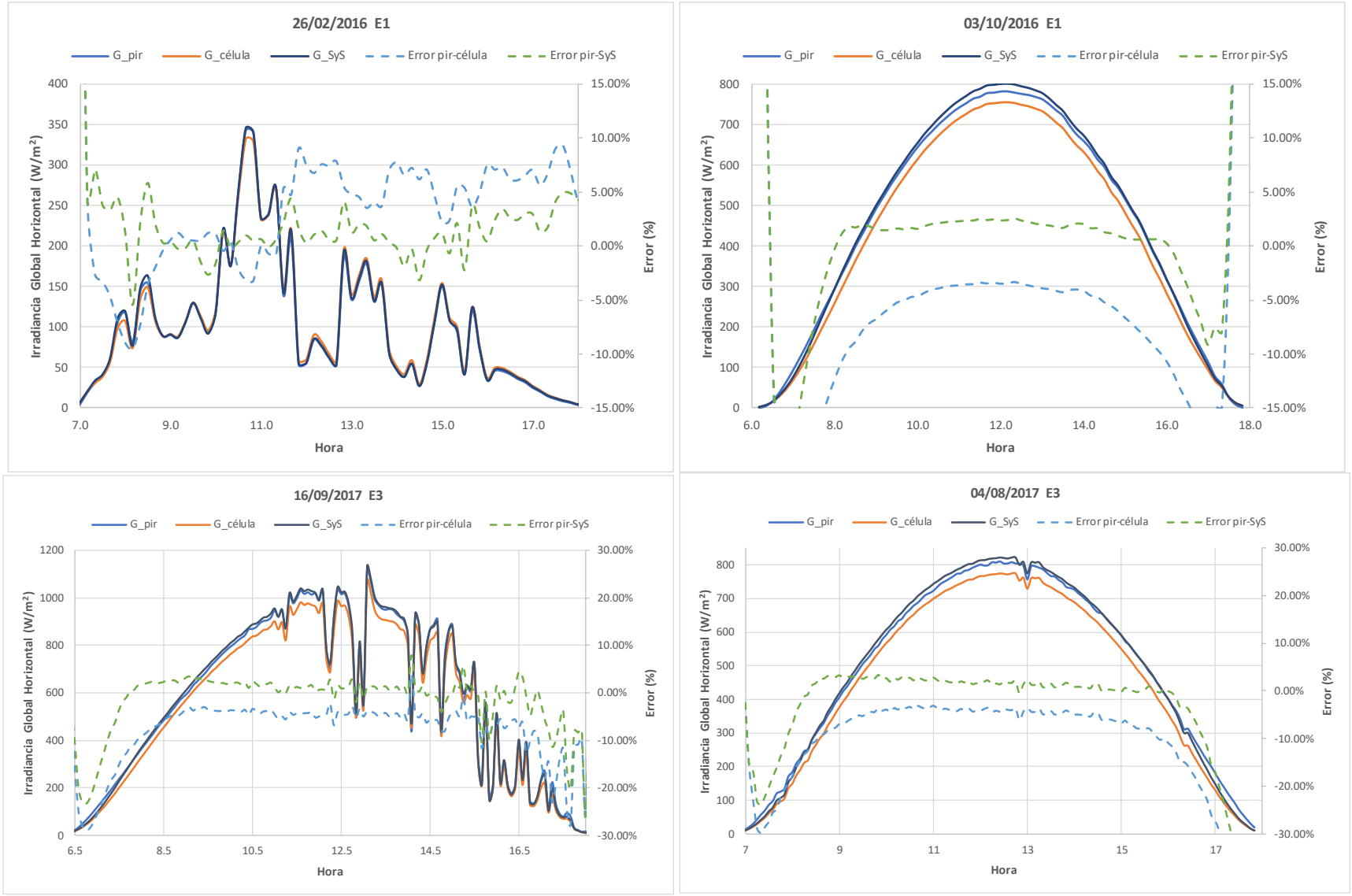


Ilustración 5-5. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de EE. UU., Célula-Piranómetro

- Análisis estadístico.

Tabla 5-13. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por el piranómetro.

		RMSE (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Célula	Serie sintética
E1	2016 (10-min)	29.62	11.90
E2	2017 (5-min)	41.81	24.01
E3	2016 (10-min)	29.15	14.85
	2017 (5-min)	29.31	19.72

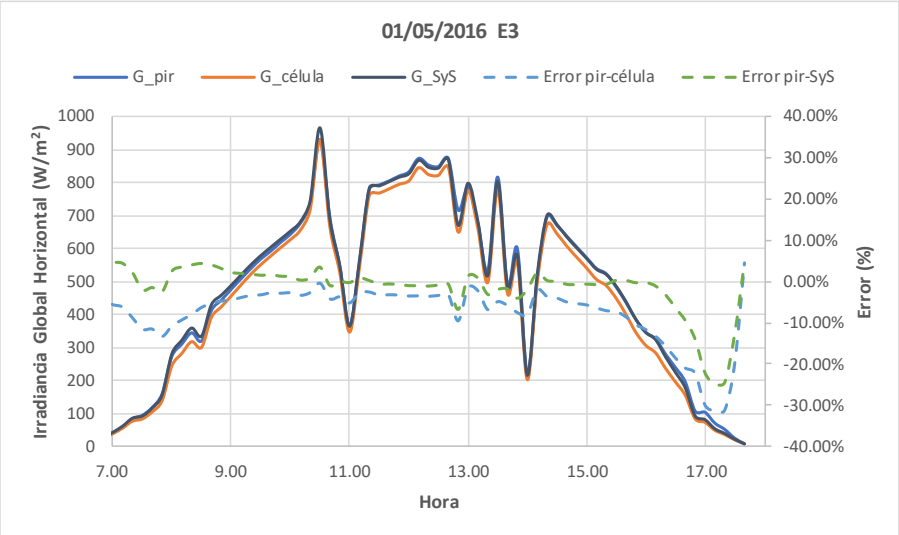
Tabla 5-14. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por el piranómetro.

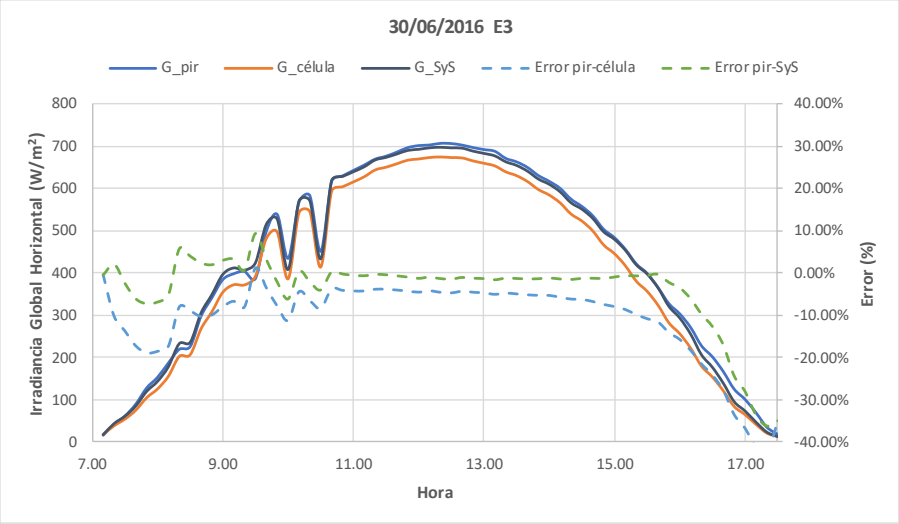
		RMSE horario (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Célula	Serie sintética
E1	2016	27.97	10.01
E2	2017	35.94	17.74
E3	2016	26.75	12.26
	2017	26.90	16.50

Tabla 5-15. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de EE. UU.) con los valores reales medidos por el piranómetro.

		RMSE diario ($W \cdot h/m^2$)	
Estación	Año de validación	Célula	Serie sintética
E1	2016	334.56	56.93
E2	2017	326.69	89.93
E3	2016	291.73	53.93
	2017	294.16	111.38

5.2.3 Modelo de la estación de Australia





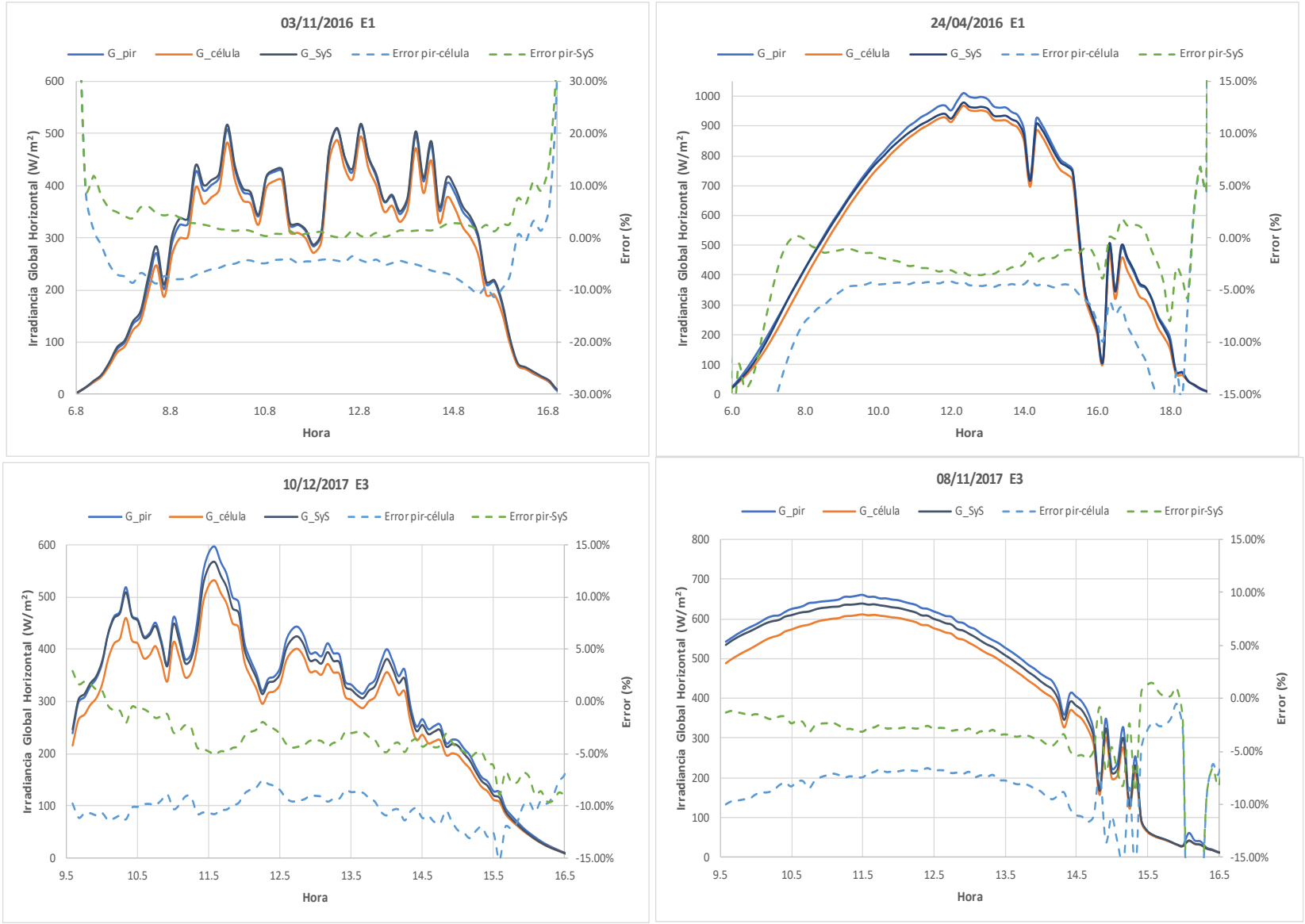


Ilustración 5-6. Gráficas de algunos días de 2016 y 2017. Se representan los valores medidos y estimados de irradiancia global horizontal y sus correspondientes errores. Modelo de Australia, Célula-Piranómetro

- Análisis estadístico.

Tabla 5-16. Estadístico RMSE (t-minutal) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por el piranómetro.

		RMSE (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Célula	Serie sintética
E1	2016 (10-min)	29.62	15.51
E2	2016 (5-min)	41.54	28.30
	2017 (5-min)	41.81	28.55
E3	2016 (10-min)	29.15	11.54

Tabla 5-17. Estadístico RMSE (horario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por el piranómetro.

		RMSE horario (W/m^2)	
Estación	Año de validación	Célula	Serie sintética
E1	2016	27.97	13.87
E2	2016	33.94	21.40
	2017	35.94	22.55
E3	2016	26.75	9.26

Tabla 5-18. Estadístico RMSE (diario) para comparar las medidas de la célula y la serie sintética (modelo de Australia) con los valores reales medidos por el piranómetro.

		RMSE diario ($W \cdot h/m^2$)	
Estación	Año de validación	Célula	Serie sintética
E1	2016	334.56	142.17
E2	2016	314.54	175.87
	2017	326.69	175.37
E3	2016	291.73	59.93

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

- Conclusiones.

Del desarrollo de este trabajo se desprende como conclusión que se han alcanzado los objetivos planteados en el mismo:

- Se han obtenido unos modelos que permiten generar series sintéticas de datos 5/10-minutales de irradiancia de una célula fotovoltaica de silicio monocristalino, a partir de los datos 5/10-minutales de irradiancia de un piranómetro. Los modelos se han calculado para tres estaciones, con una reducción de los errores RMSE 5/10-minutales cuando se utilizan las series sintéticas para estimar las mediciones de una célula de silicio que oscila entre el 35 y el 70 %, en comparación con las desviaciones al emplear directamente las medidas de un piranómetro. Los mejores resultados ocurren al aplicar el modelo de Sevilla, estación de las que se disponía de más datos.

- De manera inversa, se han calculado otros modelos con los que estimar la irradiancia 5/10-minutal que mediría un piranómetro, conocidos los datos 5/10-minutales de una célula de silicio monocristalino. Nuevamente, se obtuvieron modelos para las tres estaciones. Cuando fueron aplicados, la reducción de los errores RMSE 5/10-minutales al usar la serie sintética para estimar las medidas de un piranómetro, en comparación con los datos de una célula de silicio, fue de entre el 32 y el 64 %. De manera equivalente al caso anterior, la ecuación obtenida con los datos de Sevilla es la que logra mayores reducciones.

Por tanto, se demuestra que todos los modelos consiguen disminuir los errores y que, cuanto mayor sea el periodo de datos utilizado para su elaboración, más importante es esta reducción. Incluso con periodos pequeños, como en el caso de la estación de Australia, la mejora de resultados es significativa.

Además, de estas conclusiones se puede afirmar que cualquiera de los modelos es válido independientemente del emplazamiento en el que sea utilizado.

- Líneas de trabajo futuras.

Tras la realización de este trabajo se proponen una serie de aspectos que pueden ser estudiados a fin de seguir mejorando los resultados obtenidos con los modelos:

- Ampliar el número de estaciones y los periodos de datos para intentar obtener un modelo general para cualquier emplazamiento.

- Introducir otras tecnologías fotovoltaicas al estudio.

REFERENCIAS

[1] E. Riley *et al.*, "Pyranometers and Reference Cells: Part 2: What Makes the Most Sense for PV Power Plants?," *PV Mag.*, no. March, pp. 108–110, 2012.

[2] L. Dunn, M. Gostein, and K. Emery, "Comparison of pyranometers vs. PV reference cells for evaluation of PV array performance," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 2899–2904, 2012.

[3] N. H. Reich, B. Mueller, A. Armbruster, W. van Sark, K. Kiefer, and C. Reise, "Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, pp. 717–726, 2012.

[4] J. Meydbray, K. Emery, and S. Kurtz, "Pyranometers and Reference Cells, What's the Difference?," *PV Mag.*, no. March, pp. 108–110, 2012.

[5] K. A. Emery *et al.*, "Methods for measuring solar cell efficiency independent of reference cell or light source," *IEEE PV Spec. Conf*, pp. 623–628, 1985.

[6] D. L. King, J. A. Kratochvil, and W. E. Boyson, "Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors," *Conf. Rec. Twenty Sixth IEEE Photovolt. Spec. Conf. - 1997*, no. September, pp. 1113–1116, 1997.

[7] F. Vignola *et al.*, "Effects of changing spectral radiation distribution on the performance of photodiode pyranometers," *Sol. Energy*, vol. 129, pp. 224–235, 2016.

[8] P. M. Rodrigo, E. F. Fernández, F. M. Almonacid, and P. J. Pérez-Higueras, "Quantification of the spectral coupling of atmosphere and photovoltaic system performance: Indexes, methods and impact on energy harvesting," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 163, no. January, pp. 73–90, 2017.

[9] J. J. Pérez-López, F. Fabero, and F. Chenlo, "Experimental Solar Spectral Irradiance Until 2500 nm: Results and Influence on PV Conversion of Different Materials," *Prog. Photovoltaics. Res. Appl.*, vol. 15, pp. 303–315, 2007.

[10] E. F. Fernández, A. Soria-Moya, F. Almonacid, and J. Aguilera, "Comparative assessment of the spectral impact on the energy yield of high concentrator and conventional photovoltaic technology," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 147, pp. 185–197, 2016.

[11] J. Polo, M. Alonso-Abella, J. A. Ruiz-Arias, and J. L. Balenzategui, "Worldwide analysis of spectral factors for seven photovoltaic technologies," *Sol. Energy*, vol. 142, pp. 194–203, 2017.

[12] D. Djafer, A. Irbah, and M. Zaiani, "Identification of clear days from solar irradiance observations using a new method based on the wavelet transform," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 347–355, 2017.

[13] G. Nofuentes, C. A. Gueymard, J. Aguilera, M. D. Pérez-Godoy, and F. Charte, "Is the average photon energy a unique characteristic of the spectral distribution of global irradiance?," *Sol. Energy*, vol. 149, pp. 32–43, 2017.

[14] M. Norton, A. M. G. Amillo, and R. Galleano, "Comparison of solar spectral irradiance measurements using the average photon energy parameter," *Sol. Energy*, vol. 120, pp. 337–344, 2015.

[15] Y. Nakada, H. Takahashi, K. Ichida, T. Minemoto, and H. Takakura, "Influence of clearness index and air mass on sunlight and outdoor performance of photovoltaic modules," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 10, no. 2 SUPPL., pp. S261–S264, 2010.

[16] A. J. Gutiérrez-Trashorras, E. Villicaña-Ortiz, E. Álvarez-Álvarez, J. M. González-Caballín, J. Xiberta-Bernat, and M. J. Suarez-López, "Attenuation processes of solar radiation. Application to the quantification of direct and diffuse solar irradiances on horizontal surfaces in Mexico by means of an overall atmospheric transmittance," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. June 2017, pp. 93–106, 2018.

[17] E. Nikitidou, A. Kazantzidis, and V. Salamalikis, "The aerosol effect on direct normal irradiance in Europe under clear skies," *Renew. Energy*, vol. 68, no. February 2000, pp. 475–484, 2014.

[18] D. L. King and D. R. Myers, "Silicon-Photodiode Pyranometers: Operational Characteristics, Historical Experiences, and New Calibration Procedures," *Conf. Rec. Twenty Sixth IEEE Photovolt. Spec. Conf. - 1997*, no. September, pp. 1285–1288, 1997.

[19] J. J. Michalsky, R. Perez, L. Harrison, and B. LeBaron, "Spectral and temperature correction of silicon photovoltaic solar radiation detectors," *Sol. Energy*, vol. 47, no. 4, pp. 299–305, 1991.

[20] L. Alados-Arboledas, F. J. Batlles, and F. J. Olmo, "Solar radiation resource assessment by means of silicon cells," *Sol. Energy*, vol. 54, no. 3, pp. 183–191, 1995.

[21] J. Metzdorf *et al.*, "Objectives and-results of the pep'87 round-robin calibration of reference solar cells and modules," *Photovolt. Spec. Conf. 1990., Conf. Rec. Twenty First IEEE*, pp. 952–959, 1990.

[22] M. Larrañeta, C. Fernandez-Peruchena, M. A. Silva-Pérez, and I. Lillo-Bravo, "Methodology to synthetically downscale DNI time series from 1-h to 1-min temporal resolution with geographic flexibility," *Sol. Energy*, vol. 162, no. January, pp. 573–584, 2018.

ANEXO A

Como se explicó en la sección de la metodología, para el desarrollo del modelo continuo de cada estación, primero se calculaban los tramos de una serie discreta, aunque sus expresiones no se indicaron debido a que el objetivo era obtener ecuaciones continuas que evitaran las discontinuidades.

En este *Anexo A* se muestra como quedarían las series discretas calculadas con las medidas de la **estación de Sevilla**, ya que es el emplazamiento del que se dispuso de un mayor número de datos y el utilizado para explicar el procedimiento de cálculo de los modelos.

- Serie discreta piranómetro-célula.

$$G_{SyS}^{10min} = \begin{cases} a \cdot G_{pir}^{10min}, & si\ \alpha < 25° \\ b \cdot G_{pir}^{10min}, & si\ \alpha \geq 25° \end{cases} \qquad \text{(A–1)}$$

$$con\ a = \left(0.4658 \cdot {k_t}^2 - 0.6981 \cdot k_t + 1.1234\right) \qquad y$$

$$b = \left((-0.0024 \cdot \alpha + 0.3996) \cdot {k_t}^2 + (0.0036 \cdot \alpha - 0.5713) \cdot k_t + (-0.0005 \cdot \alpha + 1.1137)\right)$$

- Serie discreta célula-piranómetro.

$$G_{SyS}^{10min} = \begin{cases} a \cdot G_{célula}^{10min}, & si\ \alpha < 25° \\ b \cdot G_{célula}^{10min}, & si\ \alpha \geq 25° \end{cases} \qquad \text{(A–2)}$$

$$con\ a = \left(-0.7399 \cdot {k_t}^2 + 0.9395 \cdot k_t + 0.8568\right) \qquad y$$

$$b = \left((0.0028 \cdot \alpha - 0.4364) \cdot {k_t}^2 + (-0.0037 \cdot \alpha + 0.5878) \cdot k_t + (0.0003 \cdot \alpha + 0.8965)\right)$$

ANEXO B

En este *Anexo* se analiza la aplicación del estadístico Ramp Rate (RR), introducido en la sección de la *validación*, a los datos de irradiancia medidos por el piranómetro y por la célula de cada una de las estaciones, además de a los valores estimados por los distintos modelos piranómetro-célula y viceversa. A continuación, en las gráficas se muestran los RRs y sus probabilidades acumuladas (mediante el cálculo de funciones CDF) para cada uno de los modelos de las tres estaciones.

- Modelos piranómetro-célula.
    - Estación del GTER, Sevilla.

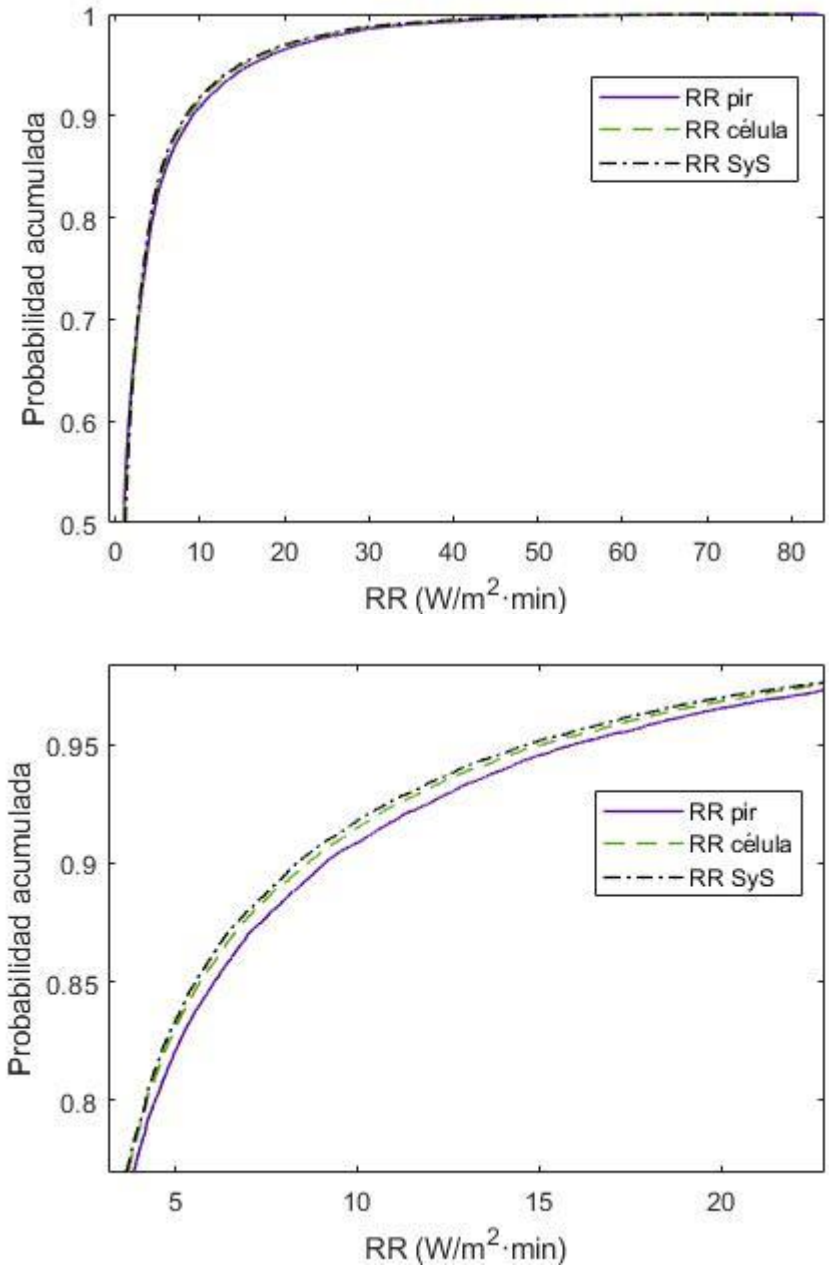


Ilustración B-1. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo pir-cel de Sevilla. Estación 1, año 2016.

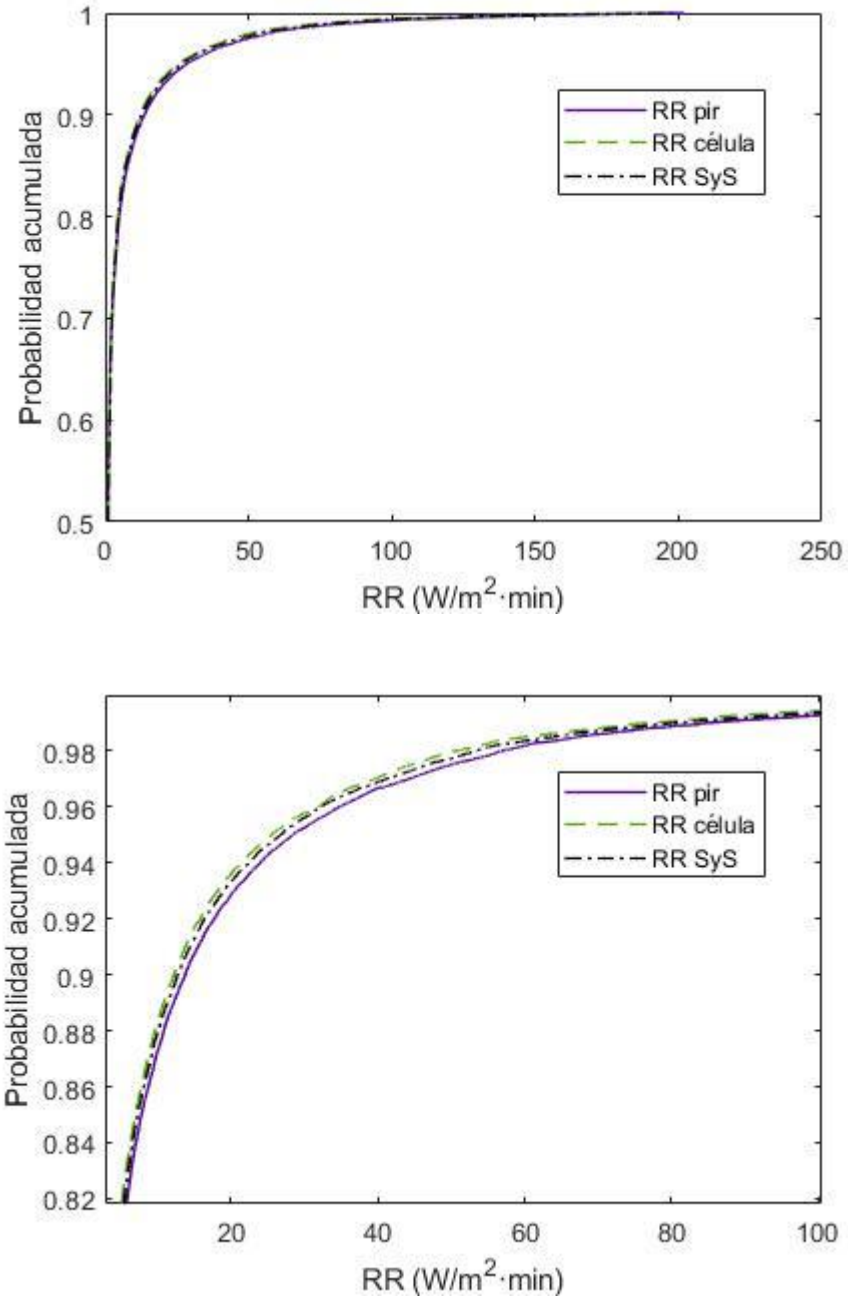


Ilustración B-2. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo pir-cel de Sevilla. Estación 2, año 2016.

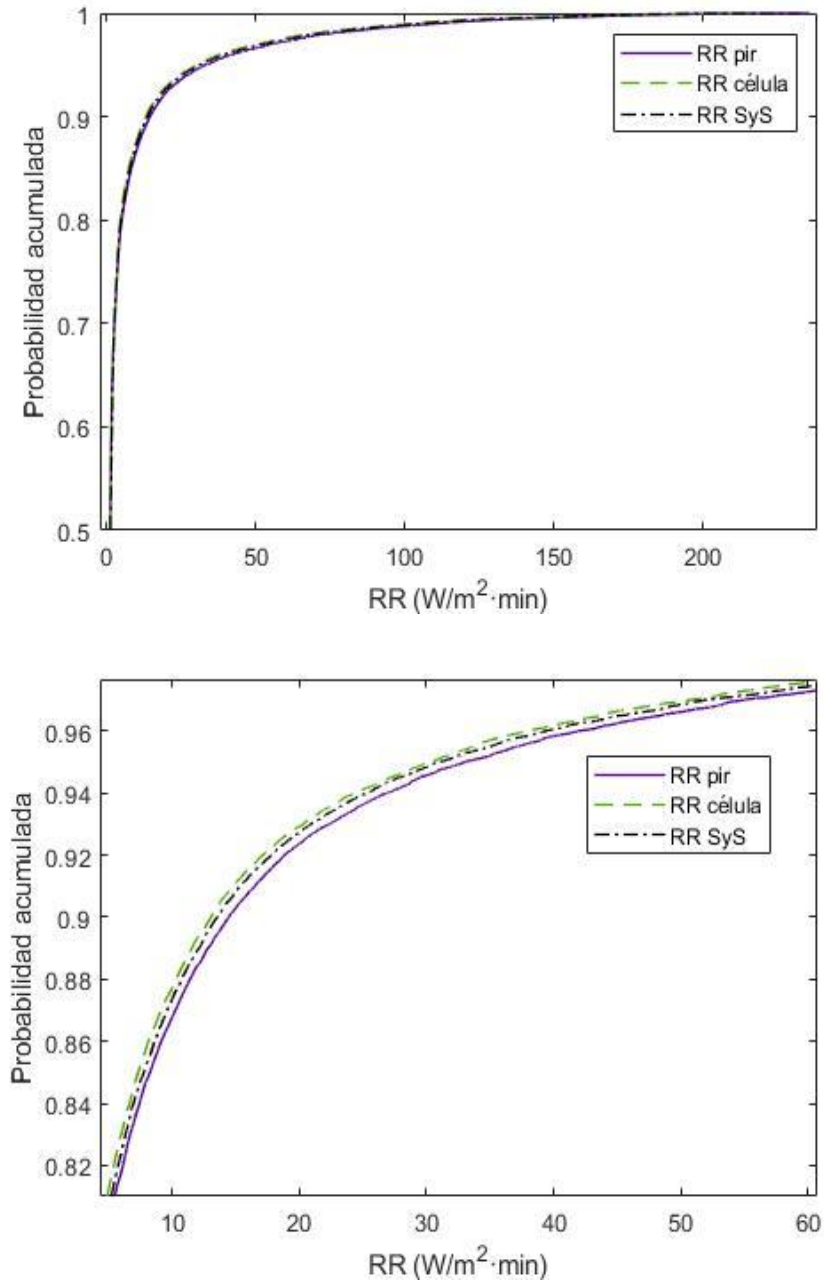
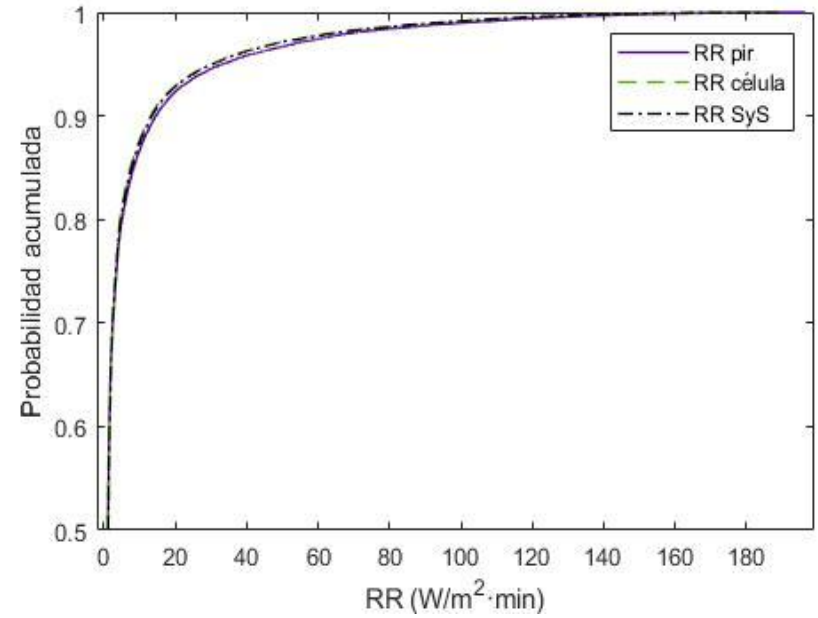


Ilustración B-3. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo pir-cel de Sevilla. Estación 2, año 2017.

- Estación de EE. UU.



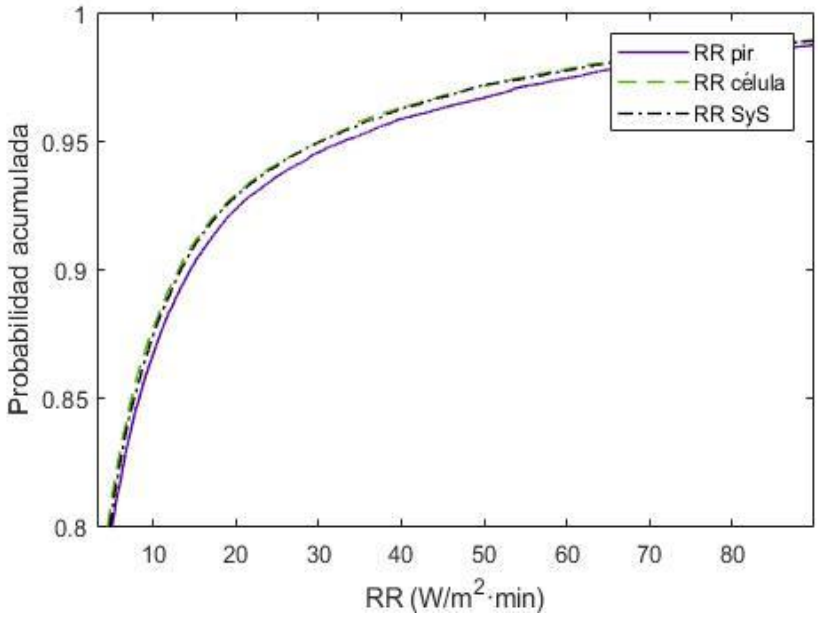


Ilustración B-4. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo pir-cel de EE. UU. Estación 2, año 2017.

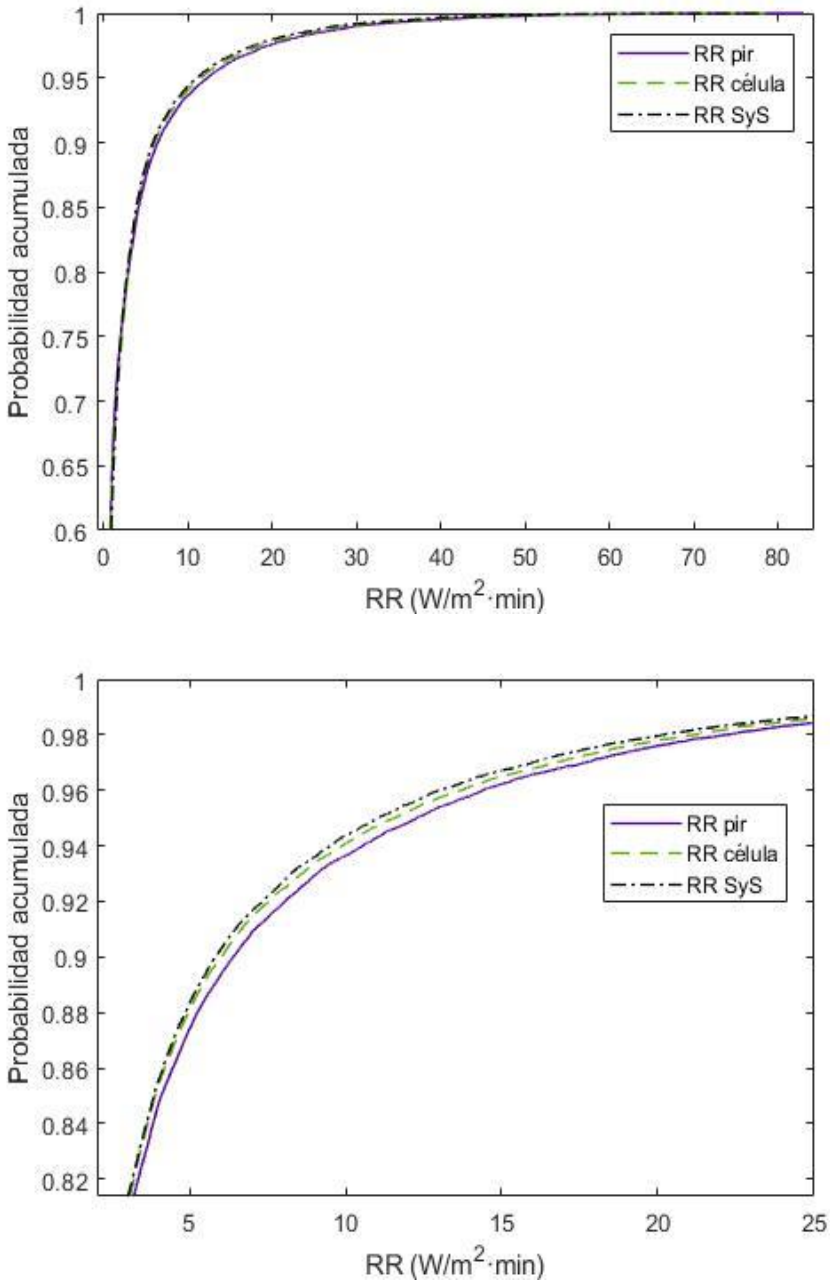


Ilustración B-5. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo pir-cel de EE. UU. Estación 1, año 2016.

- Estación de Australia.

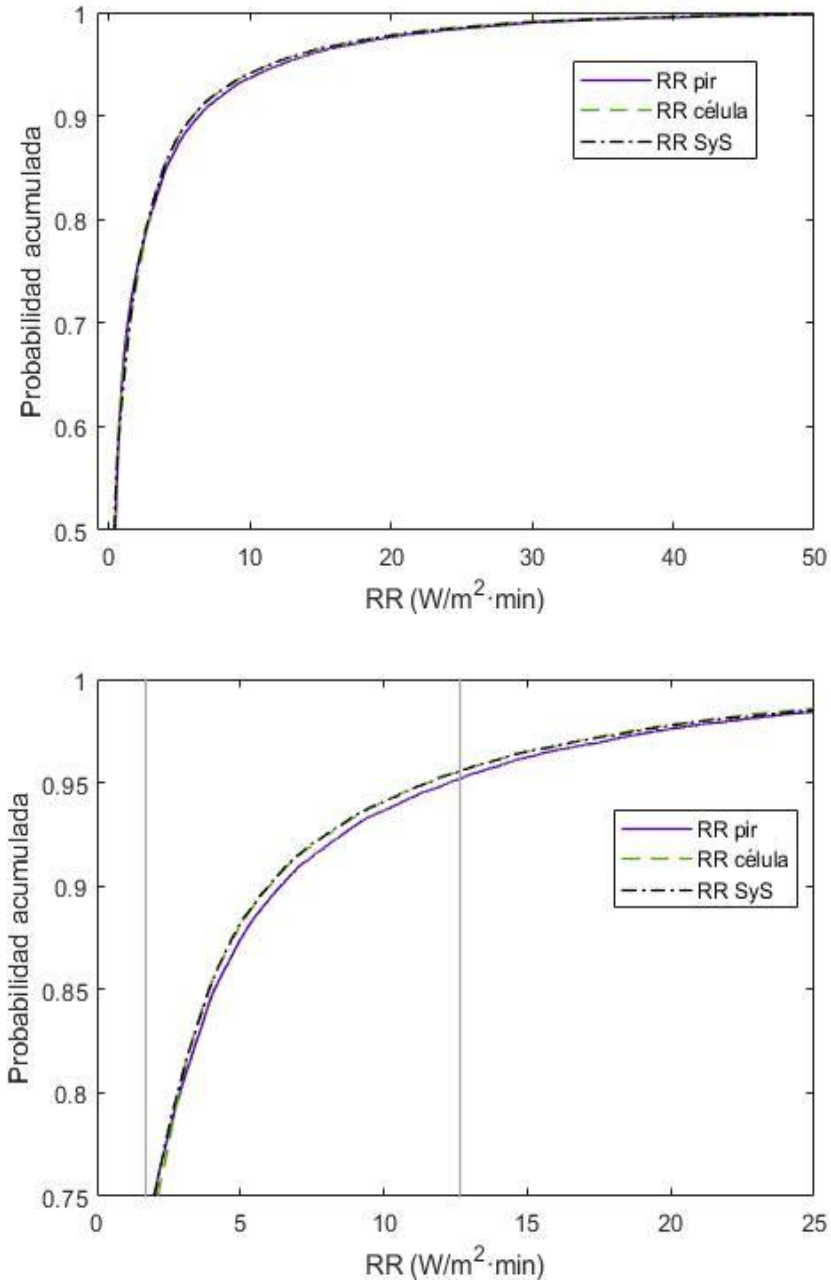


Ilustración B-6. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo pir-cel de Australia. Estación 1, año 2016.

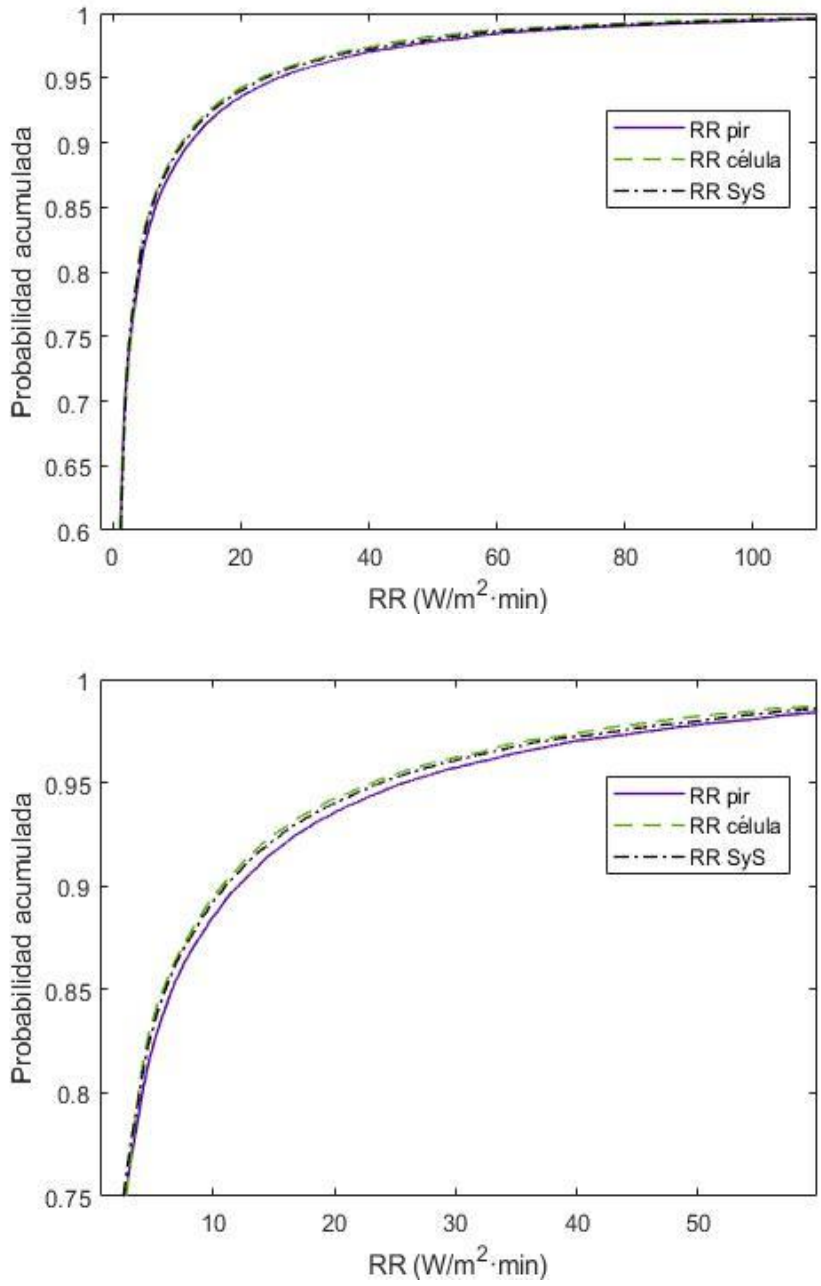


Ilustración B-7. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo pir-cel de Australia. Estación 2, año 2016.

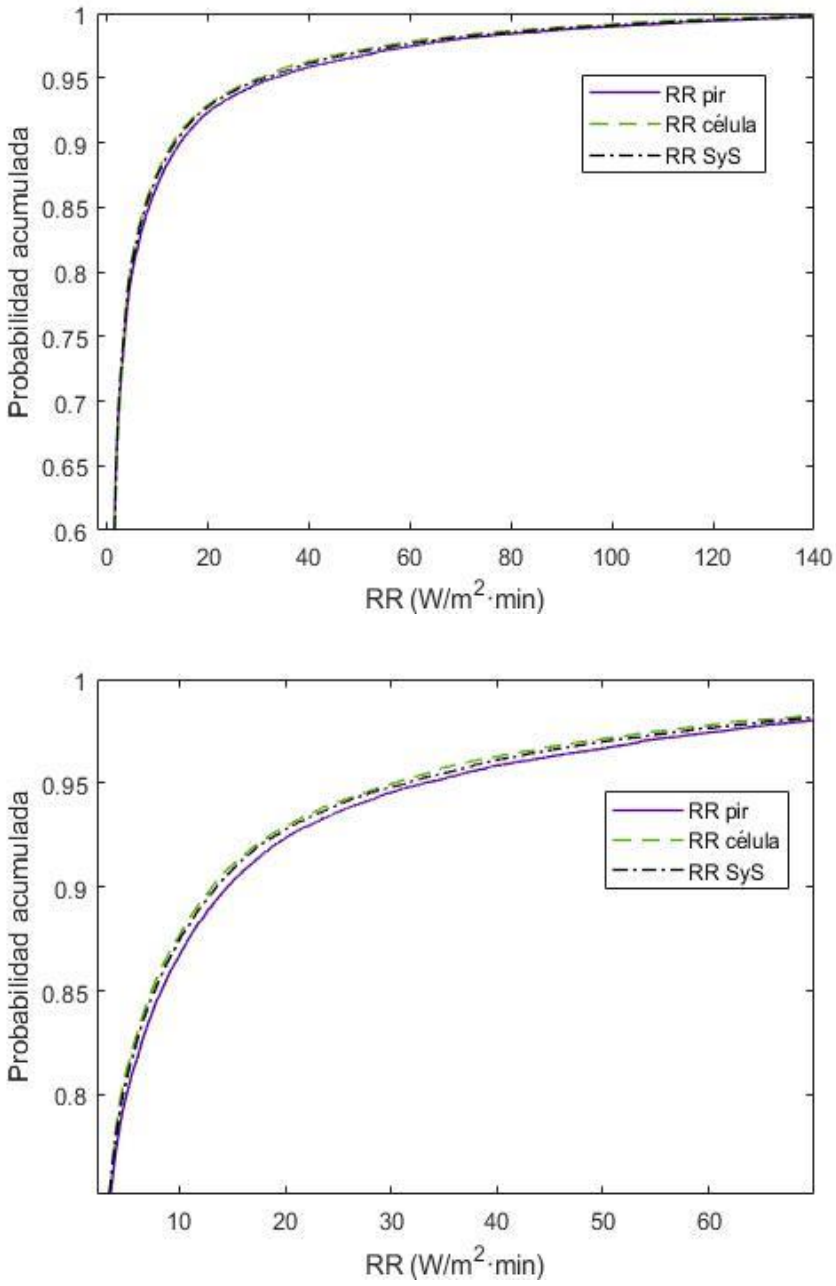


Ilustración B-8. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo pir-cel de Australia. Estación 2, año 2017.

- Modelos célula-piranómetro.

    - Estación del GTER, Sevilla.

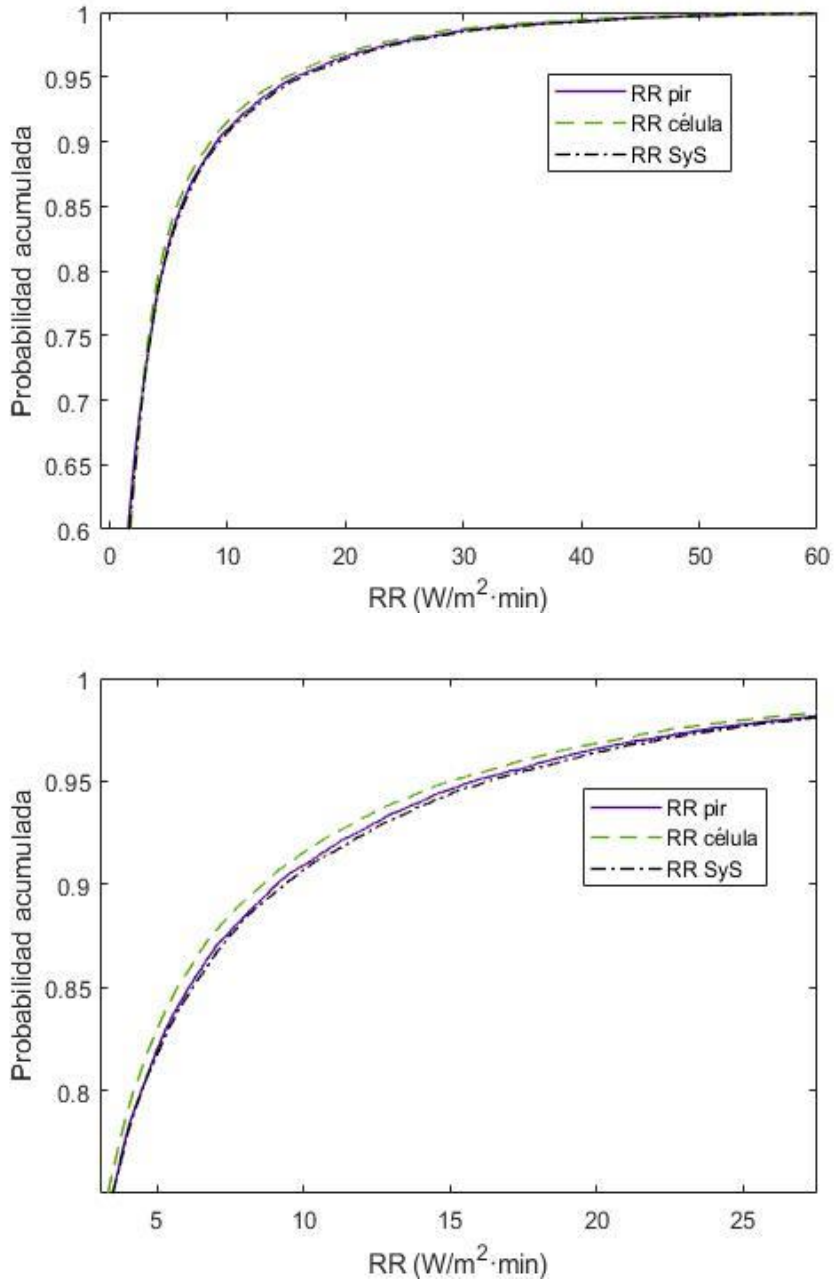


Ilustración B-9. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo cel-pir de Sevilla. Estación 1, año 2016.

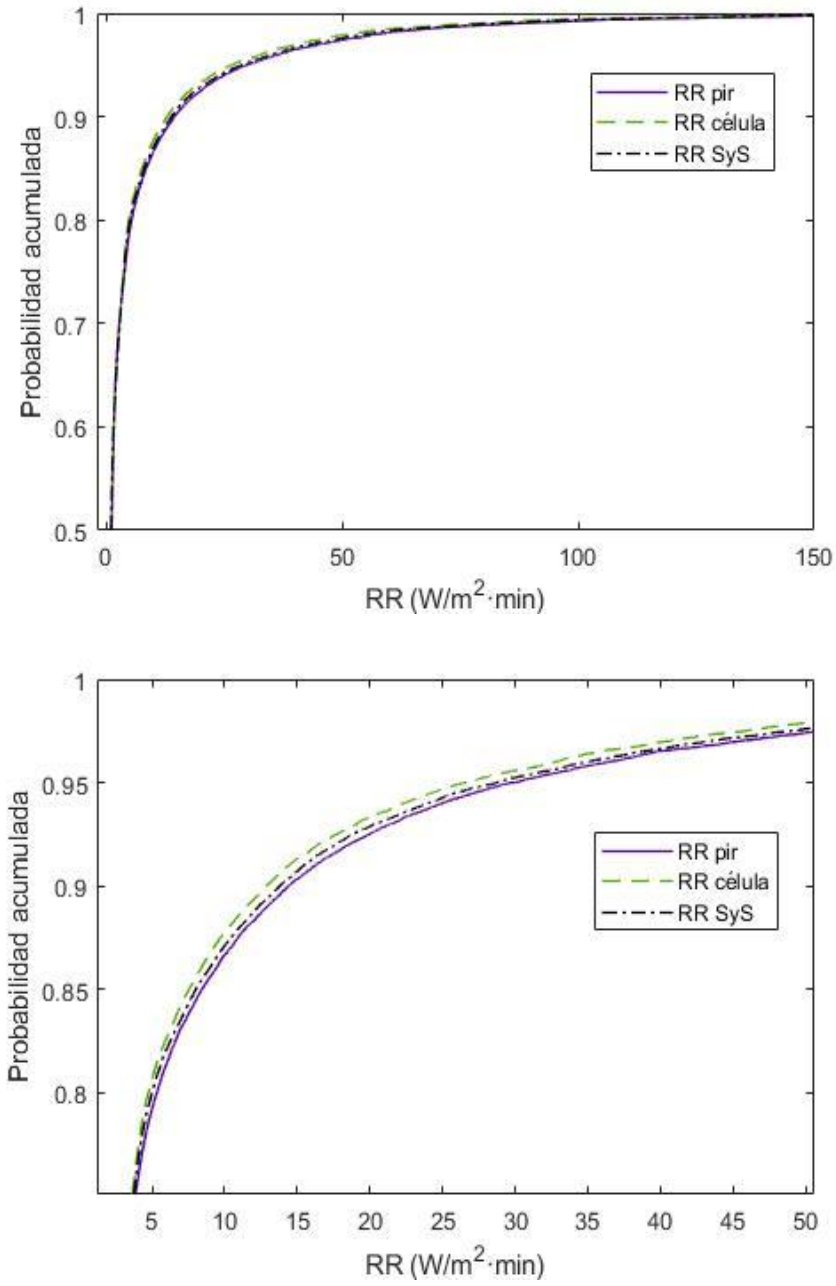


Ilustración B-10. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo cel-pir de Sevilla. Estación 2, año 2016.

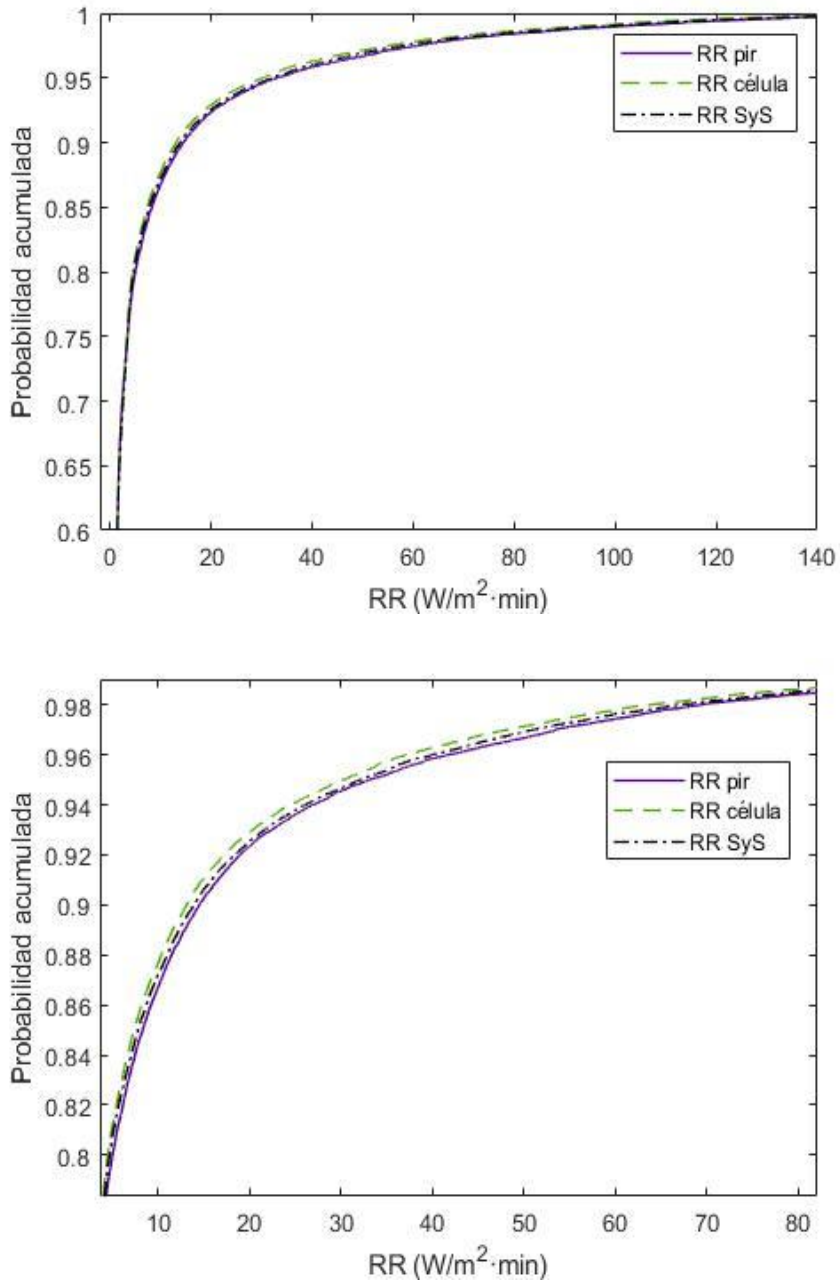


Ilustración B-11. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo cel-pir de Sevilla. Estación 2, año 2017.

- Estación de EE. UU.

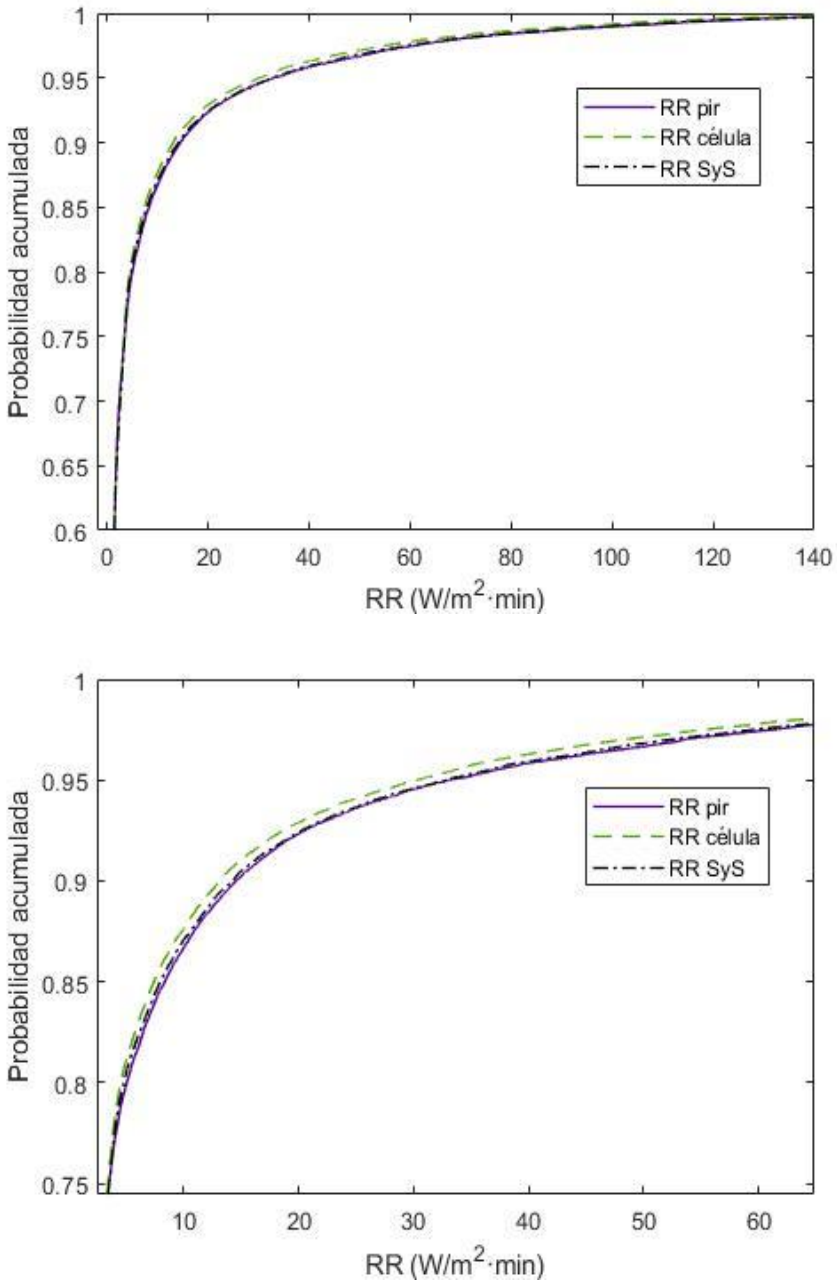


Ilustración B-12. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo cel-pir de EE. UU. Estación 2, año 2017.

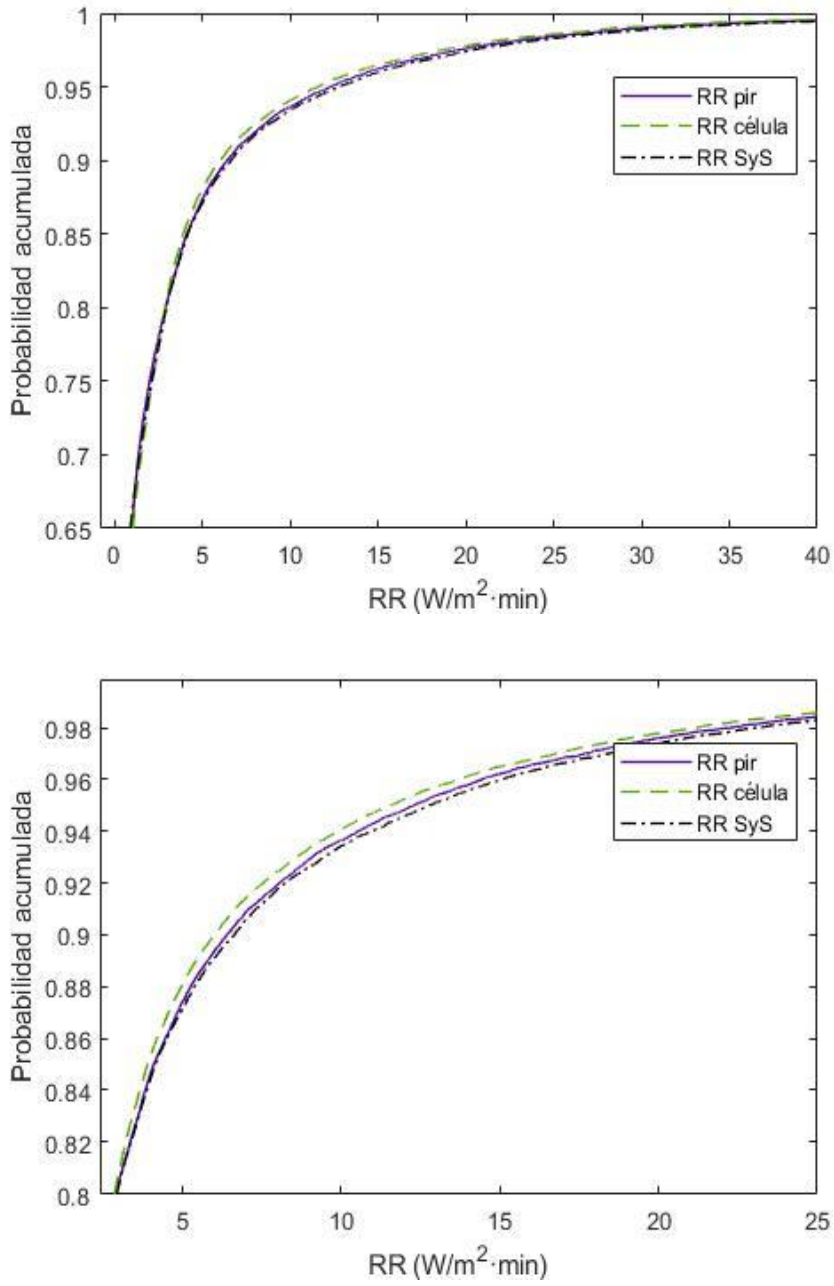


Ilustración B-13. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo cel-pir de EE. UU. Estación 1, año 2016.

- Estación de Australia.

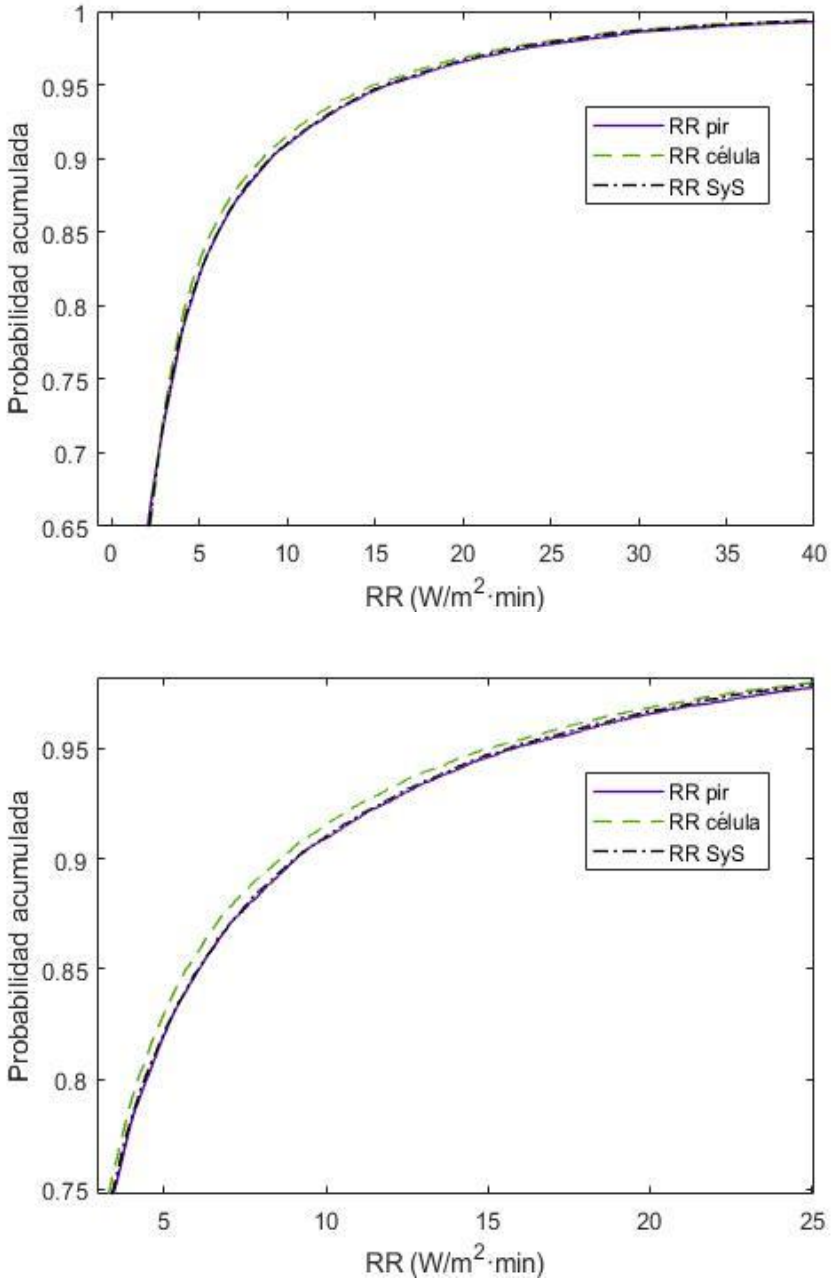


Ilustración B-14. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo cel-pir de Australia. Estación 1, año 2016.

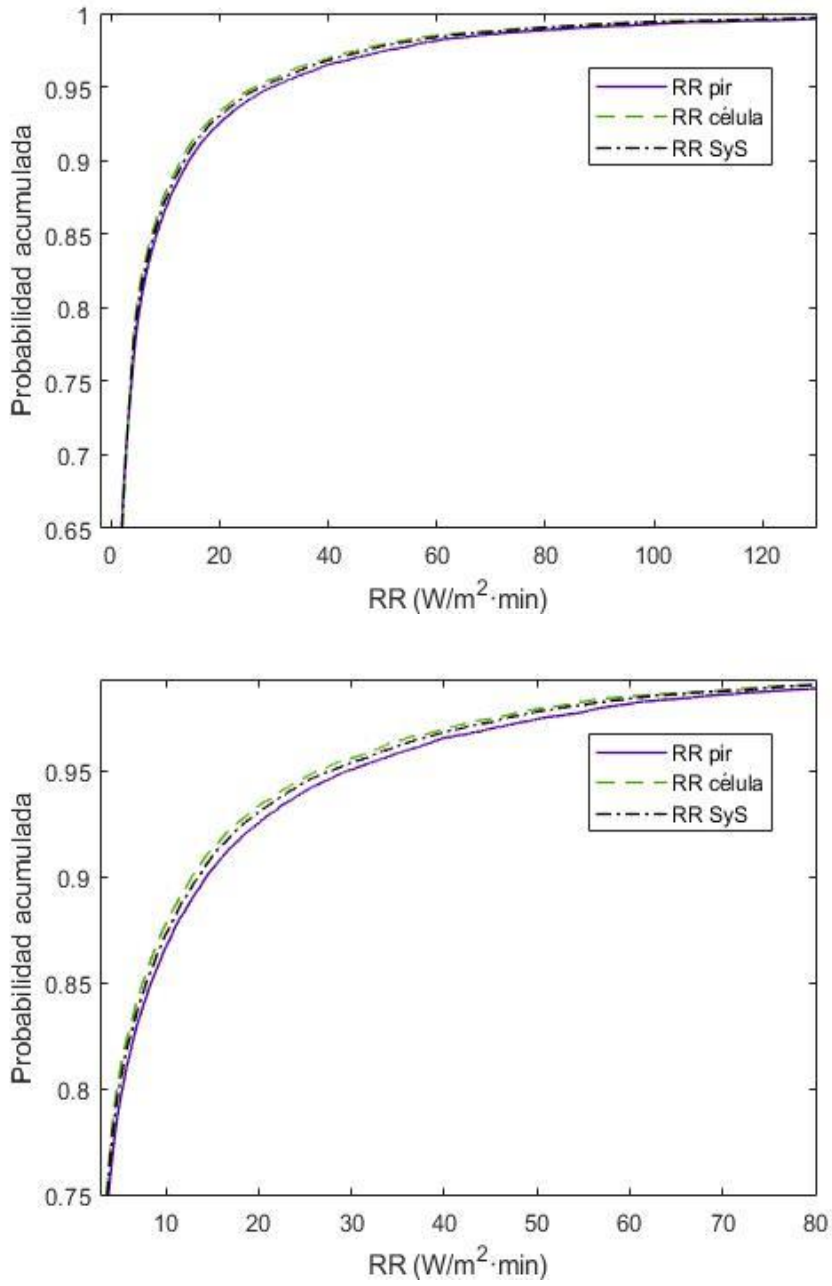


Ilustración B-15. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo cel-pir de Australia. Estación 2, año 2016.

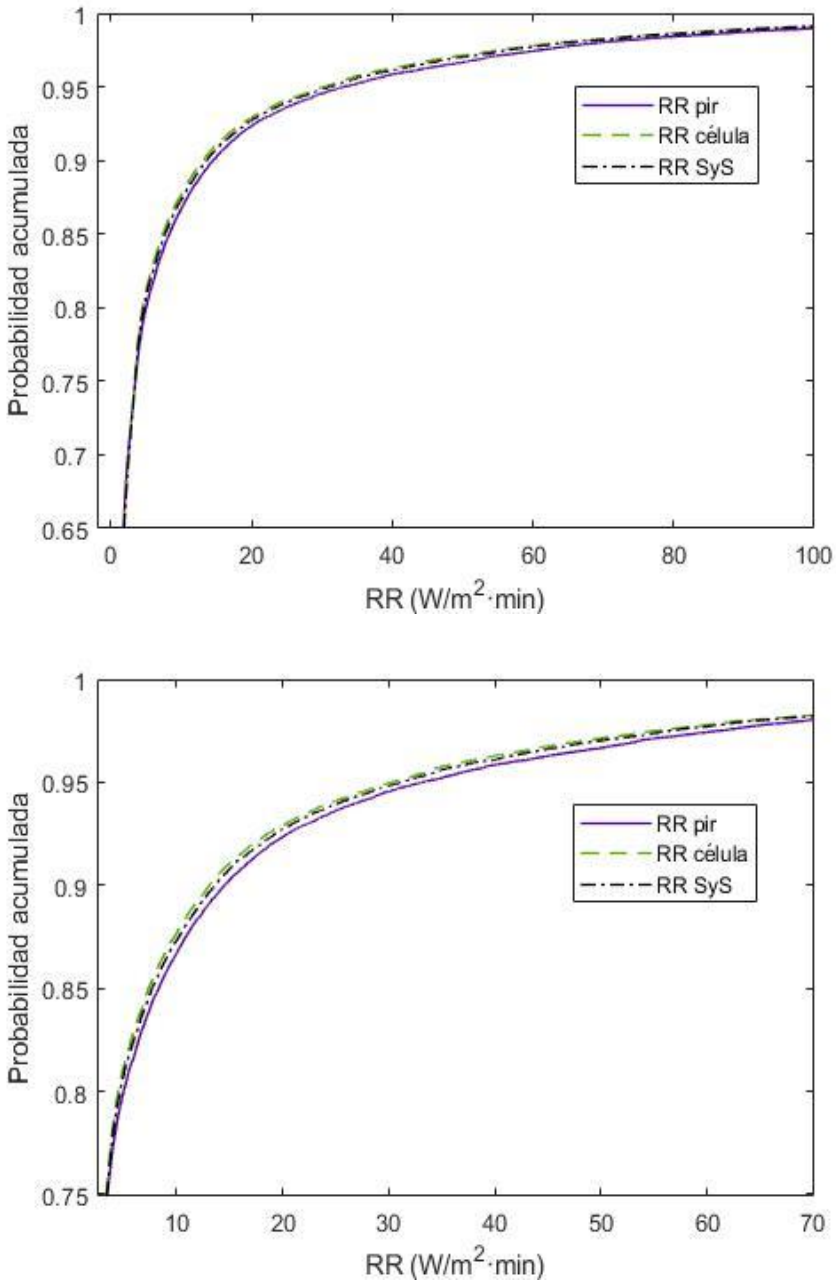


Ilustración B-16. Gráficas de probabilidad acumulada de los valores de RR. Modelo cel-pir de Australia. Estación 2, año 2017.

- Conclusiones.

En los modelos piranómetro-célula, se observa que los valores de RR que ocurren con mayor frecuencia de las series sintéticas calculadas son más cercanos a los de las células en comparación con los de los piranómetros. Estas mejoras suceden en todas las estaciones y años, confirmándose que los modelos proporcionan una mejor estimación de los valores de irradiancia medidos por las células.

Para los modelos contrarios, célula-piranómetro, el análisis es equivalente, ya que en todos los casos estudiados en las ilustraciones los RR con mayores probabilidades de las series sintéticas son los que más se aproximan a los de los piranómetros.

ANEXO C

En las siguientes ilustraciones se presentan las gráficas de los errores diarios y mensuales cometidos por los distintos modelos continuos **piranómetro-célula**, en comparación con los que aparecen cuando se utilizan directamente las medidas de los piranómetros, para las tres estaciones.

- Modelo de la estación del GTER, Sevilla.

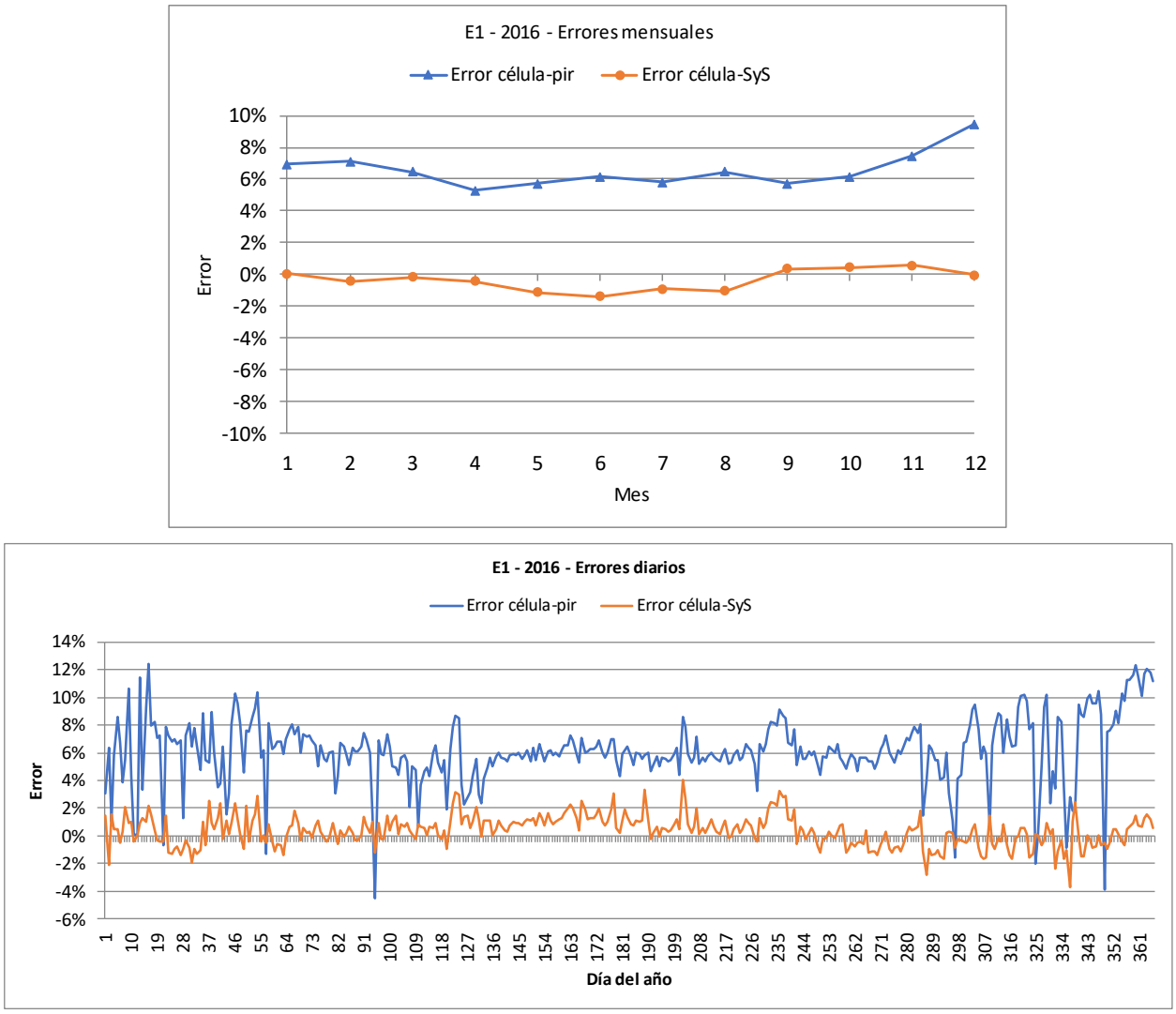
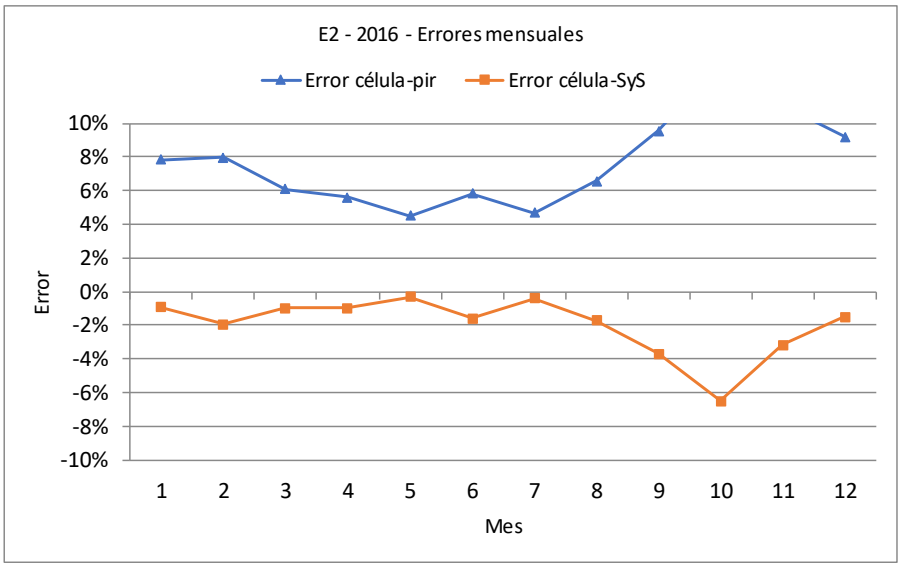


Ilustración C-1. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de Sevilla. Estación 1, año 2016.



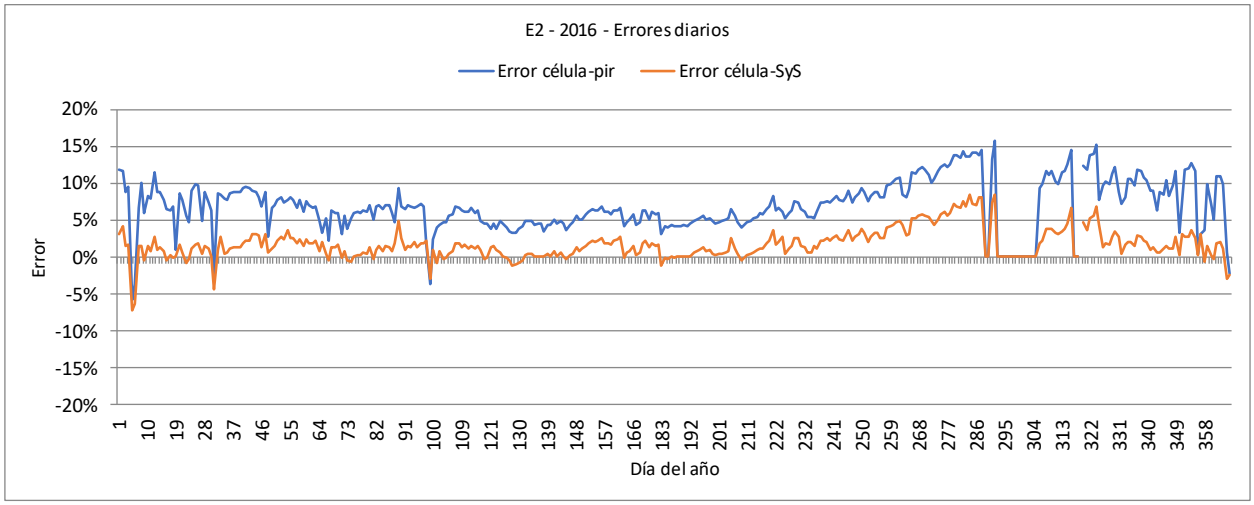
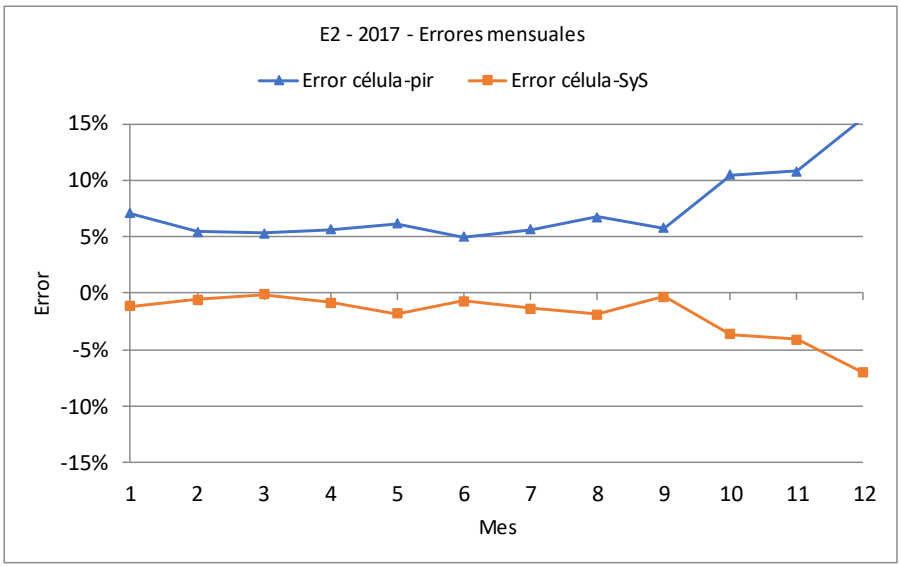


Ilustración C-2. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de Sevilla. Estación 2, año 2016.



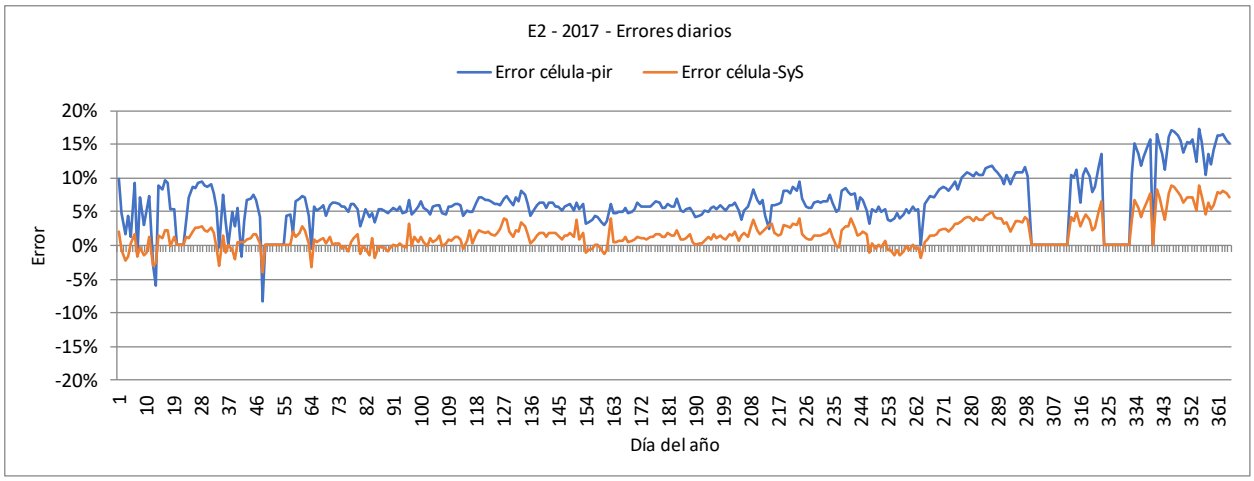
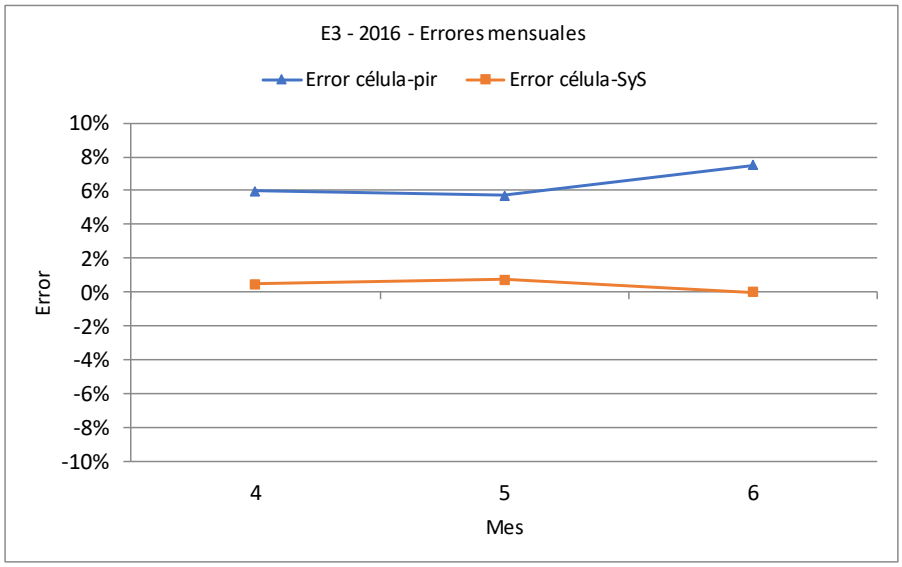


Ilustración C-3. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de Sevilla. Estación 2, año 2017.



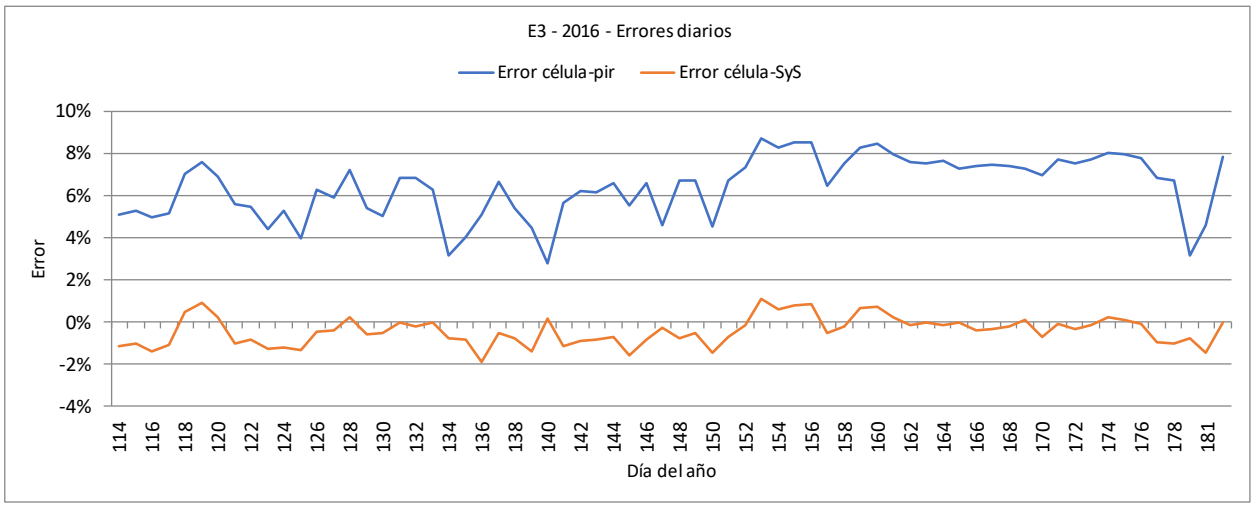
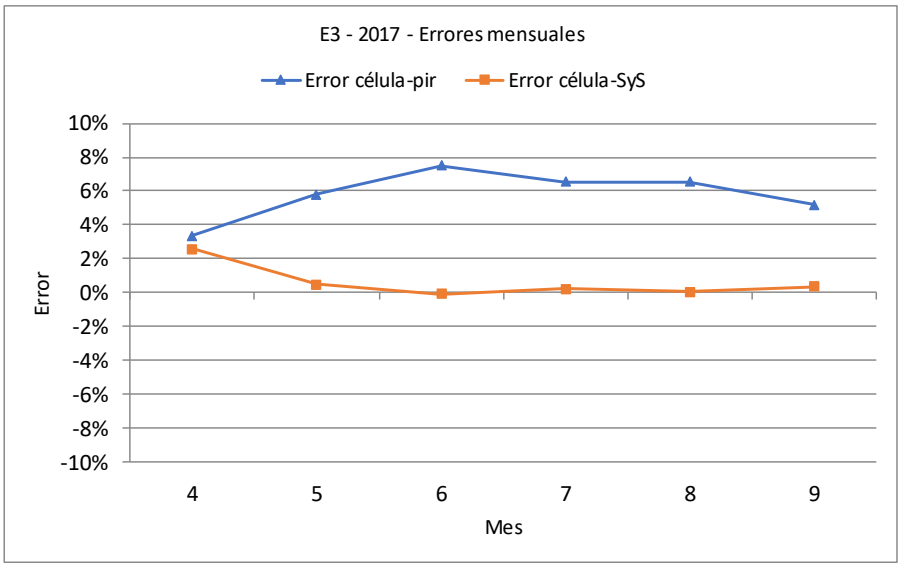


Ilustración C-4. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de Sevilla. Estación 3, año 2016.



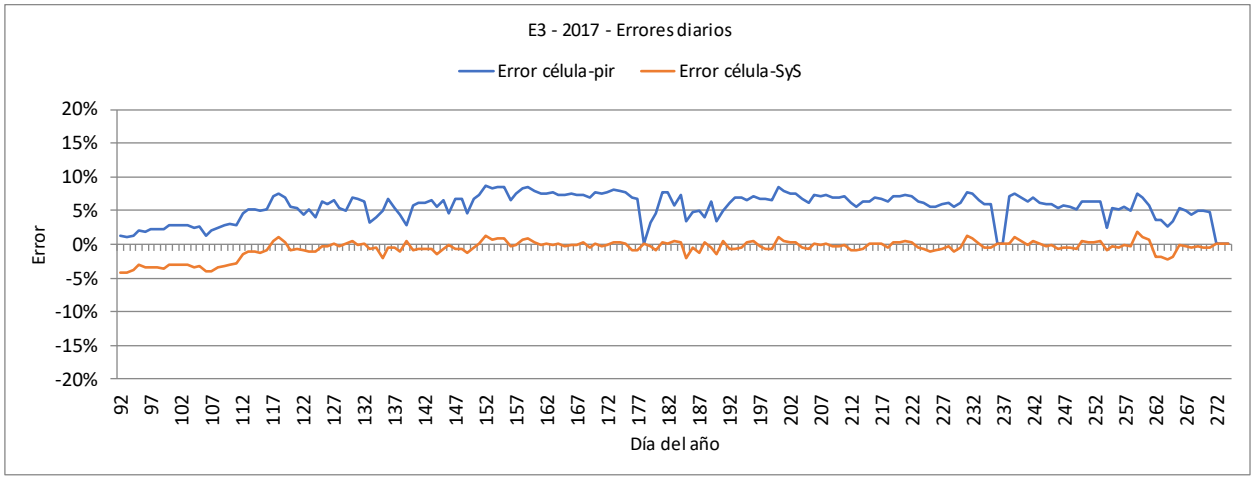
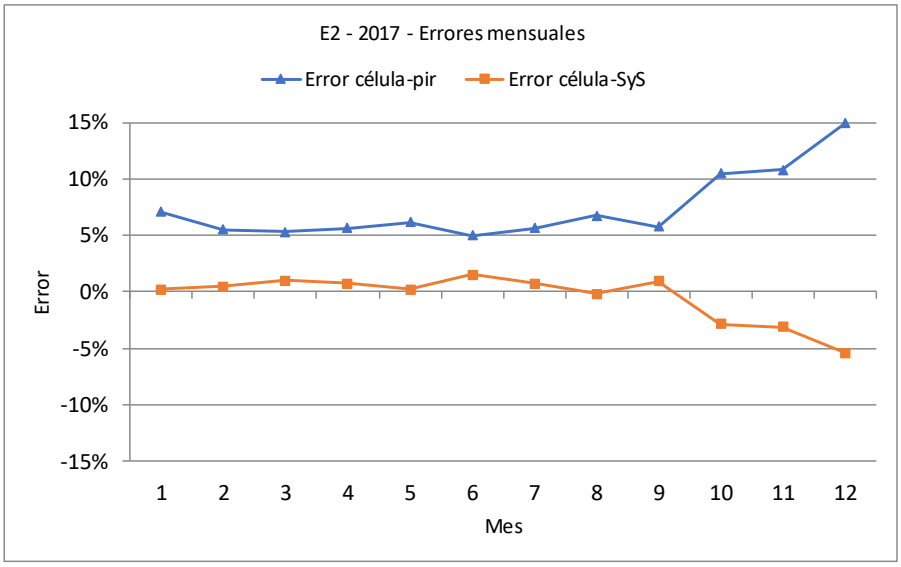


Ilustración C-5. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de Sevilla. Estación 3, año 2017.

- Modelo de la estación de EE. UU.



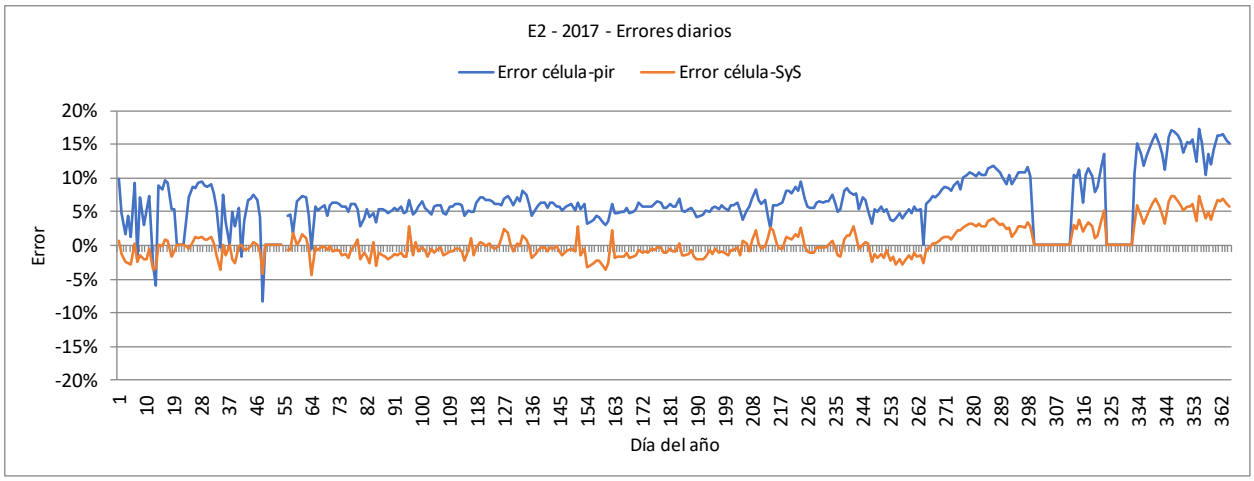
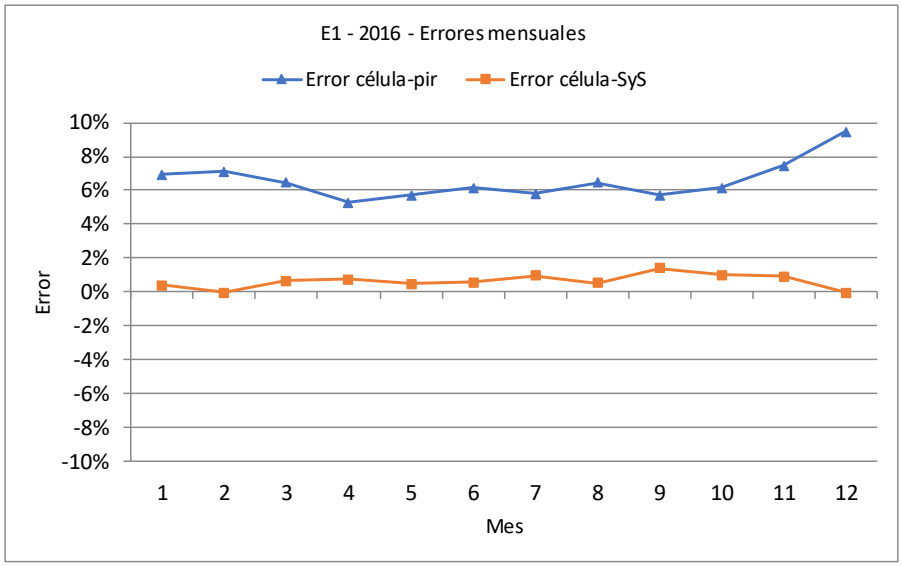


Ilustración C-6. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de EE. UU. Estación 2, año 2017.



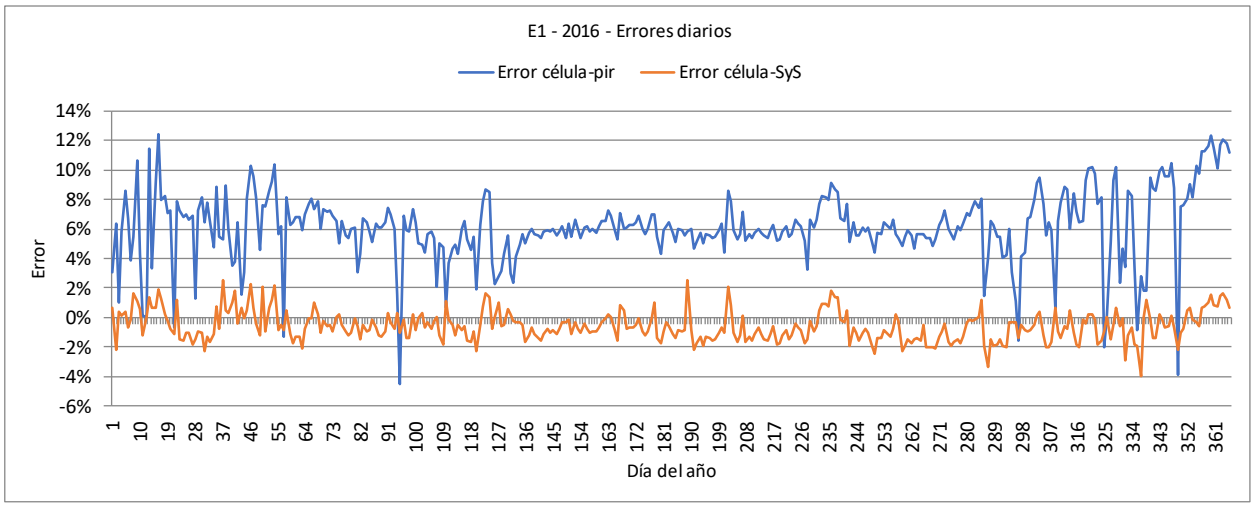
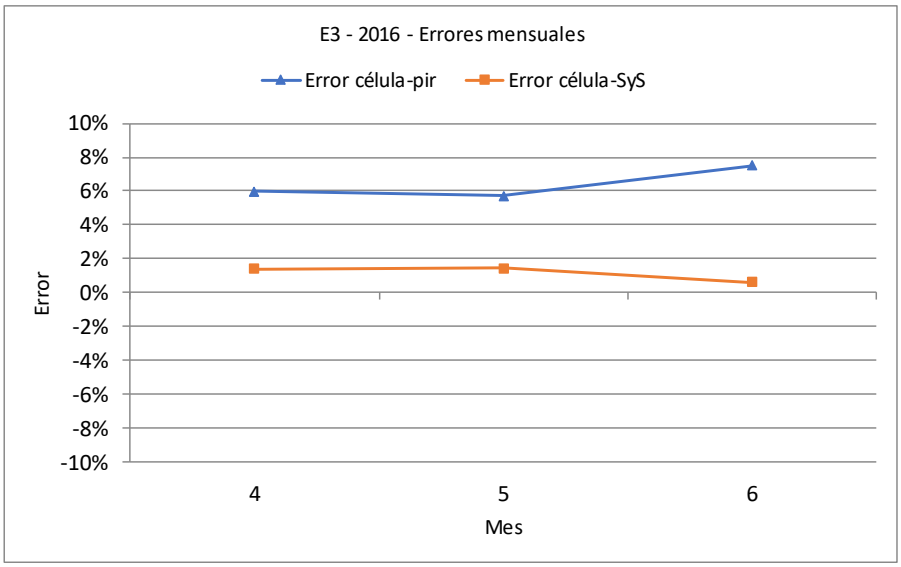


Ilustración C-7. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de EE. UU. Estación 1, año 2016.



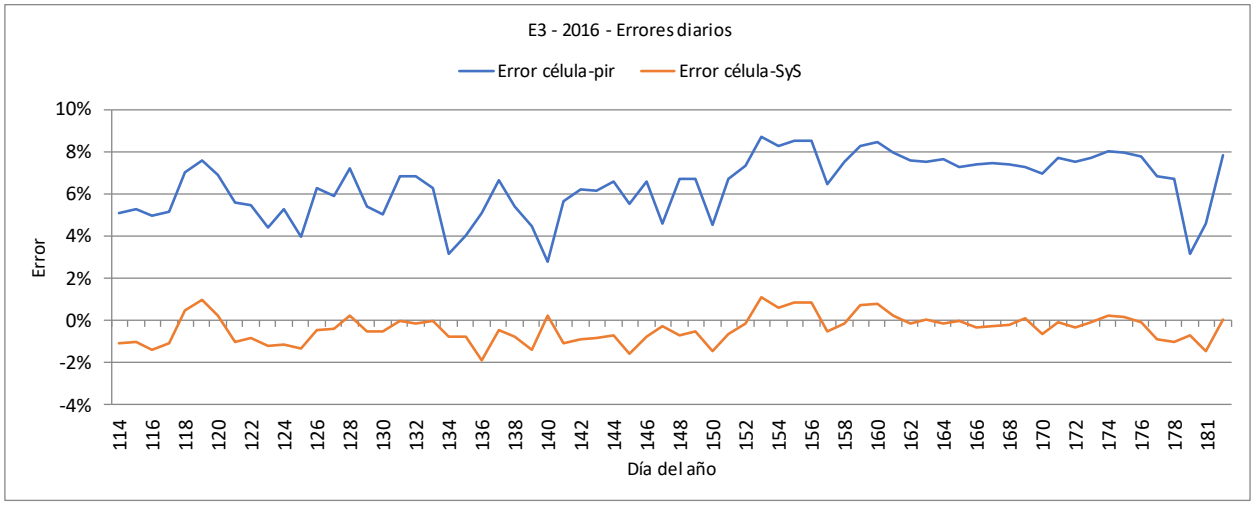
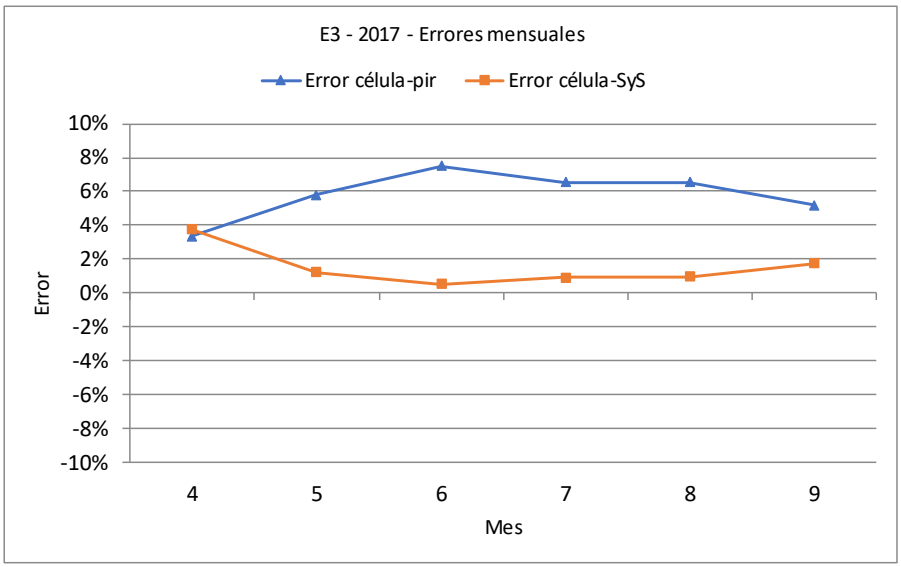


Ilustración C-8. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de EE. UU. Estación 3, año 2016.



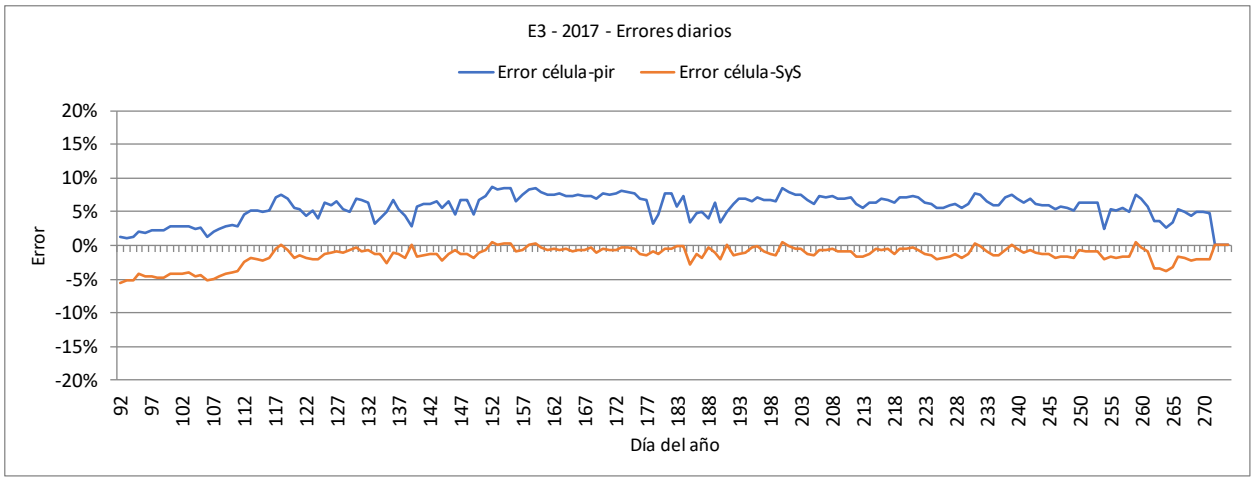
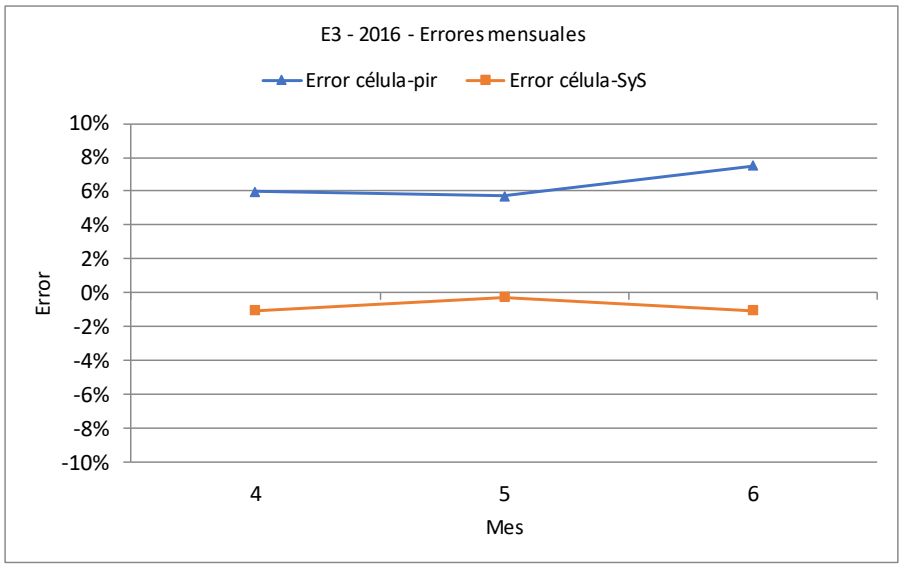


Ilustración C-9. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de EE. UU. Estación 3, año 2017.

- Modelo de la estación de Australia.



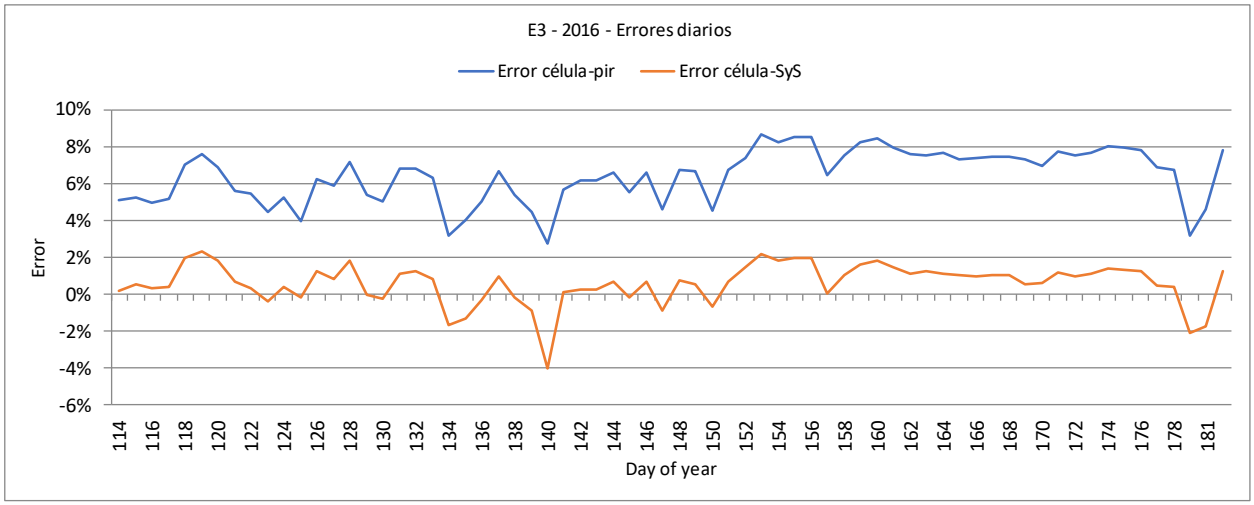
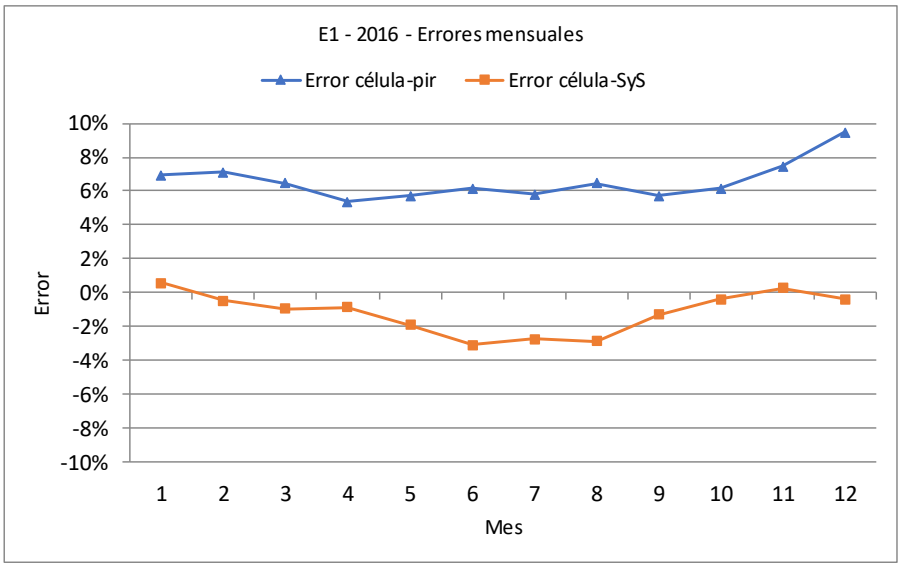


Ilustración C-10. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de Australia. Estación 3, año 2016.



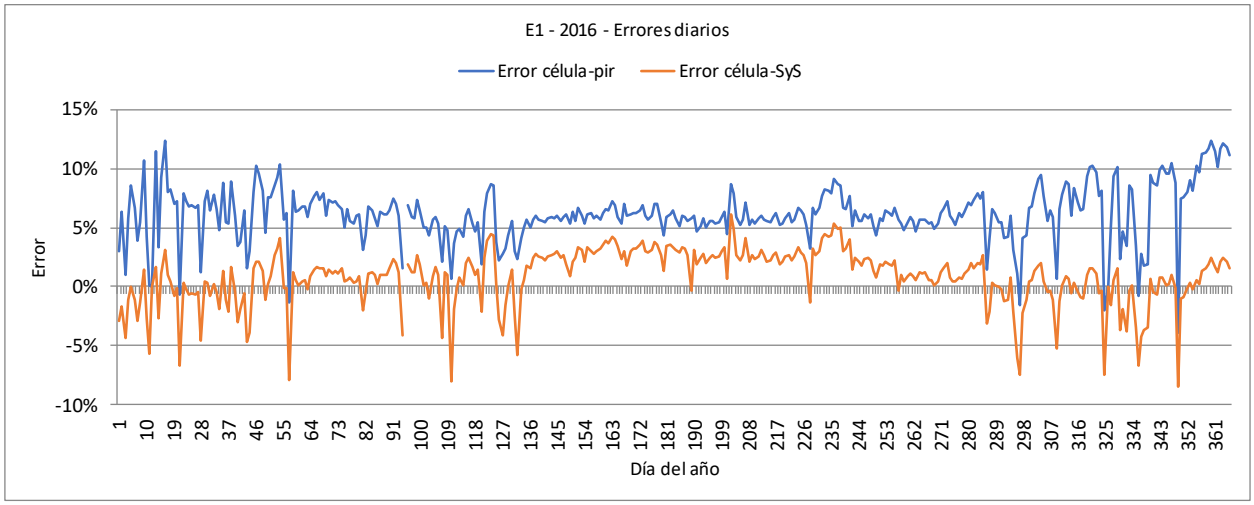
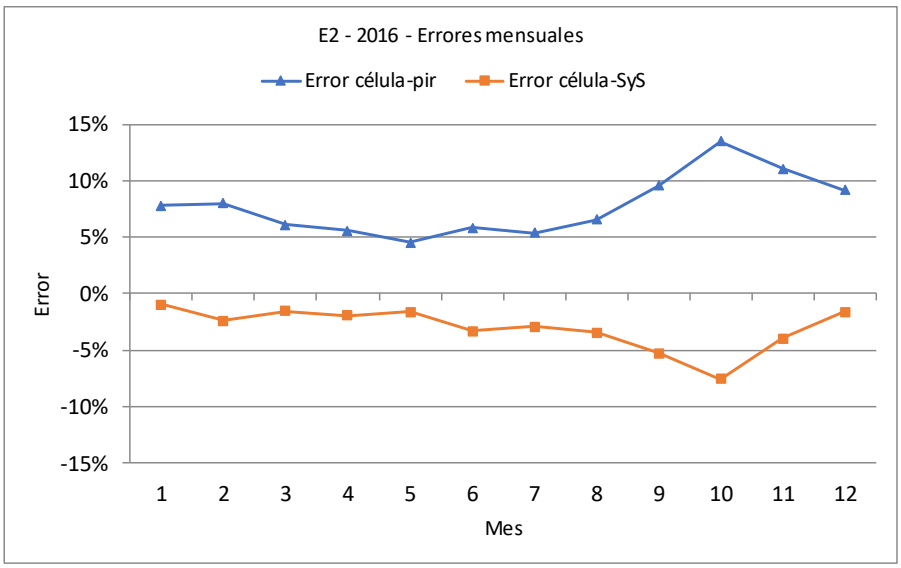


Ilustración C-11. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de Australia. Estación 1, año 2016.



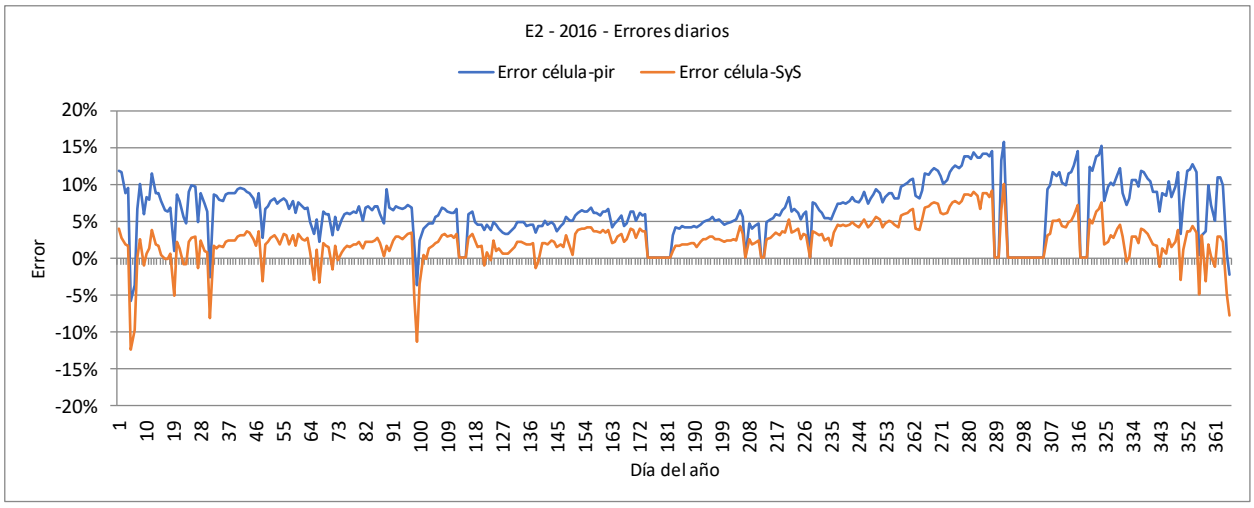
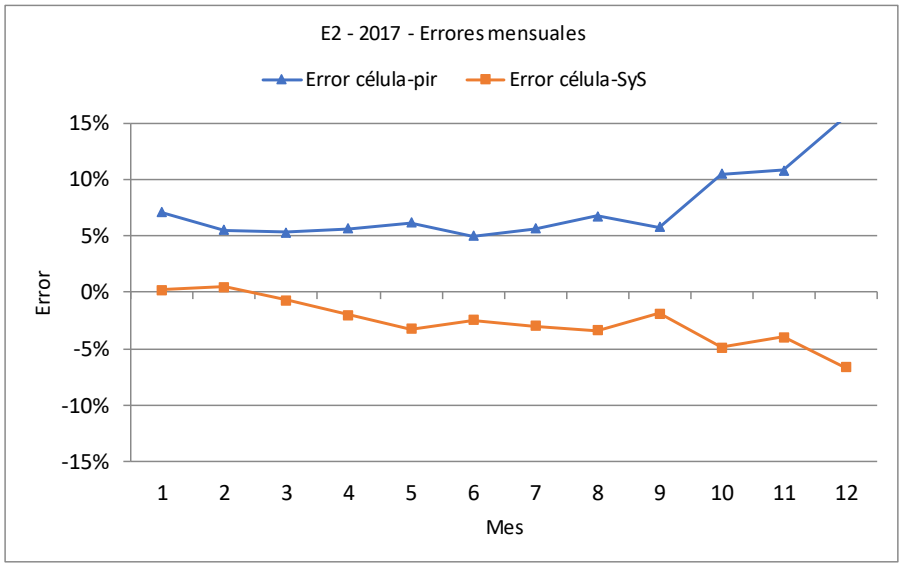


Ilustración C-12. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de Australia. Estación 2, año 2016.



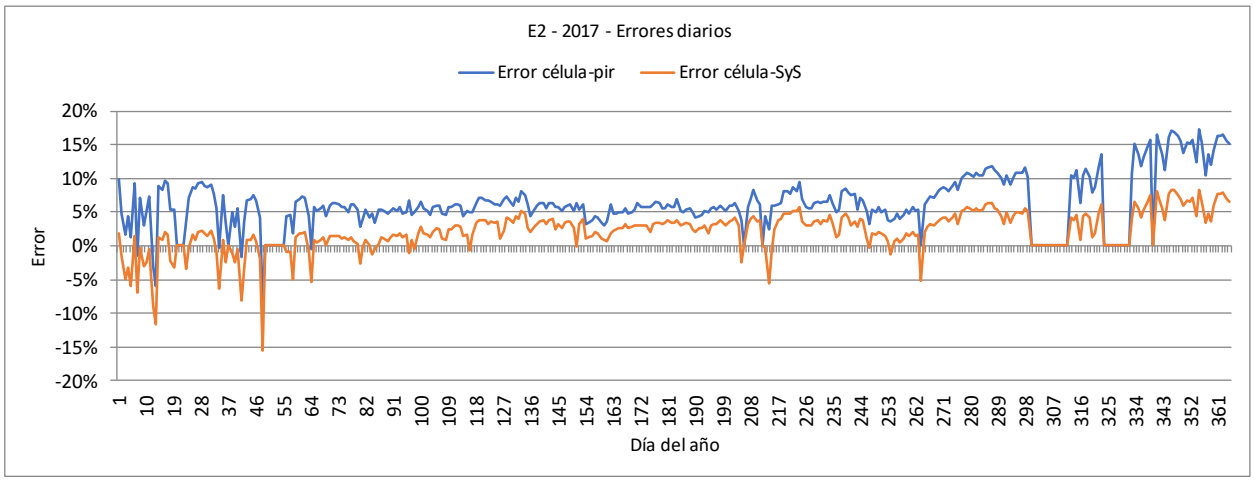


Ilustración C-13. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo pir-cel de Australia. Estación 2, año 2017.

ANEXO D

A continuación, se muestran las gráficas de los errores diarios y mensuales cometidos por los distintos modelos **célula-piranómetro**, en comparación con los que aparecen cuando se utilizan directamente las medidas de las células, para las tres estaciones.

- Modelo de la estación del GTER, Sevilla.

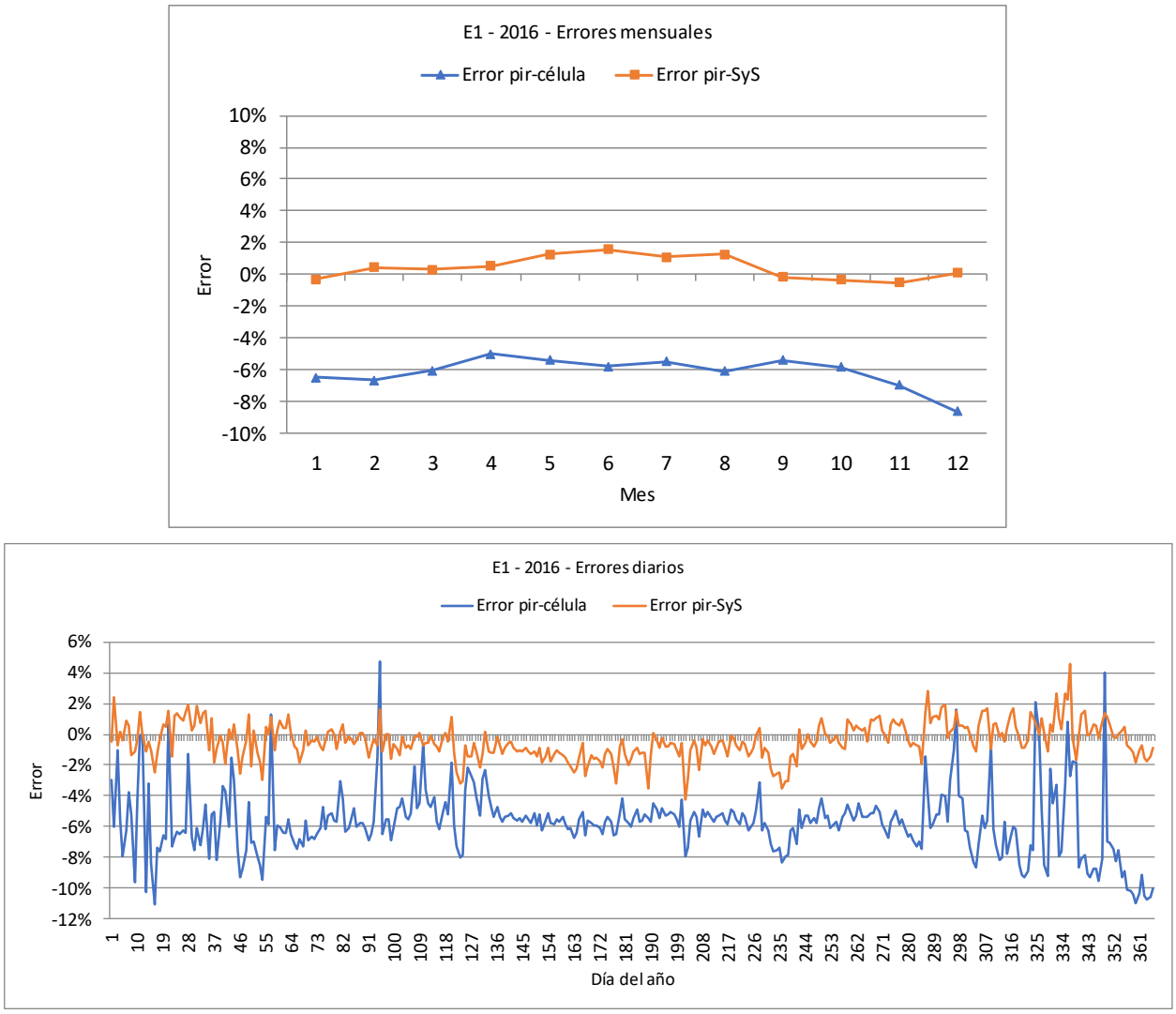
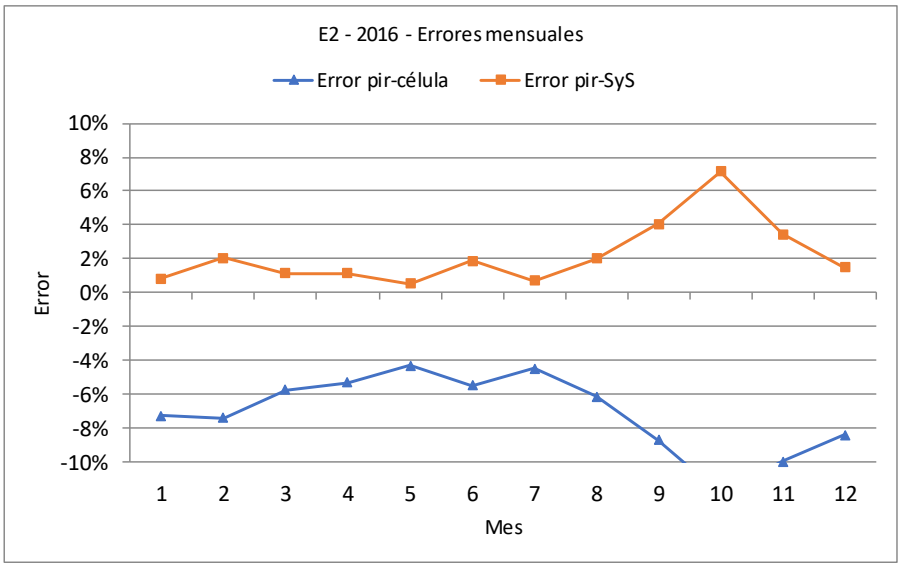


Ilustración D-1. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de Sevilla. Estación 1, año 2016.



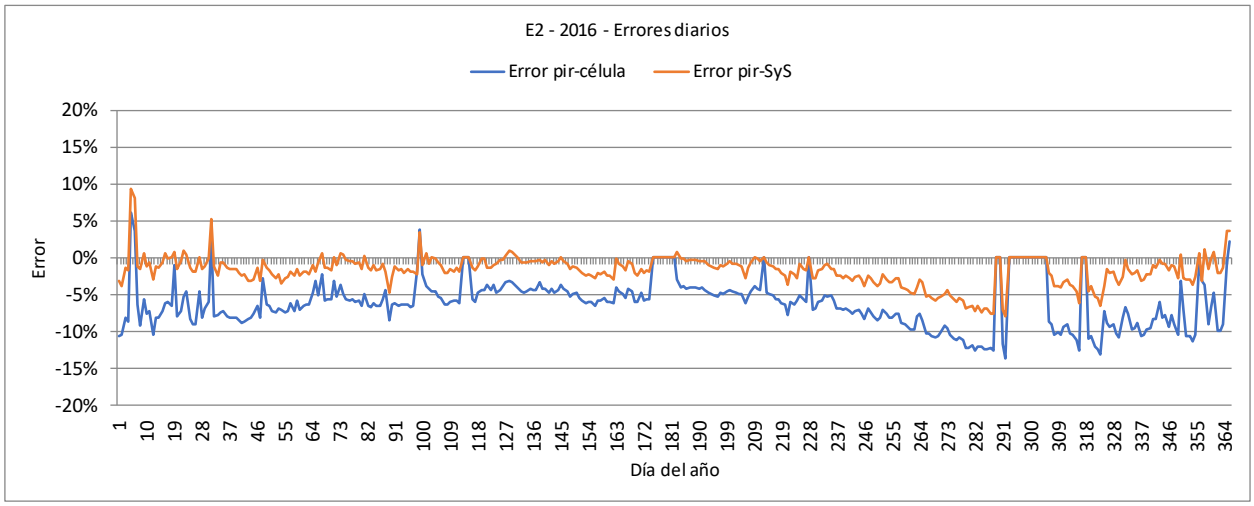
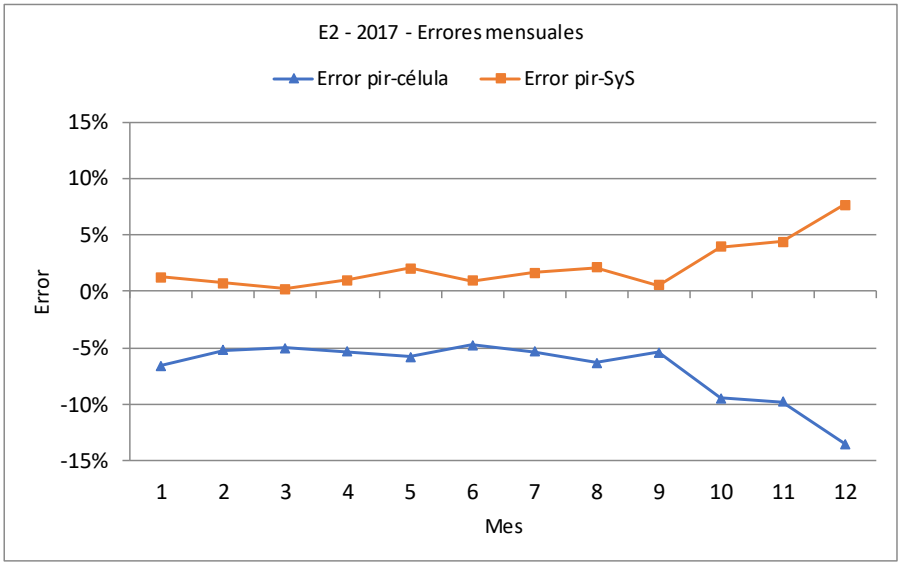


Ilustración D-2. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de Sevilla. Estación 2, año 2016.



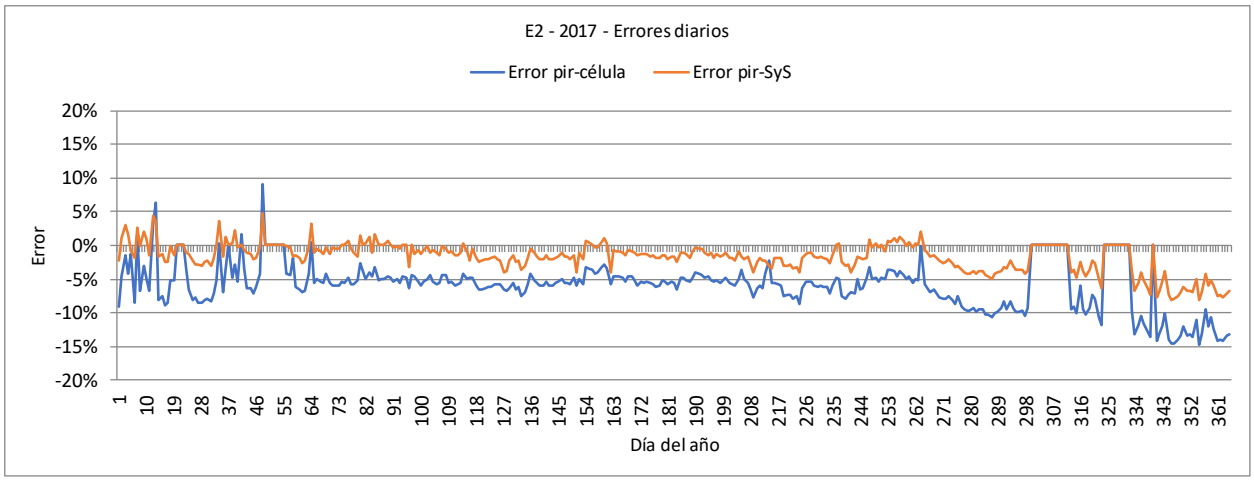
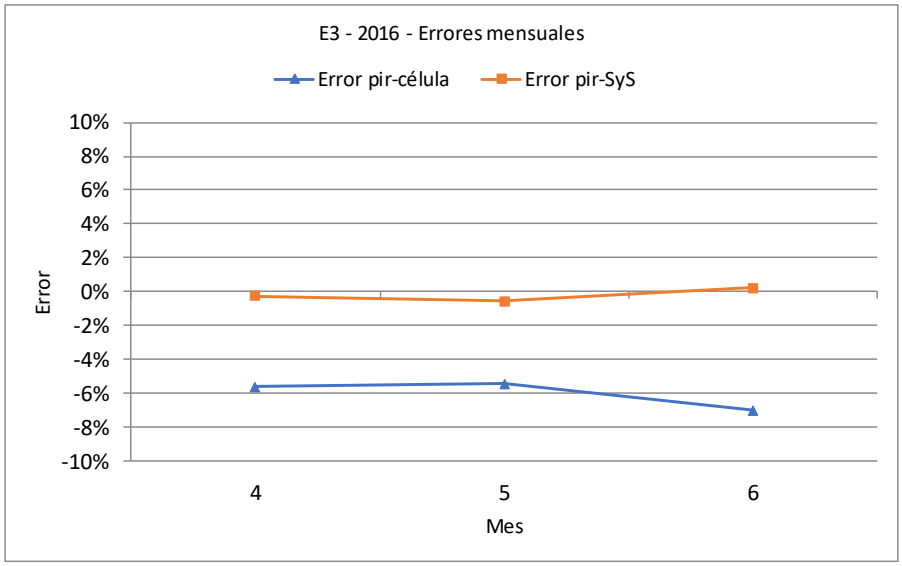


Ilustración D-3. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de Sevilla. Estación 2, año 2017.



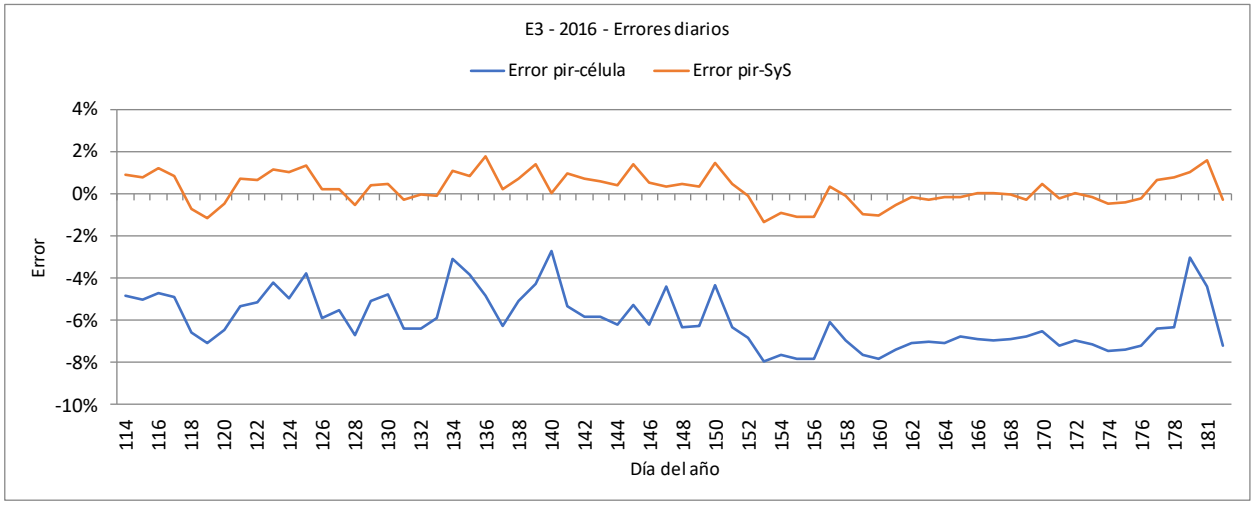
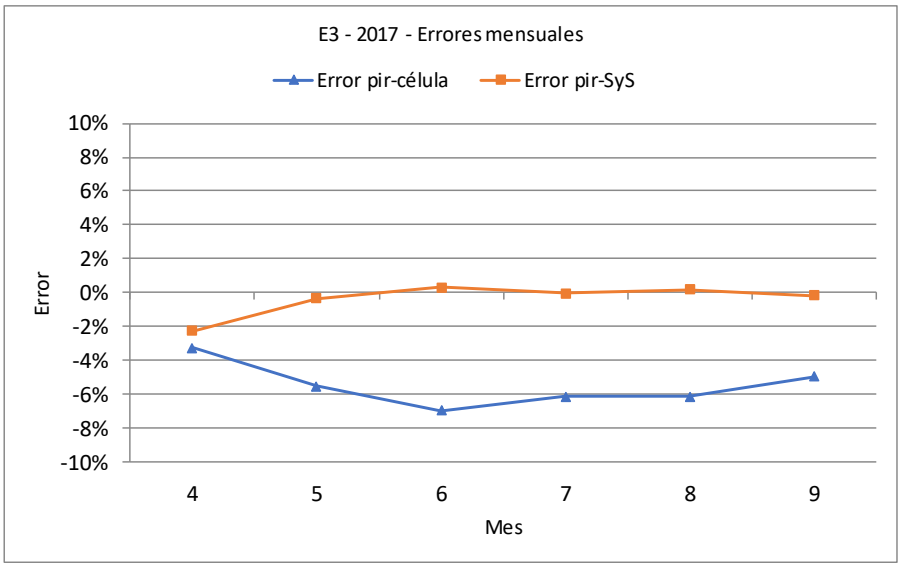


Ilustración D-4. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de Sevilla. Estación 3, año 2016.



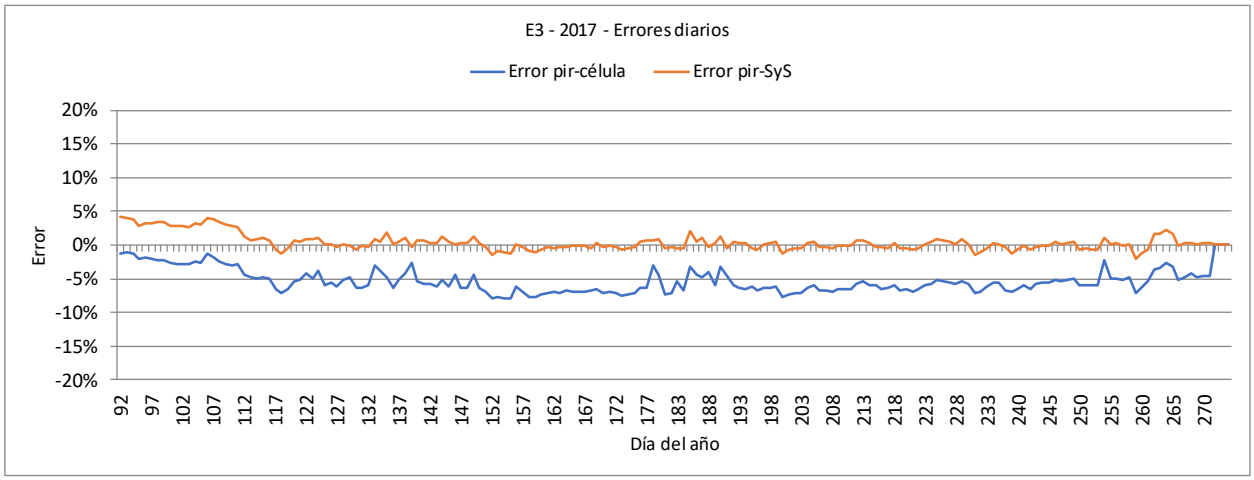
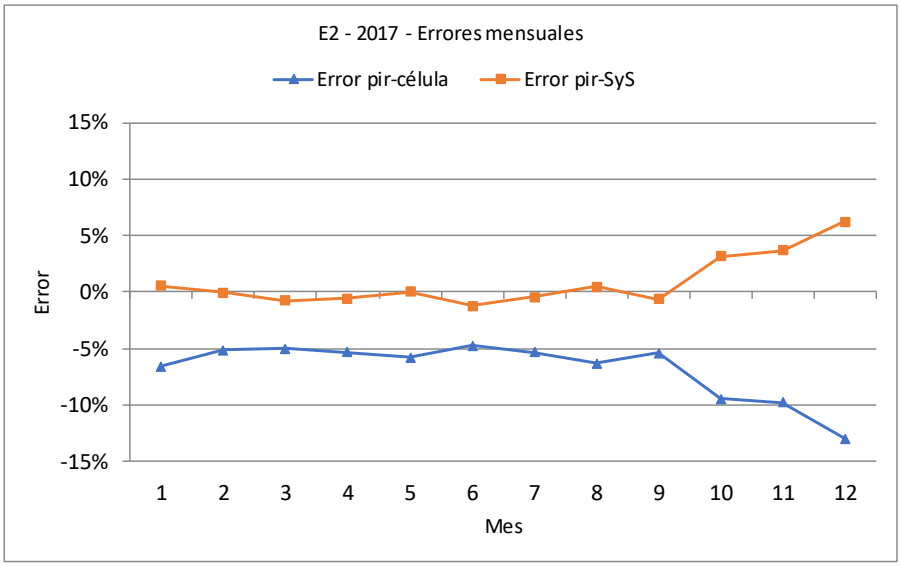


Ilustración D-5. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de Sevilla. Estación 3, año 2017.

- Modelo de la estación de EE. UU.



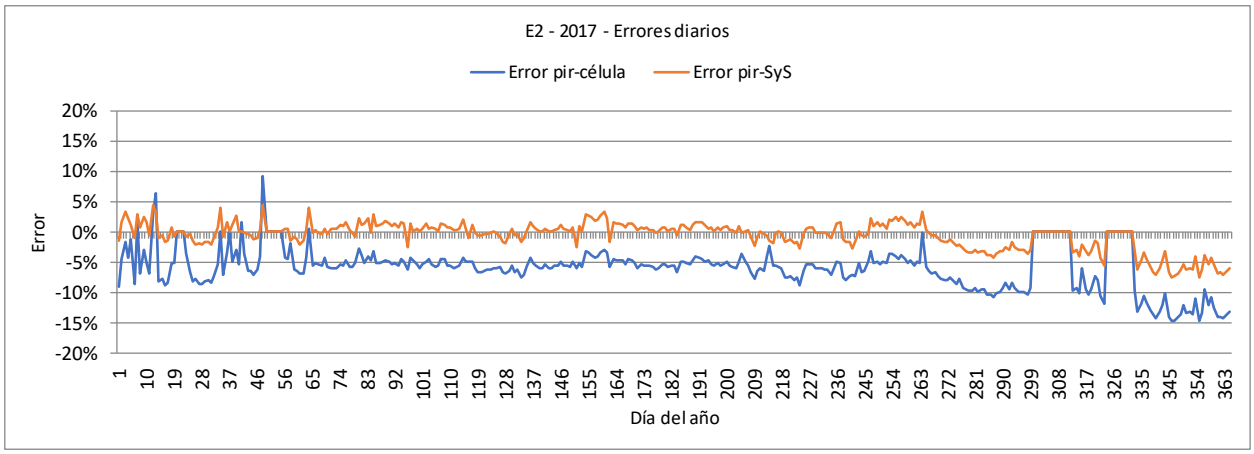
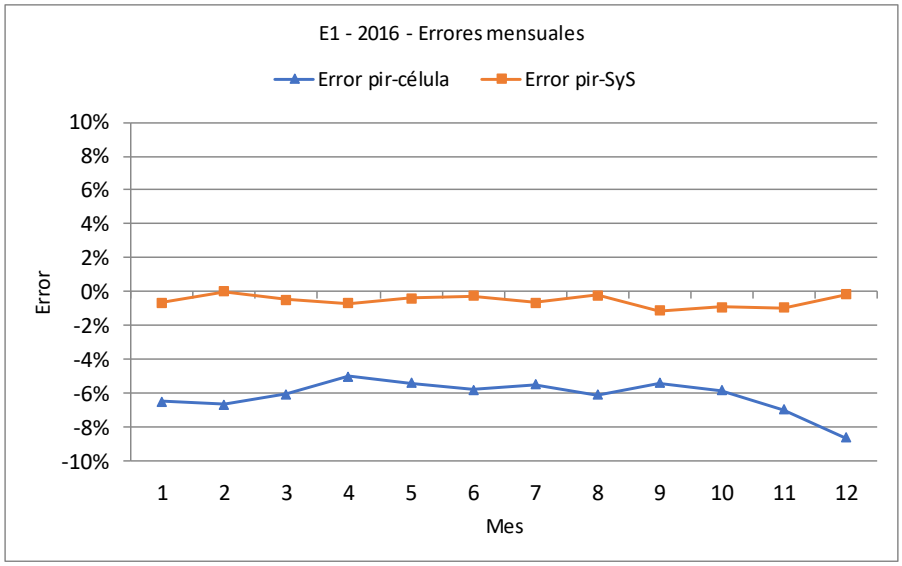


Ilustración D-6. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de EE. UU. Estación 2, año 2017.



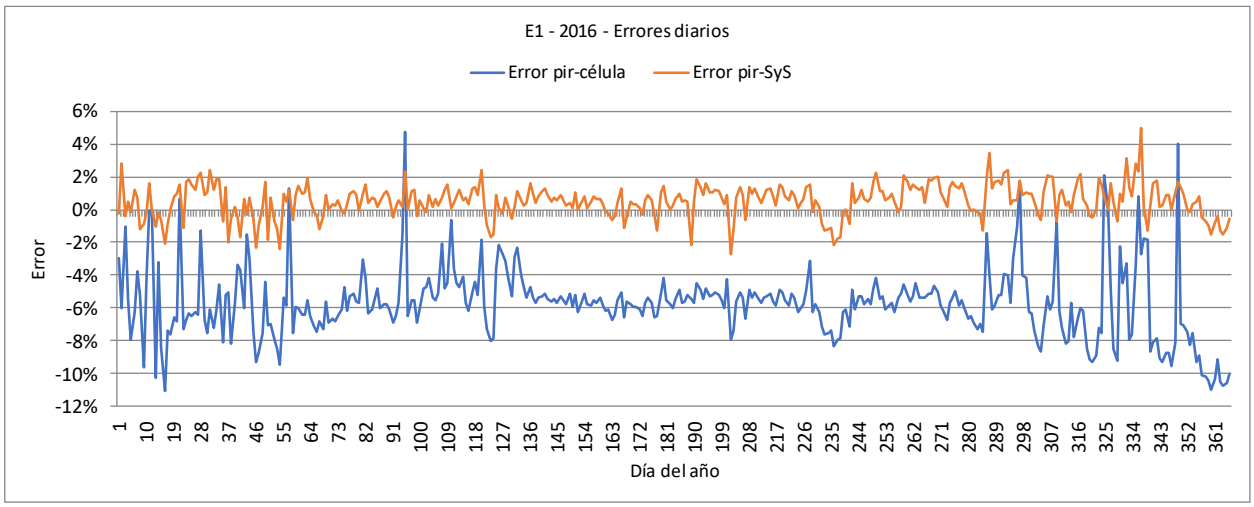
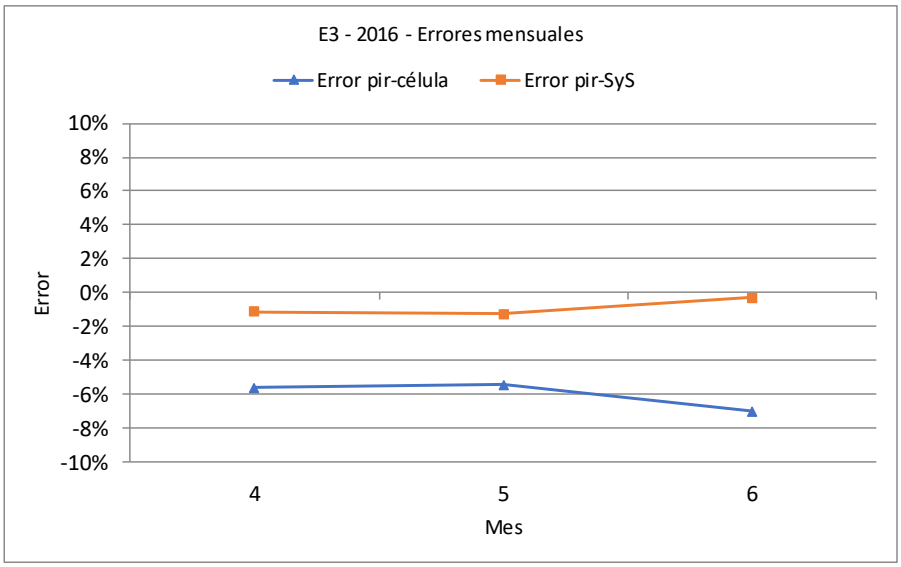


Ilustración D-7. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de EE. UU. Estación 1, año 2016.



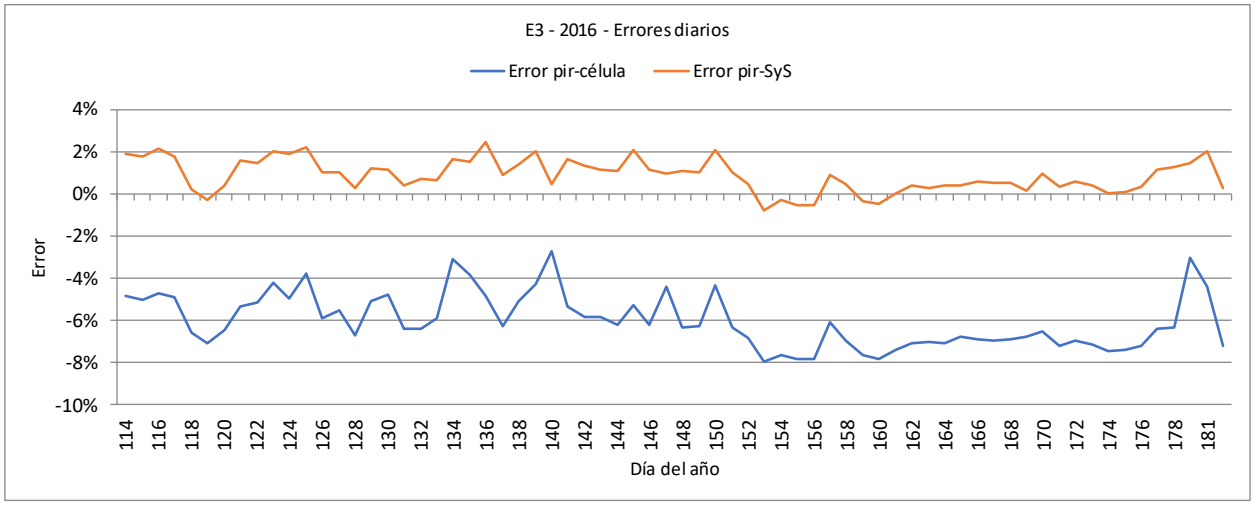
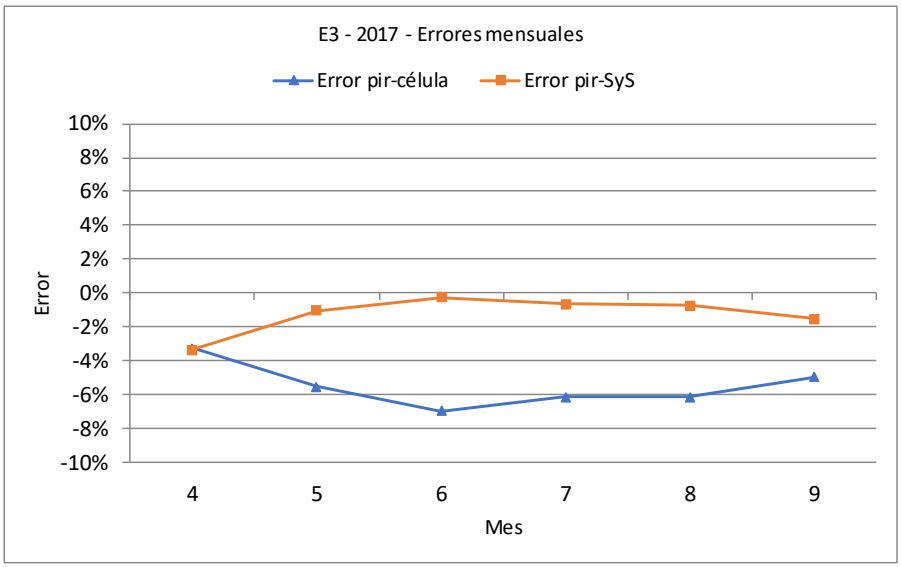


Ilustración D-8. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de EE. UU. Estación 3, año 2016.



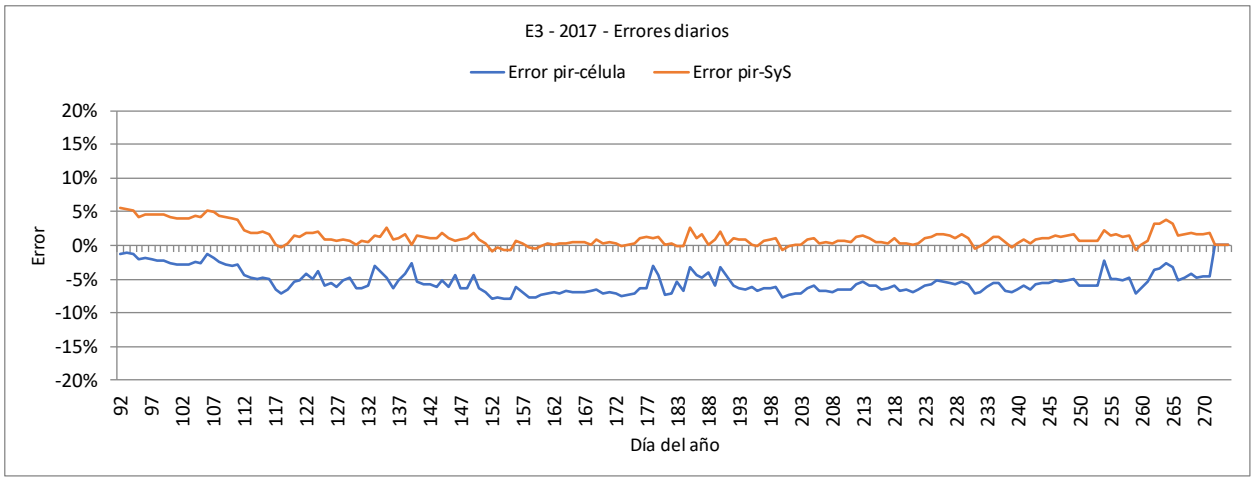
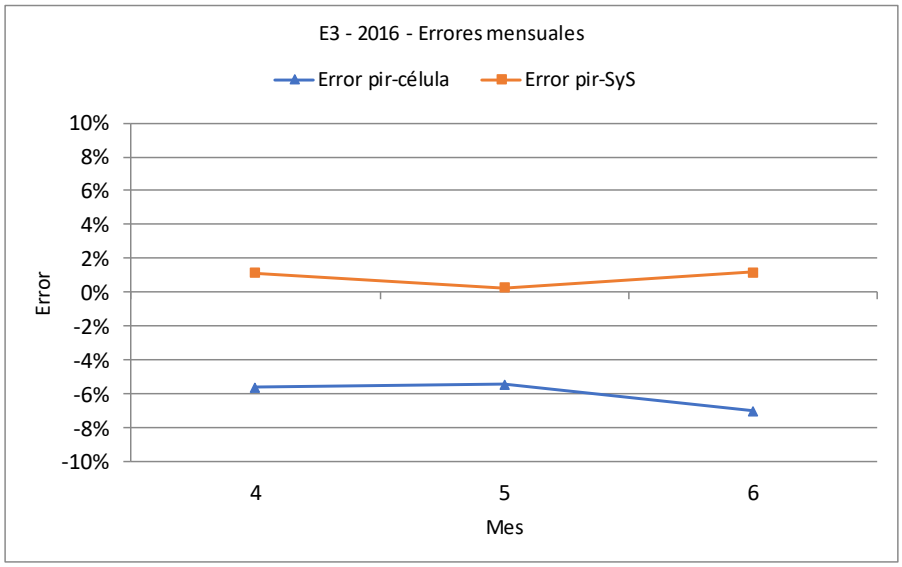


Ilustración D-9. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de EE. UU. Estación 3, año 2017.

- Modelo de la estación de Australia.



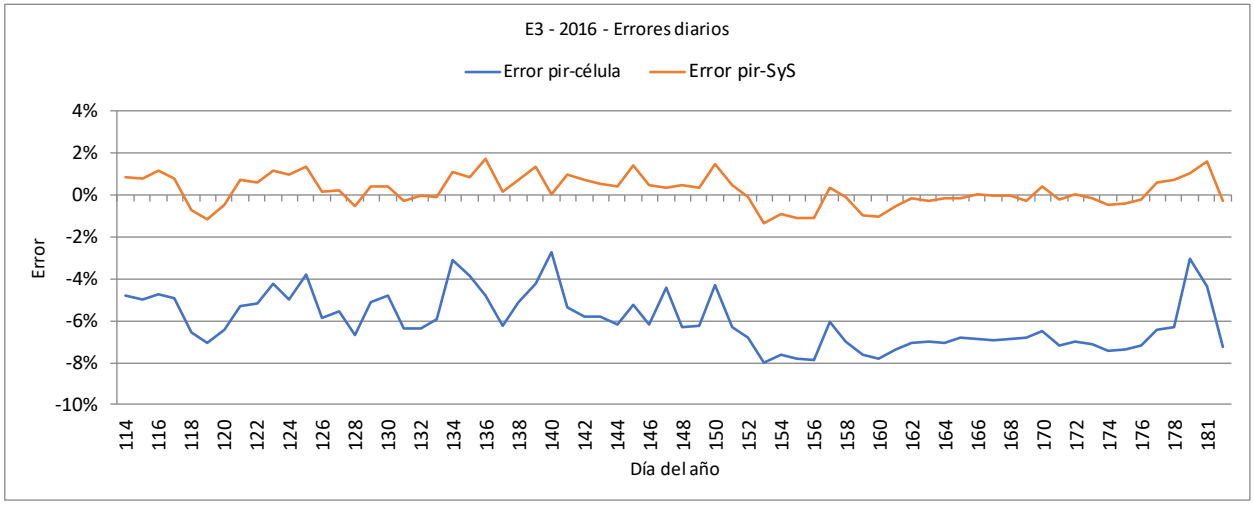
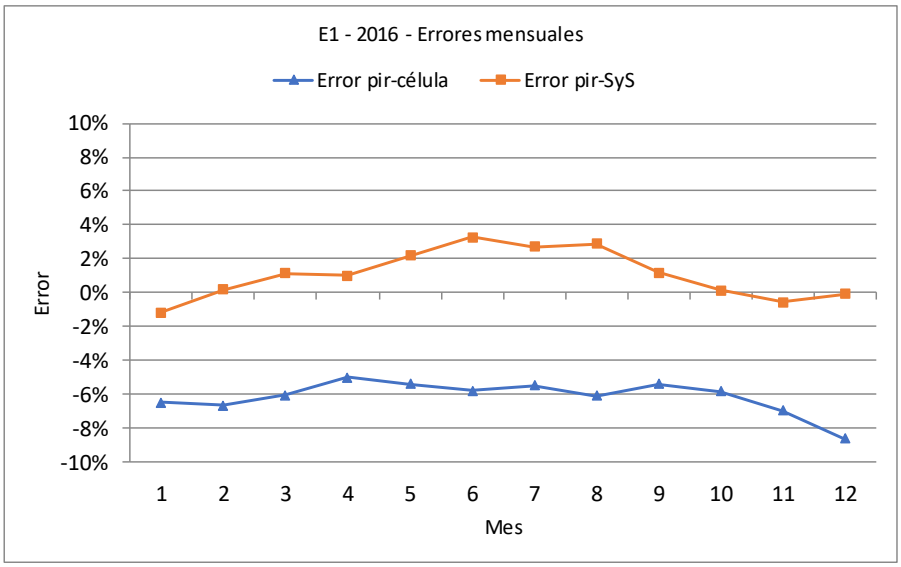


Ilustración D-10. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de Australia. Estación 3, año 2016.



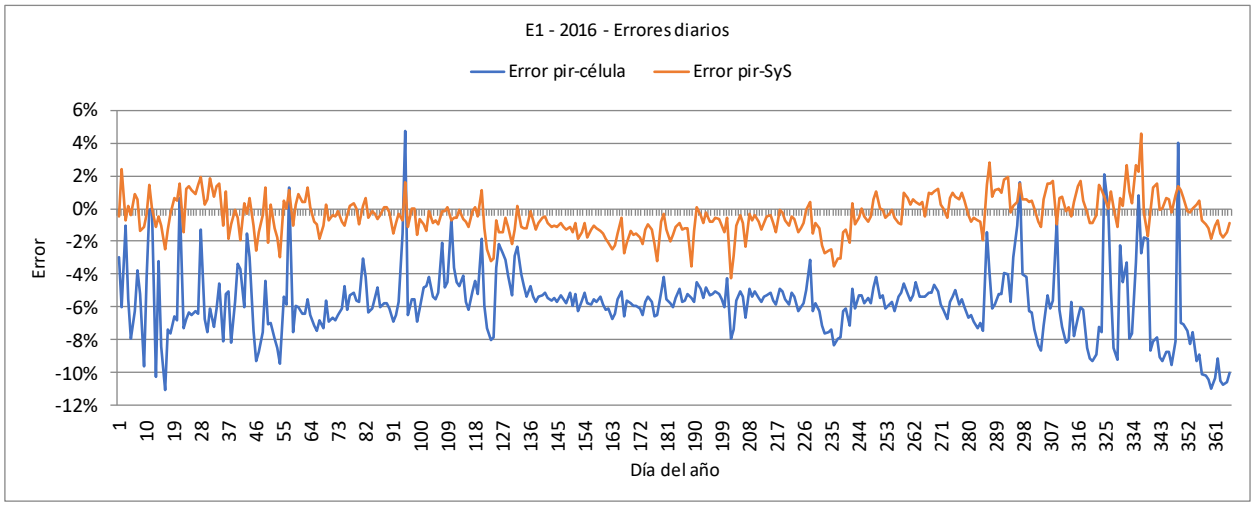
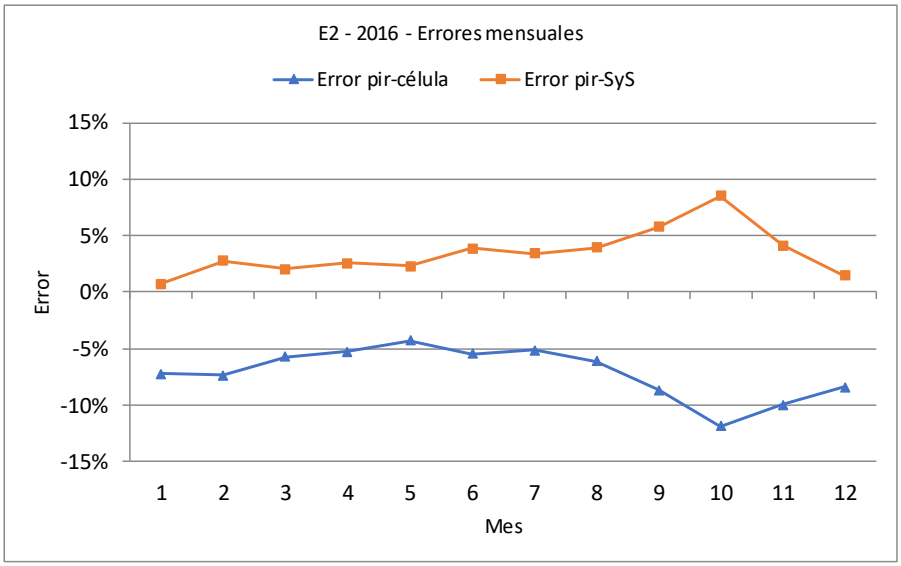


Ilustración D-11. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de Australia. Estación 1, año 2016.



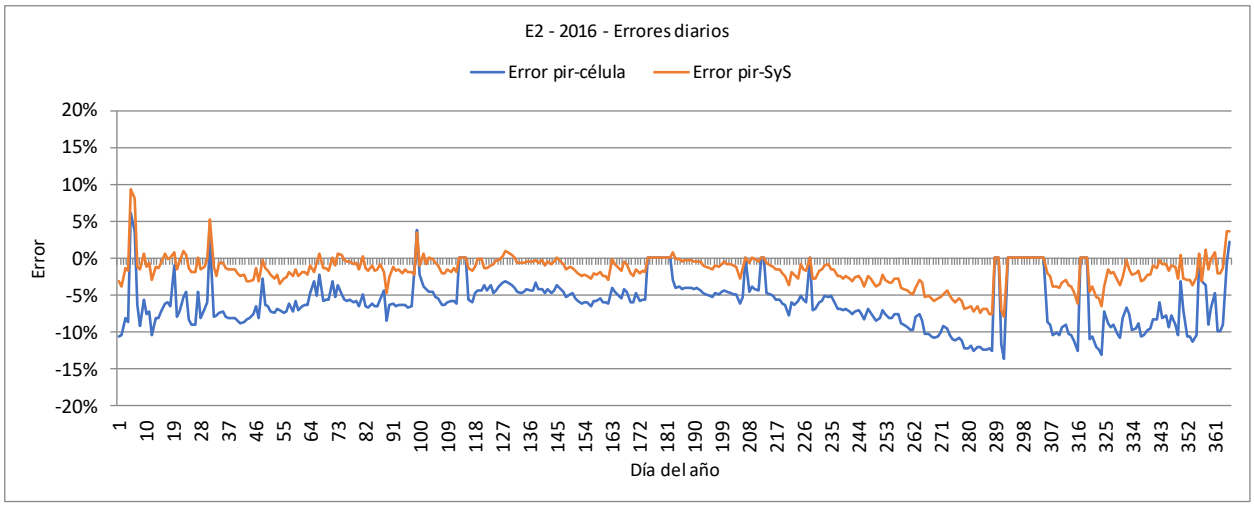
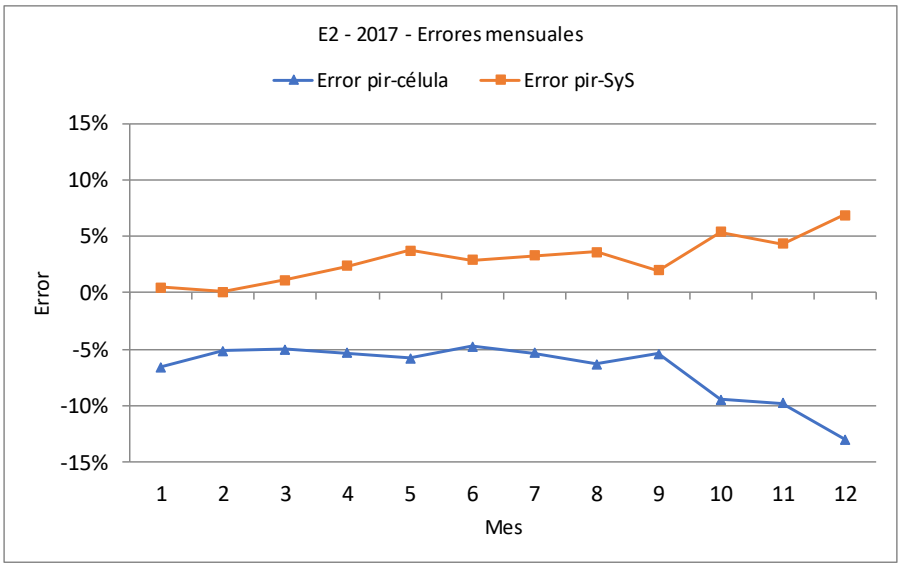


Ilustración D-12. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de Australia. Estación 2, año 2016.



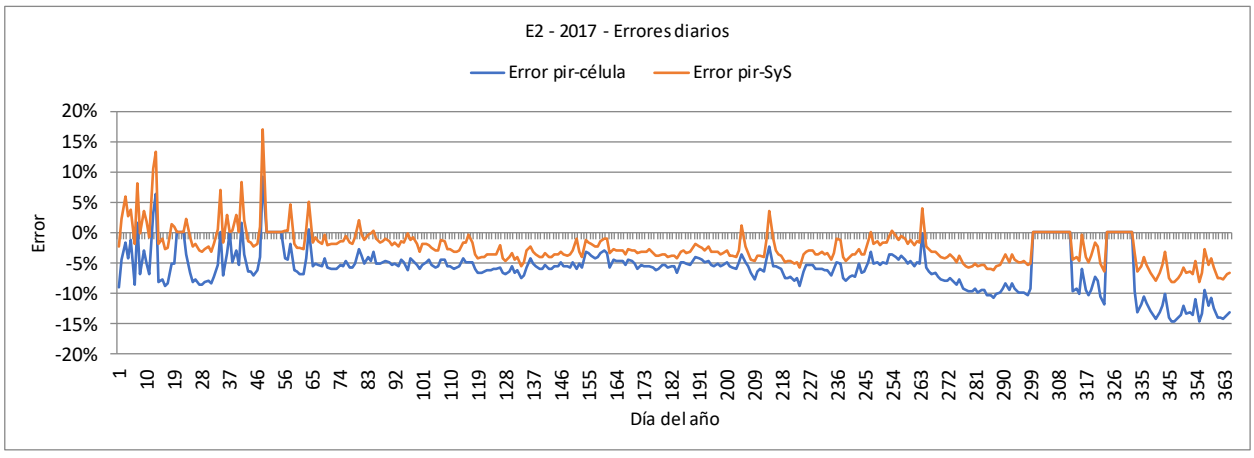


Ilustración D-13. Gráficas de errores mensuales y diarios. Modelo cel-pir de Australia. Estación 2, año 2017.