

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

Cuantificación de la incertidumbre de la base de datos radiométricos del GTER. Aplicación al periodo 2000-2019.

Autora: Patricia Fernández Ramos

Tutores: Elena Pérez Aparicio

Isidoro Lillo Bravo

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

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Cuantificación de la incertidumbre de la base de datos radiométricos del GTER. Aplicación al periodo 2000-2019.

Autora:

Patricia Fernández Ramos

Tutores:

Elena Pérez Aparicio

Profesora Sustituta Interina

Isidoro Lillo Bravo

Profesor Titular

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

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Cuantificación de la incertidumbre de la base de datos radiométricos del GTER.
Aplicación al periodo 2000-2019.

Autora: Patricia Fernández Ramos

Tutores: Elena Pérez Aparicio
Isidoro Lillo Bravo

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mis padres y hermanas, por apoyarme, motivarme y confiar en mí. Sin ellos no hubiera llegado hasta aquí.

A mis amigos, en especial Ana y Cris, pilar fundamental en mi vida. Todo se lo debo a ellas.

A mis profesores, dedicación y enseñanza incansable, sacando la mejor versión de mí.

Resumen

Para la elaboración de proyectos y desarrollo de estudios de energía solar, es fundamental disponer de una base de datos de radiación solar de alta fiabilidad y precisión. Así mismo, surge la idea de este proyecto. El objetivo es cuantificar la incertidumbre asociada a la base de datos radiométricos del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla en el periodo de años 2000-2019. Se simulan huecos artificiales de radiación en días originalmente correctos para aplicar cada una de las metodologías.

En primer lugar, se ha realizado una revisión bibliográfica para conocer las metodologías existentes de relleno de valores de radiación solar faltantes y sus niveles de precisión, cuantificando el error asociado.

A continuación, se ha descrito brevemente la estación radiométrica del GTER y el equipamiento que posee. Así como, un pequeño resumen de la base de datos, el formato de almacenamiento en los archivos diarios y la representación gráfica a lo largo del día de las variables de radiación.

En función del grado de nubosidad y del tipo de día, se ha realizado una clasificación de los días para aplicar en cada caso una metodología diferente y rellenar los huecos de radiación solar.

Seguidamente, se determina el tamaño de la muestra representativa para que sea válida la metodología impuesta y la técnica más adecuada para la selección aleatoria de días.

Aplicando cada una de las metodologías, se realiza un análisis de los resultados obtenidos a partir de los datos de radiación acumulada diaria global horizontal y directa normal, cuantificando del error asociado a la generación de esos nuevos valores. De esta manera, se evaluará la incertidumbre asociada a la base de datos del GTER consiguiendo el objetivo del trabajo.

Finalmente, se realiza una breve conclusión extraída del análisis y se proponen líneas de trabajo futuras para mejorar la calidad y la fiabilidad de la base de datos de la estación radiométrica del GTER.

Abstract

For the elaboration of projects and development of solar energy studies, it is essential to have a database of solar radiation of high reliability and precision. Likewise, the idea for this project arises. The objective is to quantify the uncertainty associated with the radiometric database of the Group of Thermodynamics and Renewable Energies (GTER) of the Higher Technical School of Engineering of Seville during the years 2000 and 2019. Artificial radiation gaps are simulated on originally correct days to apply each of the methodologies.

Firstly, a bibliographic review has been carried out to know the existing methodologies for filling in missing solar radiation values and their levels of precision, quantifying the associated error.

Then, the GTER radiometric station and the equipment it possesses have been briefly described. As well as, a small summary of the database has been made along with the storage format in the daily files and the graphic representation throughout the day of the radiation variables.

Depending on the degree of cloudiness and the type of day, a classification of the days has been made to apply in each case a different methodology and fill in the solar radiation gaps.

Continually, the size of the representative sample is determined so that the imposed methodology and the most appropriate technique for the random selection of days are valid.

Applying each of the methodologies, an analysis of the results obtained from the data of accumulated global horizontal and normal direct daily radiation is carried out, quantifying the error associated with the generation of these new values. In this way, the uncertainty associated with the GTER database will be evaluated, achieving the objective of the project.

Lastly, a brief conclusion drawn from the analysis is made and future work lines are proposed to improve the quality and reliability of the GTER radiometric station database.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxii
1 Introducción	1
2 Objetivos	2
3 Revisión bibliográfica	4
4 Fundamentos	6
4.1 <i>Radiación solar</i>	6
4.2 <i>Descripción de la estación radiométrica del GTER</i>	7
4.3 <i>Equipamiento de medida de la estación radiométrica</i>	8
4.4 <i>Descripción de la base de datos</i>	9
4.4.1 Representación gráfica de archivos diarios	11
5 Metodología	13
5.1 <i>Clasificación de días</i>	13
5.1.1 Clasificación de días según nubosidad	13
5.1.2 Clasificación de días según el tipo de hueco	15
5.2 <i>Tamaño de la muestra representativa</i>	18
5.3 <i>Métodos de muestreo probabilístico</i>	21
5.4 <i>Generación de huecos</i>	24
5.4.1 Días corregibles: Caso A	25
5.4.2 Días corregibles: Caso B	25
5.4.3 Días corregibles: Caso C	25
5.4.4 Días corregibles: Caso D	26
5.4.5 Días descartados	26
5.5 <i>Metodologías y relleno de huecos artificiales</i>	26
5.5.1 Días corregibles	26
5.5.2 Días descartados	37

5.6	<i>Distribución de tipos de días en las matrices muestra</i>	43
5.7	<i>Casos especiales</i>	47
5.8	<i>Cálculo de la radiación acumulada diaria</i>	51
6	Resultados	53
6.1	<i>Parámetros de medición estadística</i>	53
6.2	<i>Cálculo de errores</i>	54
6.2.1	Caso A.2	54
6.2.2	Caso B	57
6.2.3	Caso C	59
6.2.4	Caso D	62
6.2.5	Caso días descartados	64
6.3	<i>Representación gráfica resultados diarios</i>	67
7	Conclusiones y Líneas de trabajo futuras	74
8	Bibliografía	75
ANEXOS		77
Anexo I.	<i>Comparación de estaciones del SIAR con estación del GTER en el periodo 2000-2019.</i>	77
Anexo II.	<i>Sustitución de días descartados</i>	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Equipos de medida de la radiación solar de la estación radiométrica del GTER	9
Tabla 5.1. Clasificación días corregibles, Caso A	16
Tabla 5.2. Clasificación días corregibles, Caso C	17
Tabla 5.3. Clasificación días descartados	17
Tabla 5.4. Niveles de confianza comunes con su respectiva puntuación Z	19
Tabla 5.5. Medidas correctas de la radiación solar por año en el periodo 2000-2019	19
Tabla 5.6. Medidas correctas de radiación solar en el periodo 2000-2019	20
Tabla 5.7. Tamaño de la muestra para diferentes niveles de confianza y errores	21
Tabla 5.8. Valores finales del tamaño de la muestra	21
Tabla 5.9. Ventajas y desventajas del muestreo aleatorio simple	23
Tabla 5.10. Coeficientes de correlaciones M_d-M_t	30
Tabla 5.11. Sustitución de días incorrectos de la matriz muestra	37
Tabla 5.12. Primer día de medidas registrado por cada estación analizada	38
Tabla 5.13. Error estaciones SIAR-estación GTER para el año 2002	40
Tabla 5.14. Sustitución de días descartados con valores muy bajos de radiación solar	41
Tabla 5.15. Días descartados con errores elevados por bajos valores de radiación acumulada	41
Tabla 5.16. Sustitución de días descartados aplicando la condición adicional	42
Tabla 5.17. Sustitución del días descartado con el máximo valor de radiación del periodo 2000-2019	42
Tabla 5.18. Distribución de tipos de días para cada caso	43
Tabla 5.19. Distribución de tipos de días a los que se ha aplicado el filtro de días claros	48
Tabla 6.1. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada global horizontal, Caso A.2	55
Tabla 6.2. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada directa normal, Caso A.2	56
Tabla 6.3. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada global horizontal, Caso B	58
Tabla 6.4. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada directa normal, Caso B	59
Tabla 6.5. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada global horizontal, Caso C	60
Tabla 6.6. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada directa normal, Caso C	61

Tabla 6.7. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada global horizontal, Caso D	62
Tabla 6.8. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada directa normal, Caso D	64
Tabla 6.9. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada global horizontal, Caso días descartados	65
Tabla 6.10. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada directa normal, Caso días descartados	66
Tabla A.I.1. Análisis comparativo de las gráficas de datos de radiación global horizontal acumulada diaria de las estaciones de SIAR vs GTER en el periodo 2000-2019	78
Tabla A.II.1. Días sustituidos de 2000	108
Tabla A.II.2. Días sustituidos de 2001 (I)	109
Tabla A.II.3. Días sustituidos de 2001 (II)	109
Tabla A.II.4. Días sustituidos de 2002	110
Tabla A.II.5. Días sustituidos de 2003	111
Tabla A.II.6. Días sustituidos de 2004	112
Tabla A.II.7. Días sustituidos de 2005	113
Tabla A.II.8. Días sustituidos de 2006 (I)	113
Tabla A.II.9. Días sustituidos de 2006 (II)	113
Tabla A.II.10. Días sustituidos de 2007	114
Tabla A.II.11. Días sustituidos de 2008	115
Tabla A.II.12. Días sustituidos de 2009	116
Tabla A.II.13. Días sustituidos de 2010 (I)	117
Tabla A.II.14. Días sustituidos de 2010 (II)	117
Tabla A.II.15. Días sustituidos de 2011	118
Tabla A.II.16. Días sustituidos de 2012	119
Tabla A.II.17. Días sustituidos de 2013	119
Tabla A.II.18. Días sustituidos de 2014	120
Tabla A.II.19. Días sustituidos de 2015	121
Tabla A.II.20. Días sustituidos de 2016	122
Tabla A.II.21. Días sustituidos de 2017	122
Tabla A.II.22. Días sustituidos de 2018	123
Tabla A.II.23. Días sustituidos de 2019 (I)	124
Tabla A.II.24. Días sustituidos de 2019 (II)	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Componentes de la radiación solar	7
Figura 4.2. Vista de la estación del GTER	8
Figura 4.3. Fichero de radiación correspondiente al día juliano 27 del año 2011	10
Figura 4.4. Gráfica diaria correspondiente al día 9 del año 2015	11
Figura 5.1. Correlación k_{do} - k_t horario	14
Figura 5.2. Correlación k_d - k_t horario	15
Figura 5.3. Distribución del total de días correctos en el periodo 2000-2019	20
Figura 5.4. Resumen de la matriz muestra para el Caso A.2 y A.4	24
Figura 5.5. Archivo Excel con valores teóricos del orto y ocaso diario	25
Figura 5.6. Gráfica diaria correspondiente al día 214 del año 2000, día nublado con directa normal y global horizontal estimada al principio del día, Caso A.2	28
Figura 5.7. Gráfica diaria correspondiente al día 106 del año 2004, día cubierto con directa normal y global horizontal estimada al principio del día, Caso A.2	29
Figura 5.8. Gráfica diaria correspondiente al día 107 del año 2011, día despejado con directa normal estimada, Caso B	31
Figura 5.9. Gráfica diaria correspondiente al día 283 del año 2017, día nublado con directa normal estimada, Caso B	31
Figura 5.10. Gráfica diaria correspondiente al día 1 del año 2001, día cubierto con directa normal estimada, Caso B	32
Figura 5.11. Gráfica diaria correspondiente al día 25 del año 2003, día despejado con directa normal y global horizontal estimadas, Caso C	33
Figura 5.12. Gráfica diaria correspondiente al día 336 del año 2014, día nublado con directa normal y global horizontal estimadas, Caso C	33
Figura 5.13. Gráfica diaria correspondiente al día 53 del año 2007, día cubierto con directa normal y global horizontal estimadas, Caso C	34
Figura 5.14. Gráfica diaria correspondiente al día 112 del año 2013, día despejado con global horizontal estimada, Caso D	35
Figura 5.15. Gráfica diaria correspondiente al día 193 del año 2019, día nublado con global horizontal estimada, Caso D	35
Figura 5.16. Gráfica diaria correspondiente al día 358 del año 2001, día cubierto con global horizontal estimada, Caso D	36
Figura 5.17. Comparación Hg_0 GTER - La Rinconada año 2013	39
Figura 5.18. Comparación Hg_0 GTER - Guillena año 2013	39
Figura 5.19. Comparación GTER - Sanlúcar La Mayor año 2013	40
Figura 5.20. Distribución gráfica de tipos de días	43
Figura 5.21. Distribución tipos de días por año, Caso A.2	44
Figura 5.22. Distribución tipos de días por año, Caso B	45
Figura 5.23. Distribución tipos de días por año, Caso C	45

Figura 5.24. Distribución tipos de días por año, Caso D	46
Figura 5.25. Distribución tipos de días por año, Caso días descartados	46
Figura 5.26. Distribución de días a aplicar el filtro, Caso B	48
Figura 5.27. Distribución de días a aplicar el filtro, Caso C	49
Figura 5.28. Gráfica diaria correspondiente al día 93 del año 2004, día cubierto sin aplicación del filtro, Caso B	49
Figura 5.29. Gráfica diaria correspondiente al día 93 del año 2004, día cubierto con aplicación del filtro, Caso B	50
Figura 5.30. Gráfica diaria correspondiente al día 359 del año 2019, día nublado sin aplicación del filtro, Caso C	50
Figura 5.31. Gráfica diaria correspondiente al día 359 del año 2019, día nublado con aplicación del filtro, Caso C	51
Figura 5.32. Acumuladas diarias de los días con tres cifras del año 2010 para el Caso B	52
Figura 6.1. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso A.2	67
Figura 6.2. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso B	68
Figura 6.3. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso C	68
Figura 6.4. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso D	69
Figura 6.5. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso días descartados	69
Figura 6.6. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso A.2	70
Figura 6.7. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso B	71
Figura 6.8. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso C	71
Figura 6.9. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso D	72
Figura 6.10. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso días descartados	72
Figura A.I.1. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2000	79
Figura A.I.2. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2000	80
Figura A.I.3. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2001	80
Figura A.I.4. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2001	81
Figura A.I.5. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2001	81
Figura A.I.6. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2002	82
Figura A.I.7. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2002	82
Figura A.I.8. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2002	83
Figura A.I.9. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2003	83
Figura A.I.10. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2003	84
Figura A.I.11. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2003	84
Figura A.I.12. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2004	85
Figura A.I.13. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2004	85
Figura A.I.14. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2004	86
Figura A.I.15. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2005	86
Figura A.I.16. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2005	87

Figura A.I.17. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2005	87
Figura A.I.18. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2006	88
Figura A.I.19. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2006	88
Figura A.I.20. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2006	89
Figura A.I.21. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2007	89
Figura A.I.22. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2007	90
Figura A.I.23. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2007	90
Figura A.I.24. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2008	91
Figura A.I.25. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2008	91
Figura A.I.26. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2008	92
Figura A.I.27. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2009	92
Figura A.I.28. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2009	93
Figura A.I.29. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2009	93
Figura A.I.30. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2010	94
Figura A.I.31. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2010	94
Figura A.I.32. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2010	95
Figura A.I.33. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2011	96
Figura A.I.34. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2011	96
Figura A.I.35. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2011	97
Figura A.I.36. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2012	97
Figura A.I.37. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2012	98
Figura A.I.38. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2012	98
Figura A.I.39. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2014	99
Figura A.I.40. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2014	99
Figura A.I.41. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2014	100
Figura A.I.42. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2015	100
Figura A.I.43. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2015	101
Figura A.I.44. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2015	101
Figura A.I.45. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2016	102
Figura A.I.46. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2016	102
Figura A.I.47. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2016	103
Figura A.I.48. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2017	103
Figura A.I.49. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2017	104
Figura A.I.50. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2017	104
Figura A.I.51. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2018	105
Figura A.I.52. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2018	105
Figura A.I.53. Comparación H _g 0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2018	106
Figura A.I.54. Comparación H _g 0 GTER-La Rinconada, año 2019	106
Figura A.I.55. Comparación H _g 0 GTER-Guillena, año 2019	107

Notación

I_{g0}	Irradiancia global horizontal (W/m^2)
I_{bn}	Irradiancia directa normal (W/m^2)
I_{d0}	Irradiancia difusa horizontal (W/m^2)
$I_{gt}(27)$	Irradiancia global sobre una superficie inclinada de 27° (W/m^2)
I_0	Irradiancia solar extraterrestre (W/m^2)
k_t	Índice de claridad
k_d	Fracción difusa
k_{d0}	Coefficiente difuso
D	Dimensión fractal
H_{g0}	Irradiación global horizontal (Wh/m^2)
H_{bn}	Irradiación directa normal (Wh/m^2)
H_{d0}	Irradiación difusa horizontal (Wh/m^2)
θ	Ángulo de incidencia sobre la superficie horizontal (rad)
α	Altura solar (rad)
ω	Ángulo horario (rad)

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de evolucionar hacia un sistema energético más sostenible, ha conducido a potenciar un gran desarrollo en las energías renovables. De esta forma, se deja atrás el uso de combustibles fósiles siendo una fuente de obtención de energía limitada. La energía solar es una de las principales fuentes dentro de las energías renovables, debido que el Sol es la principal del planeta. Este hecho la convierte en un recurso inagotable.

La energía solar necesita contar con una serie de datos medidos de calidad así como una amplia base de datos. Por ello, surge la necesidad de poseer una base de datos lo más precisa posible y con el menor número de errores. Para conseguir esta calidad es necesario un buen cuidado y mantenimiento del equipamiento de las estaciones radiométricas. Aún así, se generan huecos en las variables de radiación que se registran y conlleva a problemas para futuros estudios y trabajos. De esta manera, se han llevado a cabo investigaciones en nuevas metodologías que generen las variables de radiación solar faltantes de forma artificial.

El Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros cuenta en sus instalaciones con una estación radiométrica para el registro de medidas de radiación con un equipamiento altamente sofisticado. Esta estación comenzó a funcionar en el año 1984. A día de hoy, la estación sigue en funcionamiento y almacena las medidas radiométricas y meteorológicas más importantes construyendo una base de datos de alta fiabilidad. Esta base de datos ha sido utilizada para la realización de este proyecto abarcando el periodo de tiempo desde el año 2000 hasta el 2019.

También es importante disponer de variedad en el registro de componentes de radiación solar. En la estación radiométrica del GTER se registran valores de radiación global horizontal, radiación directa normal y radiación difusa horizontal. Esta última variable comenzó a corregir sus medidas erróneas años posteriores a las otras dos variables. Son pocas las estaciones que miden esta componente solar, realizando a la estación a servir como base de números estudios.

En el Proyecto Fin de Carrera de Elena Pérez Aparicio *“Metodología para el análisis y corrección de la base de datos meteorológicos del GTER. Aplicación al periodo 2000-2009”* [1] se desarrollan diversas metodologías para el relleno de los huecos en el registro de medidas de radiación solar. Este proyecto hará uso de dichas metodologías en los huecos generados artificialmente en los archivos diarios de la estación. El objetivo es comprobar la precisión y exactitud de estos métodos asegurando una base de datos de calidad.

2 OBJETIVOS

En la introducción se ha destacado la importancia de disponer de una base de datos precisa y de calidad durante un largo periodo de tiempo para el desarrollo e implantación de nuevas tecnologías solares.

En el proyecto tomado como referencia para la elaboración del presente trabajo [1], se propusieron y aplicaron diferentes metodologías con la finalidad de completar los registros inexistentes de la base de datos de la estación radiométrica del GTER. Las nuevas medidas generadas presentan cierto grado de incertidumbre respecto a los valores correctos originales. Siguiendo esta idea, surge el presente proyecto cuyo objetivo es cuantificar la incertidumbre de la base de datos del GTER a cada metodología propuesta durante el periodo 2000-2019.

Para la consecución del objetivo, se empieza generando una matriz de días aleatorios para cada método aplicado donde generar los distintos tipos de huecos de radiación solar. Estas matrices están formadas por días clasificados como correctos desde el inicio, aquellos que no han sufrido correcciones previas. Se simulan los diferentes tipos de huecos y se procede al relleno de datos poniendo en práctica cada metodología desarrollada [1]. Una vez completados los registros de radiación solar, se realiza un estudio de errores comparando los resultados obtenidos con los originales correctos. Finalmente, se analizan todos los errores obtenidos con el fin de evaluar la precisión y calidad de la base de datos que cuenta la estación radiométrica del GTER situada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El estudio y desarrollo de este trabajo ha necesitado el conocimiento de metodologías y conceptos previos relacionados con el relleno de huecos en las mediciones de la radiación solar. Existen muchos estudios donde se presentan diferentes metodologías puestas en práctica en todo el mundo a lo largo de diversos años.

En primer lugar, sobre el relleno de huecos de radiación de larga duración, se evalúan dos ciudades: Oklahoma City North en 2012 y Albuquerque en 2005, con distintos climas en función de la ubicación y la duración de los huecos [2]. Estas fueron seleccionadas por la calidad de datos de radiación solar por hora. Las metodologías desarrolladas fueron: SSA (Análisis del espectro singular), TBA (Enfoque basado en la temperatura) y SASR (Radiación solar ajustada estadísticamente). El método SSA se basa en medir la tendencia y oscilación de la radiación solar y rellenar los huecos faltantes con una amplia gama de estudios de campos matemáticos. Es el método que mejores resultados obtiene para pequeñas longitudes de hueco. Tanto la metodología TBA como la SASR presentan la limitación de depender de la temperatura seca en cada instante del día para completar los huecos de radiación faltantes. El método SASR aporta un ajuste estadístico del modelo de cielos despejados de ASHRAE [3] y es el único adecuado para descomponer la radiación total en componentes difusos y directos. Es el método que mejor comportamiento tiene ante duraciones de hueco más largas.

Otro estudio realizado en la India aporta distintos métodos para el relleno de datos faltantes en la radiación solar según el tipo de variable afectada y la duración de los huecos en la diferentes estaciones de SRRRA [4]. La radiación solar se descompone en radiación global horizontal, directa normal y difusa horizontal. En función de la cantidad de componentes de la radiación que falten, se puede distinguir entre: el hueco se encuentra en una componente de la radiación solar (GHI solo, DNI solo o DHI solo), el hueco se encuentra en dos de las componentes de la radiación solar (DNI y DHI) y el huecos se encuentra en las tres componentes de la radiación solar. Son dos las metodologías propuestas para rellenar los huecos de radiación: el relleno básico de hueco y el relleno de huecos basado en satélites. Tanto en el relleno básico de huecos como en el relleno basado en satélites se emplea la ecuación algebraica que relaciona las tres componentes de la radiación solar si alguna de las componentes falta ($I_g0 = I_d0 + I_{bn} \times \cos(\theta)$). Si dos de las componentes de la radiación solar faltan o son incorrectas (I_d0 e I_{bn} incorrectas), I_{bn} se obtiene mediante modelos, en este artículo el modelo Skartveit es el utilizado, y I_d0 se obtiene mediante la ecuación algebraica para el caso del relleno básico de huecos. En el relleno de huecos basado en satélites, en primer lugar se obtiene I_{bn} de los datos derivados de satélites y por último, I_d0 aplicando la ecuación algebraica que relaciona las tres componentes de la radiación solar. Si las tres componentes de la radiación solar faltan, en el relleno básico de huecos hay que diferenciar entre huecos de duración inferior a tres horas, huecos superiores a tres horas y huecos superiores a veinticuatro horas. Para el relleno básico de huecos, en los huecos de menos de tres horas se calculan los índices de claridad de I_g0 e I_{bn} para las horas donde estas componentes son correctas, mediante una interpolación lineal se obtienen estos índices en las marcas de tiempo que faltan y finalmente se calculan los valores de I_g0 e I_{bn} . Con la ecuación algebraica, que relaciona las tres componentes, se obtiene la radiación difusa horizontal. En los huecos de duración mayor a tres horas y mayor a veinticuatro horas se procede de la misma manera. Cada hueco es reemplazado con valores de días vecinos siempre que los cinco días anteriores y posteriores al hueco sean medidos correctamente. En último lugar, en el relleno de huecos basado en satélites, cuando las tres componentes de la radiación solar faltan o son incorrectas, los datos de radiación se obtienen de los satélites de cada lugar donde se está realizando el estudio. Este caso solo se puede aplicar si dicho lugar presenta datos satelitales de radiación. Concluyendo, la metodología del relleno básico de huecos obtiene mejores resultados al conseguir una precisión cercana en los valores obtenidos cercana a los instrumentos de medida de radiación solar. Estos valores se encuentran dentro de los límites de tolerancia. Una de las limitaciones que presenta la metodología de relleno de huecos con datos de satélites es que todos los lugares estudiados no presentan información de satélites disponible para el sitio en cuestión, por ello, es imposible el desarrollo de la metodología.

El último artículo que propone metodologías para el relleno de huecos en la radiación solar fue desarrollado por Dharmesh Kumar y B. Ravindra, 2020, “*Gap-Filling Techniques for Solar Radiation Data and Their Role in Solar Resource Assessment*” [5]. Se proponen cuatro nuevas metodologías aplicadas en Jodhpur (India) para los meses de Junio, Julio y Agosto de 2015. Estas cuatro son: CLIM (Relleno de huecos mediante parámetros meteorológicos), RMIB (Relleno de huecos usando una base de datos), CWET (Relleno mediante el enfoque CWET-GIZ) y CURVE (Relleno de huecos con ajuste de curva). Estos cuatro enfoques crean conjuntos de datos de radiación confiables utilizando solo mediciones de estaciones terrestres. En el método CLIM utilizando modelos de transmitancia como fracciones difusas e índices de claridad, se derivan correlaciones entre parámetros meteorológicos seleccionados y componentes de la radiación solar. El método RMIB se basa en las relaciones entre componentes de la radiación solar con datos de promedios históricos específicos de la ubicación y relaciones estándar derivadas de esa ubicación. El método de CWET se aplica para el relleno de huecos de dos de las componentes de la radiación solar (I_{bn} e I_d0). Se emplea la misma metodología desarrollada en el artículo anterior [4], en primer lugar se obtiene I_{bn} mediante el modelo Skartveit y finalmente con la ecuación algebraica que relaciona las tres componentes de la radiación solar, se obtiene I_d0 . En huecos pequeños, la componente I_d0 faltante se calcula mediante interpolación lineal. El último método, CURVE, usa interpolaciones y aproximaciones para suavizar los datos de las curvas polinómicas con la finalidad de preservar la forma del gráfico. Mediante diferentes grados de ajuste polinómicos se rellenan los datos de radiación faltantes. El ajuste polinómico que mejor se comporta es el cuadrático. En conclusión, los métodos CWET y CURVE son los que mejor actúan y mejores resultados obtienen en la mayoría de las condiciones de cielos. En los días de cielos despejados o parcialmente nublados, las variaciones en las componentes de la radiación solar no son elevadas, obteniendo una buena calidad en los resultados.

En relación a la evaluación de la precisión e idealidad de las metodologías del relleno de huecos, hay que emplear parámetros estadísticos. Según Géssica M. S. Pereira, 2018, en el artículo “*Analysis and Evaluation of Gap Filling Procedures for Solar Radiation Data*” [6], los mejores parámetros para cuantificar el error son: el error de la tendencia media (MBE), el error cuadrático medio (RMSE) y el análisis del intervalo de confianza. El MBE se basa en la comparación de las curvas diarias de medidas válidas en relación con las curvas teóricas. Evaluando este parámetro, el método de la interpolación simple consigue mejores resultados con valores de MBE en torno a cero que el método de la ecuación algebraica, aunque ambos métodos se comportan favorablemente en el relleno de huecos. El análisis del intervalo de confianza muestra un aumento de la desviación de este intervalo a medida que aumenta la duración de los huecos. La interpolación lineal es un poco más fiable que la ecuación algebraica al no sobreestimar o subestimar los valores de radiación, sino realizando una media entre sus valores.

4 FUNDAMENTOS

La base de datos con la que cuenta la estación radiométrica del GTER posee sus primeros registros en el año 1984. Esta estación adquiere gran importancia al no ser de las pocas que cuentan con un histórico de medidas tan amplio. De ahí, que esta base de datos sea una candidata perfecta para servir en futuras investigaciones y estudios de energía solar.

A lo largo de este capítulo se realiza una breve introducción del concepto de radiación solar, sus unidades de medidas y componentes que la forman seguido de una breve descripción de la estación radiométrica del GTER localizada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla con sus principales equipos de registro de medidas. Finalmente, se describe la evolución de la base de datos de la estación radiométrica, su evolución en el periodo de tiempo estudiado, 2000-2019 y la representación gráfica de los archivos diarios de radiación solar generados.

4.1 Radiación solar

El Sol es una estrella y se considera como un foco térmico a 5777K. La energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar. La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. Todos los cuerpos con una determinada temperatura emiten radiación electromagnética. La magnitud solar que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia (I). La irradiancia mide la potencia por unidad de superficie que alcanza la Tierra. La unidad de la irradiancia es el W/m^2 . Cuando entra en juego el tiempo, se habla de irradiación (H). La irradiación solar es la magnitud que mide la energía por unidad de área de radiación solar incidente durante un periodo de tiempo sobre una superficie determinada. Su unidad es el Wh/m^2 .

Antes de llegar a la atmósfera terrestre, la radiación solar es conocida como irradiancia solar extraterrestre (I_0). La irradiancia extraterrestre es la cantidad de energía proveniente del Sol, por unidad de área, que recibe todo punto por encima de la atmósfera terrestre en cada instante de tiempo. Por lo tanto, varía tanto espacial como temporalmente, de acuerdo a la posición de un punto en particular sobre la Tierra y de la posición de ésta respecto al Sol. Determina un valor máximo teórico de la energía solar disponible, por lo que es ampliamente utilizada como referencia en el estudio de la radiación solar. Esta variable es calculada de forma teórica como aparece en el Proyecto Fin de Carrera “*Obtención de modelos k_d - k_t horario y diario a partir del análisis de datos medidos en la estación radiométrica de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla*” [7].

Existen dos componentes de la irradiancia solar incidente sobre un punto: la irradiancia directa y la irradiancia difusa.

- Irradiancia directa: radiación que llega a un determinado lugar procedente del disco solar. Si esa radiación es medida en la dirección del rayo incidente, se conoce como **irradiancia directa normal**. Por otro lado, si la radiación es medida sobre una superficie horizontal, se denomina **irradiancia directa horizontal**.
- Irradiancia difusa: radiación procedente de toda la bóveda celeste excepto la procedente del disco solar.

La suma de ambas da lugar a la irradiancia global incidente. Es el total de la radiación que llega a un determinado lugar medida sobre una misma superficie. En la Figura 1 se puede observar un pequeño esquema de las componentes en las que se divide la radiación solar.

A lo largo de este trabajo, se trabajarán con las variables: irradiancia directa normal (I_{bn}), irradiancia difusa horizontal (I_d0) e irradiancia global horizontal (I_g0). De igual forma, se puede hablar en términos de energía de irradiación, dando lugar a las variables: irradiación directa normal (H_{bn}), irradiación difusa horizontal (H_d0) e irradiación global horizontal (H_g0).

$$H = \int_{t_1}^{t_2} I dt \quad (\text{Ec. 1})$$

La dirección con la cual incide la irradiación solar sobre un cuerpo situado en la superficie terrestre es muy importante para conocer su comportamiento al ser reflejada.

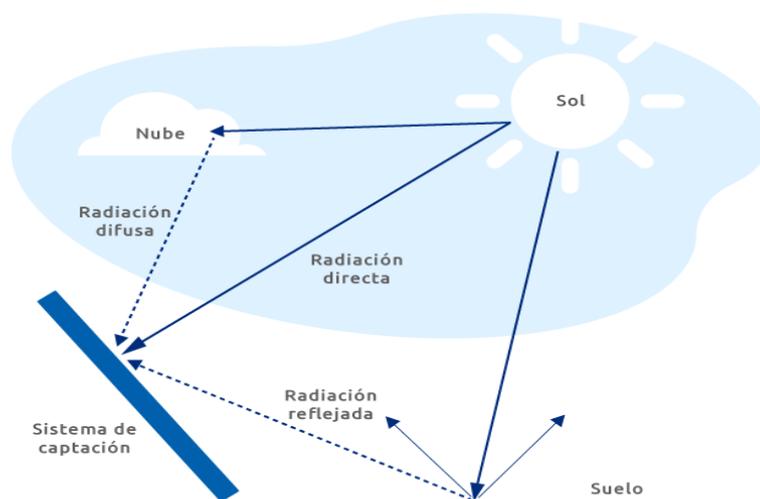


Figura 4.1. Componentes de la radiación solar

4.2 Descripción de la estación radiométrica del GTER

La estación radiométrica del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER) fue construida en 1984. En sus inicios, estuvo ubicada en el recinto universitario de Reina Mercedes, en un emplazamiento cuyas coordenadas eran $37,37^\circ$ N y $6,00^\circ$ W. Tras 14 años, en 1998 la estación se trasladó a la actual ubicación, la azotea del edificio de laboratorios L-1 de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI). Las coordenadas de la actual ubicación de la estación son $37,40^\circ$ N y $6,01^\circ$ W. La instalación ha sufrido constantes mejoras en su equipamiento con el fin de aumentar la fiabilidad de sus registros.



Figura 4.2. Vista de la estación del GTER

4.3 Equipamiento de medida de la estación radiométrica

La estación radiométrica del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER) situada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) se encuentra en constante evolución desde su instalación. Son muchas las modificaciones realizadas en su equipamiento con la finalidad de aumentar la fiabilidad de las medidas registradas. También ha experimentado cambios en la forma de almacenar los datos, facilitando el tratamiento informático de los mismos.

En la estación radiométrica se miden diferentes variables entre las que se encuentran las componentes de la radiación solar. La radiación solar se mide generalmente con instrumentos especiales destinados a tal propósito denominados radiómetros. Existen muchos tipos de radiómetros en función a la variable a medir. Las componentes de la radiación solar que se recogen en la estación del GTER son la irradiancia difusa horizontal (I_d0), la irradiancia directa normal (I_{bn}), la irradiancia global horizontal (I_g0) y la irradiancia global sobre una superficie inclinada de 27° ($I_{gt}(27)$) [8].

La irradiancia difusa horizontal se mide sobre una superficie horizontal mediante un piranómetro. Un piranómetro es un radiómetro diseñado para medir la irradiancia en una superficie plana receptora que resulta de los flujos radiantes incidentes del hemisferio superior en el rango de longitud de onda de $0,3\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$.

La irradiancia global horizontal y la irradiancia global sobre una superficie inclinada de 27° también son medidas mediante piránómetros.

Finalmente, la irradiancia directa normal es medida mediante pirheliómetros. Un pirheliómetro es un sensor diseñado para medir la irradiancia que resulta del flujo radiante solar desde un ángulo sólido definido del cual el eje está perpendicular al plano de la superficie del receptor.

Son varios los equipos que registran medidas de una misma componente de la radiación solar. En la Tabla 4.1 se muestra una lista con el actual equipamiento de medidas de la radiación solar instalado en la estación radiométrica del GTER.

Equipos	Variable medida
Piranómetro Kipp & Zonen CMP10 + shadow band	I_d0
Piranómetro Kipp & Zonen CMP10 + shading ball	I_d0
Piranómetro Kipp & Zonen CMP21	I_g0
Piranómetro Atersa Calibrated PV cell	I_g0
Piranómetro Skye SP111 photodiode	I_g0
Piranómetro Hukseflux SR20	$I_{gt}(27)$
Piranómetro Atersa Calibrated PV cell	$I_{gt}(27)$
Piranómetro Skye SP111 photodiode	$I_{gt}(27)$
Pirheliómetro Kipp & Zonen CHP1	I_{bn}
Pirheliómetro Eppley NIP	I_{bn}

Tabla 4.1. Equipos de medida de la radiación solar de la estación radiométrica del GTER

4.4 Descripción de la base de datos

La estructura de los archivos almacenados de las medidas de radiación de la estación ha sufrido cambios a lo largo de los años. Todas estas modificaciones se han realizado con la finalidad de obtener una mayor fiabilidad y facilidad en el tratamiento de los datos.

Desde el año 2000 al 2009 el formato de los archivos se mantiene prácticamente constante sufriendo pequeñas varianzas. Durante el periodo 2000-2002, se almacenaban los archivos con el formato “RAD-ddd.DAT”, de igual forma que años anteriores, y se comienzan a generar unos nuevos archivos llamados “ARADddd.DAT”. Los tres últimos dígitos hacen referencia al día juliano del registro de datos de radiación. En este periodo se deja de introducir texto en el fichero de medidas con el fin de facilitar el manejo de los datos del archivo. La desventaja de este hecho es la dificultad en la comprensión de las variables del archivo. Los valores comienzan a almacenarse cada cinco segundos. A lo largo del año 2003 se cambia la extensión de los archivos, pasando de la extensión “.DAT” a ser “.TXT”. A partir del año 2004 hasta 2010, únicamente se generan los archivos del tipo “aradddd.txt”.

El año 2010 supone un año de transición en el formato de almacenamiento de los archivos de las medidas de la radiación. En la actualidad, sigue permaneciendo este formato en el registro de datos de la radiación solar. Los archivos pasan a nombrarse de la forma: “meteo_aaaa_ddd.txt”. Los cuatro primeros dígitos, identificados con las letras “aaaa” indican el año al que pertenecen esas medidas y los tres últimos dígitos “ddd”, hacen referencia al día juliano en que se toman las medidas. En estos nuevos archivos, sigue sin introducirse ningún texto en el fichero de medidas y las variables se almacenan cada cinco segundos. En la Figura 4.3 se adjunta un ejemplo de estos archivos.

meteo_2011_027: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda															
8:57:25	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0001	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.8	102	7.354142	
8:57:30	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0001	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.8	102	7.355531	
8:57:35	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.8	103	7.356920	
8:57:40	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0001	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.7	102	7.358309	
8:57:45	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0001	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.7	102	7.359698	
8:57:50	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0001	0000	0058	11.4	0.0	000	1000.7	102	7.361087	
8:57:55	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0001	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.6	102	7.362476	
8:58:00	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0001	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.6	102	7.363865	
8:58:05	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0001	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.6	103	7.365253	
8:58:10	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.6	102	7.366642	
8:58:15	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.5	102	7.368031	
8:58:20	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.5	102	7.369420	
8:58:25	0056	0057	0038	0058	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.5	103	7.370809	
8:58:30	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.4	102	7.372198	
8:58:35	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.4	102	7.373587	
8:58:40	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.4	102	7.374976	
8:58:45	0056	0057	0038	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.4	102	7.376365	
8:58:50	0056	0058	0039	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.3	102	7.377753	
8:58:55	0056	0058	0039	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0058	11.5	0.0	000	1000.3	103	7.379142	
8:59:00	0057	0058	0039	0059	0058	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0059	11.5	0.0	000	1000.3	102	7.380531	
8:59:05	0057	0058	0039	0059	0059	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0059	11.5	0.0	000	1000.3	102	7.381920	
8:59:10	0057	0058	0040	0059	0059	0058	0000	0058	0000	0000	0000	0059	11.5	0.0	000	1000.2	103	7.383309	
8:59:15	0057	0058	0040	0059	0059	0059	0000	0059	0000	0000	0000	0059	11.5	0.0	000	1000.2	102	7.384698	
8:59:20	0057	0059	0040	0060	0059	0059	0000	0059	0000	0000	0000	0059	11.5	0.0	000	1000.2	102	7.386087	
8:59:25	0057	0059	0040	0060	0059	0059	0000	0059	0000	0000	0000	0059	11.5	0.0	000	1000.2	102	7.387476	
8:59:30	0057	0059	0041	0060	0059	0059	0000	0059	0000	0000	0000	0060	11.5	0.0	000	1000.1	102	7.388865	
8:59:35	0057	0059	0041	0060	0060	0059	0000	0059	0000	-000	0000	0060	11.5	0.0	000	1000.1	102	7.390253	
8:59:40	0058	0060	0041	0060	0060	0060	0000	0060	0000	-000	0000	0060	11.5	0.0	000	1000.1	102	7.391642	
8:59:45	0058	0060	0041	0061	0060	0060	0000	0060	0000	-000	0000	0060	11.5	0.0	000	1000.1	102	7.393031	
8:59:50	0058	0060	0041	0061	0060	0060	0000	0060	0000	-000	0000	0060	11.5	0.0	000	1000.0	102	7.394420	
8:59:55	0058	0060	0041	0061	0061	0060	0000	0060	0000	-000	0000	0061	11.5	0.0	000	1000.0	102	7.395809	
9:00:00	0059	0061	0041	0062	0061	0061	0000	0061	0000	-000	0000	0061	11.5	0.0	000	1000.0	102	7.397198	
9:00:05	0059	0061	0042	0062	0061	0061	0000	0061	0000	-001	0000	0061	11.5	0.0	000	1000.0	102	7.398587	
9:00:10	0059	0061	0042	0062	0062	0062	0000	0062	0000	-001	0000	0062	11.5	0.0	000	999.9	102	7.399976	
9:00:15	0060	0062	0042	0063	0062	0062	0000	0062	0000	-001	0000	0062	11.5	0.0	000	999.9	102	7.401365	
9:00:20	0060	0062	0043	0063	0063	0062	0000	0062	0000	-001	0000	0063	11.5	0.0	000	999.9	102	7.402753	

Figura 4.3. Fichero de radiación correspondiente al día juliano 27 del año 2011

Las variables registradas en cada columna son, de izquierda a derecha:

- G.M.T. (HH:MM:SS): Instante temporal en que se han tomado las medidas
- Irradiancia difusa medida con sistema de banda de sombra (W/m^2)
- Irradiancia global sobre superficie horizontal mediante piranómetro Eko, modelo ms80 (W/m^2)
- Irradiancia global sobre superficie inclinada 27° mediante piranómetro Hukseflux, modelo SR20 (W/m^2)
- Irradiancia difusa medida con sistema de sombreado de bolas (W/m^2)
- Irradiancia global sobre superficie inclinada 27° mediante célula calibrada Atersa (W/m^2)
- Irradiancia global sobre superficie horizontal mediante piranómetro Skype SP1110 photodiode (W/m^2)
- Irradiancia global sobre superficie inclinada 27° mediante piránometro Skype SP1110 photodiode (W/m^2)
- Irradiancia de onda larga medida con pirgeómetro (W/m^2)
- Irradiancia global sobre superficie horizontal mediante célula calibrada Atersa (W/m^2)
- Irradiancia directa normal medida con pirheliómetro Eppley, modelo NIP (W/m^2)
- Irradiancia directa normal medida con pirheliómetro Kipp and Zonen, modelo CHP1 (W/m^2)
- Desactivado temporalmente
- Temperatura mediante sonda Young ($^\circ C$)
- Velocidad del viento con anemómetro (m/s)
- Dirección del viento con veleta ($^\circ$)

- Presión atmosférica mediante sonda barométrica (mBar)
- Humedad Relativa mediante sonda Young (%)
- Hora solar

4.4.1 Representación gráfica de archivos diarios

La representación gráfica de los archivos diarios es una buena forma de mostrar la evolución de las variables a lo largo del tiempo. Estas gráficas son generadas mediante el programa informático MATLAB. En ellas se observan, la radiación global horizontal (azul), la radiación difusa horizontal (celeste), la radiación directa normal (rojo) y la radiación extraterrestre (negro) referente a un día. En la Figura 4.4 aparece un ejemplo de una de ellas.

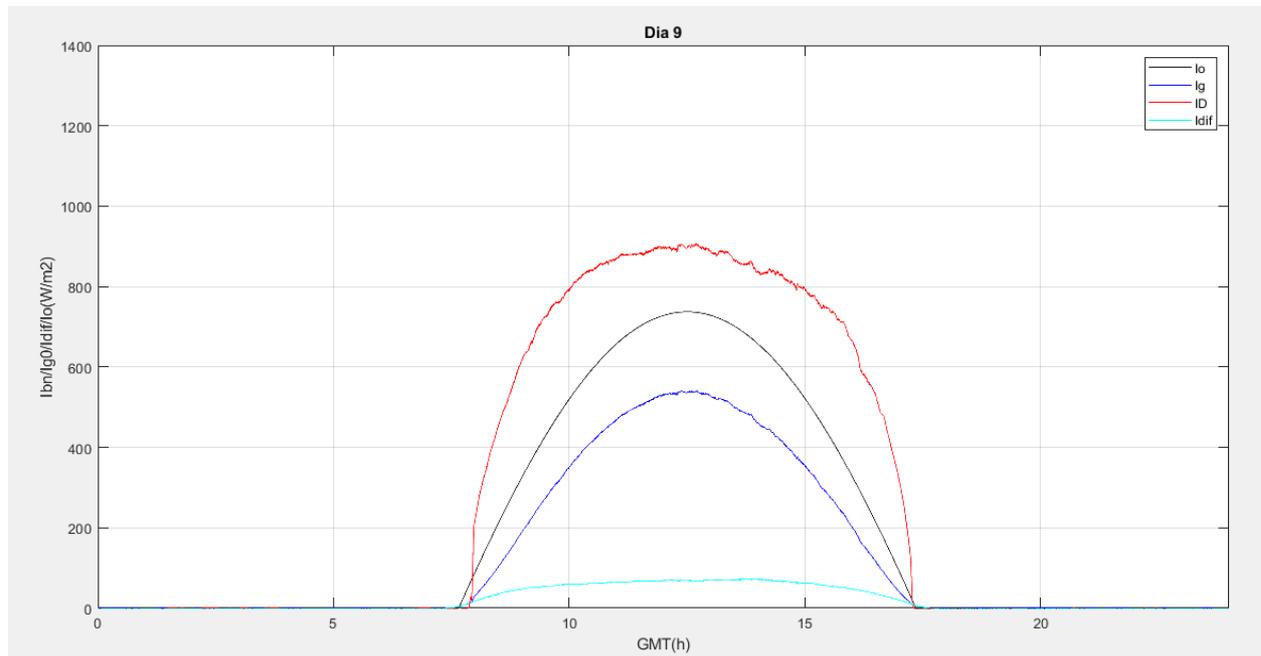


Figura 4.4. Gráfica diaria correspondiente al día 9 del año 2015

Las gráficas diarias se emplean para comprobar el comportamiento de la estación. Tras su análisis, pueden identificarse los errores que se dan en el registro de las medidas de la radiación. Estos errores pueden ser consecuencia de equipos mal calibrados, paradas en el sistema de adquisición de datos, apagón del sistema de los equipos o agentes externos como sombras de edificios o suciedad del ambiente que impiden el registro correcto de datos de la radiación. En el Proyecto Fin de Carrera de Elena Pérez Aparicio, “*Metodología para el análisis y corrección de la base de datos meteorológicos del GTER. Aplicación al periodo 2000-2009*” [1] se desarrollaron las mejores metodologías para solventar estos problemas y obtener una calidad en los datos de radiación.

5 METODOLOGÍA

En este capítulo se lleva a cabo una descripción detallada de la metodología trazada para el proceso de análisis y corrección de la base de datos. En primer lugar se identifican y analizan los problemas localizados en los archivos diarios. Seguidamente, se fijan los criterios de clasificación en función de las características que los definen. A continuación, se determina el tamaño representativo de la muestra con los días correctos para que sea válida cada una de las metodologías propuestas. Se elige un método probabilístico que selecciona los valores que conforman la muestra. Después, se presentan las metodologías para el relleno de huecos en función de las características que los definen. Se generan huecos artificiales y se aplican todas las metodologías propuestas en cada elemento de la muestra. Finalmente, se calcula la radiación acumulada diaria global horizontal y la acumulada diaria directa normal para alcanzar el objetivo del trabajo, comparar los valores obtenidos con cada metodología con los ya obtenidos y cuantificar la precisión de cada una de ellas.

En los inicios de la estación radiométrica del GTER no se disponía de los equipos y medidas necesarios para poder llevar a cabo la corrección de la radiación difusa horizontal (I_d0). En consecuencia de ello, solo se generarán huecos de la radiación global horizontal (I_g0) y de la radiación directa normal (I_{bn}).

5.1 Clasificación de días

En primer lugar, se describen los criterios adoptados para la clasificación de los días en función del registro de datos de las medidas de radiación solar. Es frecuente encontrar diferentes problemas en los archivos diarios que darán lugar a errores. Estos problemas dificultarán el tratamiento de la información y la calidad de las medidas registradas. Se trata de una de las partes más complejas, ya que hay que tener en cuenta las implicaciones de las características para la posterior simulación de errores en las medidas. Se trata de uno de los pasos más importantes del proyecto, ya que en función de su validez el objetivo del proyecto se alcanzará en mayor o menor medida. Se pueden distinguir dos clasificaciones, la primera en función del grado de nubosidad y la segunda en función del tipo de hueco.

5.1.1 Clasificación de días según nubosidad

La clasificación de días según el grado de nubosidad distingue entre dos conjuntos de días, días claros y días no claros. A los días claros pertenecen los días despejados y dentro de los días no claros se engloban tanto los días nublados como los cubiertos. En el Proyecto Fin de Carrera desarrollado por Elena Pérez Aparicio [1] se llegó a esta clasificación combinando el índice de claridad (k_i) y la dimensión fractal (D). Con ambos parámetros se consigue una clasificación más eficiente y de mayor fiabilidad, pero en este trabajo solo se tratará el índice de claridad (k_i) debido que la clasificación de los días atiende únicamente a esta variable. Esta es la más ampliamente utilizada por investigadores para la clasificación de días en función de la nubosidad: despejados, nublados y cubiertos.

Índices de claridad del cielo

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

$$k_t(h) = I_g0(h) / I_0(h) \quad \text{Relación entre las irradiancias global y extraterrestre}$$

$$k_{d0}(h) = I_d0(h) / I_0(h) \quad \text{Relación entre las irradiancias difusa y extraterrestre}$$

$$k_d(h) = I_d0(h) / I_g0(h)$$

Relación entre las irradiancias difusa y global

Para la clasificación de días según el grado de nubosidad se emplean las correlaciones k_{d0-k_t} y k_d-k_t . La representación conjunta de k_{d0-k_t} , para un lugar determinado, se puede ver en la Figura 5.1.

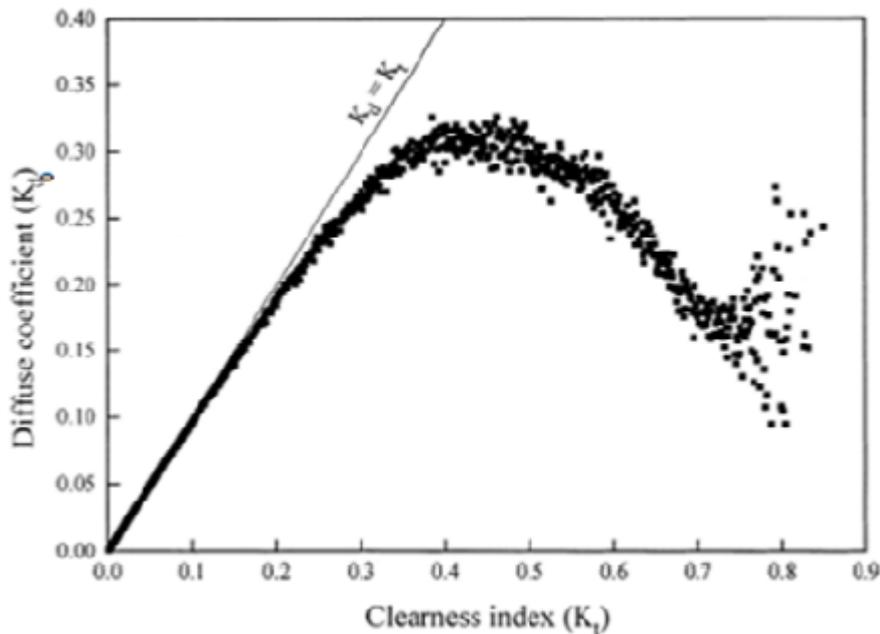


Figura 5.1. Correlación k_{d0-k_t} horario

Analizando la gráfica se observa como a medida que aumenta el índice de claridad, aumenta el coeficiente difuso de forma lineal. Cuando el índice de claridad se iguala al coeficiente difuso (pendiente igual a la unidad) significa que el cielo está cubierto de nubes y como consecuencia, tanto la radiación global como la difusa son prácticamente iguales. El aumento del índice de claridad sigue una pendiente unidad hasta llegar a un valor aproximado de 0,15. A partir de este valor, el crecimiento deja de ser lineal y comienza una dispersión de los puntos obtenidos. Este alejamiento lineal se debe a la variedad de estados de cielos nublados que pueden darse. Alrededor de los valores de 0,4 y 0,5 para el índice de claridad se produce un pico donde el coeficiente difuso comienza a disminuir. Esto se traduce que a medida que aumenta el índice de claridad (k_t), comienza a despejarse el cielo, menor cantidad de nubes, y por eso, el coeficiente difuso va disminuyendo. Para un índice de claridad mayor a 0,7 el grado de dispersión es importante.

Al igual que la correlación k_{d0-k_t} , se puede analizar la correlación k_d-k_t , Figura 5.2.

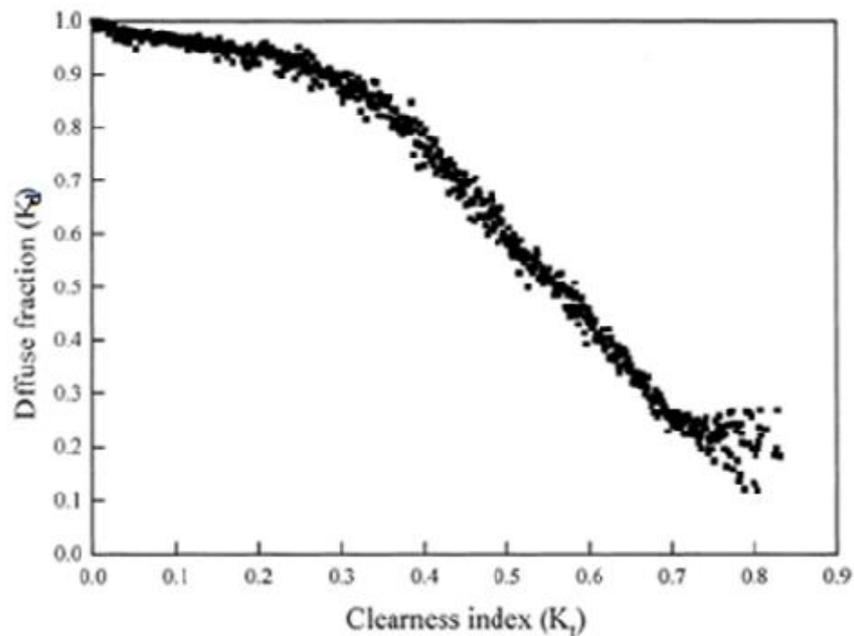


Figura 5.2. Correlación k_d - k_t horario

En la gráfica se observa, inicialmente, la fracción difusa toma valor unidad en el primer tramo donde el índice de claridad es pequeño, $k_t < 0,15$. En este momento, la radiación difusa es igual a la global lo que significa que el cielo está totalmente cubierto de nubes. La radiación global está formada por la radiación difusa y la radiación directa y supone que la radiación difusa es totalmente dominante sobre la radiación directa. Esto también se verifica, observando la gráfica, como el índice de claridad es nulo. A medida que aumenta el índice de claridad, la dispersión de puntos aumenta y la fracción difusa disminuye. La radiación global comienza a ser predominante sobre la difusa, por ello, la cantidad de nubes disminuye al disminuir la radiación difusa dando lugar a cielos más claros, más despejados. En ambas gráficas, una vez que el índice de claridad supera el valor de 0,7, el grado de dispersión es considerable indicando una combinación de día claro y parcialmente nublado más que un día totalmente claro. La fracción difusa (k_d) toma valor de 0,08 para un cielo totalmente despejado y aproximadamente de 0,27 para un cielo de nubes y claros.

Entre los tres índices de claridad descritos, el índice k_t es el más utilizado a la hora de clasificar los días según la nubosidad. Esto se debe a que este índice solo necesita medir una variable para su cálculo a diferencia del índice k_d , donde es necesario medir dos variables y el error cometido aumenta al depender de la medición de dos variables. El índice k_{do} , aunque solo sea necesario medir una variable para su determinación, presenta una fuerte dispersión de puntos a medida que aumenta el índice k_t , dando lugar a una variedad de estados de cielos nublados posibles.

El criterio seguido para clasificar los días según el grado de nubosidad en función del índice de claridad k_t es:

$$\begin{aligned} \bar{k}_t \leq 0,3 &\rightarrow \text{Cielo cubierto} \\ 0,3 < \bar{k}_t < 0,65 &\rightarrow \text{Cielo nublado} \\ \bar{k}_t \geq 0,65 &\rightarrow \text{Cielo despejado} \end{aligned}$$

5.1.2 Clasificación de días según el tipo de hueco

Los días de cada año se pueden agrupar en tres grandes grupos según el tipo de hueco:

- Días correctos

- Días corregibles
- Días descartados

Atendiendo al objetivo de dicho trabajo, solo se tendrán en cuenta los días correctos donde se realizará la generación de huecos. Aun así, es necesario conocer los días pertenecientes a cada grupo y las características que reúnen. Estos grupos a su vez, se subdividen según las características comunes, cuyas necesidades de corrección coincidan.

5.1.2.1 Días correctos

Se consideran días correctos aquellos que presentan dos características fundamentales. En primer lugar, deben existir registros de datos en el intervalo de tiempo suficiente. Esto se traduce que, al menos, se registren datos desde el orto hasta el ocaso. La segunda característica es que todas las variables se tienen que registrar correctamente, es decir, sin errores relacionados con el funcionamiento de los equipos o deficientes procesos de mantenimiento. También existen días donde sus gráficas diarias presentan reflejos en alguna de sus medidas o pequeñas sombras producidas por algún elemento ajeno al equipo de toma de datos. Estos días se consideran correctos, ya que no ha habido ningún fallo en el registro de la medida, sino se ha visto afectada por algún factor externo sin mayor relevancia.

5.1.2.2 Días corregibles

En este grupo se engloban aquellos días que presentan algún error en sus medidas pero se les puede aplicar una metodología de corrección y considerarse como válidos. Se entiende como día válido aquel que originalmente ha registrado medidas de radiación correctas. Como existen diversos errores que han llevado a considerar estos días como corregibles, dentro de este grupo existen cuatro casos distintos, cada uno con su metodología de corrección.

A. Días corregibles. Caso A

Este caso está formado por los días donde la radiación global horizontal (I_g0) y la radiación directa normal (I_{bn}) se han registrado de forma correcta. En ambos casos, se ha detectado un hueco al principio o final del día de duración menor a una hora. Entendiendo como principio del día el orto y final el ocaso. Este hecho conduce a no poder considerar un día como correcto. En este caso también entra en juego la clasificación según el grado de nubosidad, distinguiendo entre días claros (días despejados) y no claros (días nublados y cubiertos). En la Tabla 5.1 se muestra un esquema de todas las casuísticas posibles.

Caso A.1			Hueco al principio del día <1h	Día claro
Caso A.2	I_g0 correcta	I_{bn} correcta	Huecos al principio del día <1h	Día no claro
Caso A.3			Hueco al final del día <1h	Día claro
Caso A.4			Hueco al final del día <1h	Día no claro

Tabla 5.1. Clasificación días corregibles, Caso A

B. Días corregibles. Caso B

En este caso se agrupan aquellos días donde las medidas de radiación global horizontal (I_g0) se ha registrado correctamente, pero las de radiación directa normal (I_{bn}) son incorrectas, su registro es incompleto o no existe el valor, no se registran datos. La metodología aplicada para la corrección de ambos grupos de días es la misma, por eso, se pueden englobar en un solo caso. En este caso solo es necesario generar de forma sintética los datos de esta última variable. La metodología aplicada para ello se detallará más adelante.

C. Días corregibles. Caso C

Este caso está formado por una combinación de los dos anteriores. La radiación global horizontal (I_g0) se ha medido correctamente pero presenta un hueco al principio o final de día menor de 1 hora en su archivo diario y la radiación directa normal (I_{bn}) no existe o se ha registrado de forma incorrecta. En la Tabla 5.2 aparece un resumen de los tipos de días pertenecientes a este grupo.

Caso C.1	I_g0 correcta	Hueco al principio del día <1h	I_{bn} no existe o es incorrecta
Caso C.2		Hueco al final del día <1h	

Tabla 5.2. Clasificación días corregibles, Caso C

D. Días corregibles. Caso D

Finalmente, en este caso se engloban los días donde no se registran o son incorrectas las mediciones de la radiación global horizontal (I_g0), pero son correctas las de radiación directa normal (I_{bn}). Es el caso menos probable, ya que la fiabilidad de las medidas de la radiación global horizontal son mucho mayores que las de la radiación directa normal. En todo caso, también tiene que ser evaluado.

5.1.2.3 Días descartados

Debido a la multitud de errores que pueden presentar las medidas de radiación solar, existen días clasificados como descartados. Ya sea por errores irreparables o porque el intervalo de medidas es insuficiente, estos días no se pueden corregir. En la siguiente tabla se muestran los casos incluidos en este apartado y sus causas.

Caso 1	Archivo de radiación no generado
Caso 2	I_g0 e I_{bn} incorrectas o no existen
Caso 3	Hueco al principio del día >1h
Caso 4	Hueco al final del día >1h
Caso 5	Hueco intermedio >30min

Tabla 5.3. Clasificación días descartados

A todos estos casos se les aplica el mismo procedimiento de relleno de datos, independientemente del motivo por el que se incluyen en este grupo. Para los dos primeros casos, la única opción existente es la sustitución de esos archivos diarios erróneos por otros correctos de la misma estación. Aunque en los tres últimos casos se

registren medidas correctas en ciertos intervalos de tiempo, la duración de los huecos es inadmisibles. Por este motivo, se incluyen dentro de este grupo. Las horas cercanas al orto y el ocaso tienen menor influencia que las intermedias, así su permisibilidad de duración es mayor pero nunca superior a una hora.

5.2 Tamaño de la muestra representativa

Debido al gran número de datos de la radiación solar registrados correctamente en el período de años 2000-2019, es necesario obtener una muestra representativa de todos ellos. Una muestra es una selección de datos elegidos que representan a conjunto total. La muestra representativa hace referencia a que todo el conjunto de datos tenga las mismas oportunidades de participación en la investigación. Con esta muestra se consigue un ahorro de tiempo y dinero, al igual que nos proporciona información confiable de los datos.

En función de los objetivos y las circunstancias en las que se desarrolle el estudio, el tamaño de la muestra variará. El tamaño de la muestra es una porción significativa del conjunto de datos que cumple con las características de la investigación reduciendo los costos y el tiempo. Aumentando el tamaño de la muestra elegida, la precisión de los resultados obtenidos del estudio aumentará.

En este caso se trata de una muestra finita, al conocer el número total de días los cuales se registraron las medidas de la radiación solar correctamente. Para determinar el tamaño de esta, Murray y Larry (2005) propusieron una ecuación cuando se conocía el conjunto de datos totales en la que entraban en juego varias variables [9].

$$n = \frac{N \times Z^2 \times p \times q}{e^2 \times (N - 1) + Z^2 \times p \times q} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- n: tamaño de la muestra buscada.
- N: tamaño del conjunto de datos.
- Z: parámetro estadístico que depende del Nivel de Confianza (NC).
- NC: nivel de confianza. Probabilidad de que las respuestas sean ciertas.
- e: error de estimación máximo aceptado.
- p: probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito).
- q: probabilidad de que no ocurra el evento estudiado. Siendo:

$$q = (1 - p) \quad (\text{Ec. 3})$$

Si se desconoce la probabilidad del evento (p), se asigna un 50% a “p” y un 50% a “q”. En este caso, al desconocerse esta probabilidad, “p” y “q” poseen un valor del 50% cada uno.

El nivel de confianza corresponde a una puntuación Z. Este valor es constante y necesario para esta ecuación. Lo ideal es tener un nivel de confianza elevado, ya que proporcionará una mayor exactitud de la muestra. Los niveles de confianza más comunes con los que se trabaja oscilan entre 90-99%. Las puntuaciones Z correspondientes a los niveles de confianza más comunes son:

NC= 90%	NC= 95%	NC= 99%
Z=1,645	Z=1,96	Z=2,576

Tabla 5.4. Niveles de confianza comunes con su respectiva puntuación Z

También es de importante interés el margen de error. Se define como el porcentaje de variación aceptable que existe en los resultados de la investigación. Es la manera de aceptar que los datos no son absolutamente exactos o precisos. El margen de error puede ser controlado eligiendo una muestra aleatoria y aumentando el tamaño de la muestra, pero el tiempo y el presupuesto supone un limitante. Por lo que, si se desea un disminuir el margen de error, será necesario aumentar el tamaño de la muestra. Al aumentar el tamaño de la muestra, aumenta el nivel de confianza de esta. Regularmente, se trabaja con un margen de error entre 1-10%, siendo un 5% el valor estándar usado en las investigaciones.

Una vez establecidos los valores adecuados de cada variable, se procede a realizar la sustitución de cada uno de ellos en la ecuación y así obtener el tamaño de la muestra representativa del conjunto de datos correctos de la radiación solar.

El número total de medidas correctas de la radiación solar de cada año en el periodo 2000-2019 son conocidas. Estas quedan registradas en la base de datos radiométricos del GTER. En la siguiente tabla se muestra la cantidad total de medidas registradas correctamente por año.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Total medidas correctas	299	321	310	308	252	188	67	299	269	234
Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Total medidas correctas	313	282	240	307	336	319	251	239	253	249

Tabla 5.5. Medidas correctas de la radiación solar por año en el periodo 2000-2019

En la Figura 5.3 se muestran los porcentajes de días totales correctos desde el origen para cada año en el periodo de años analizado, 2000-2019.

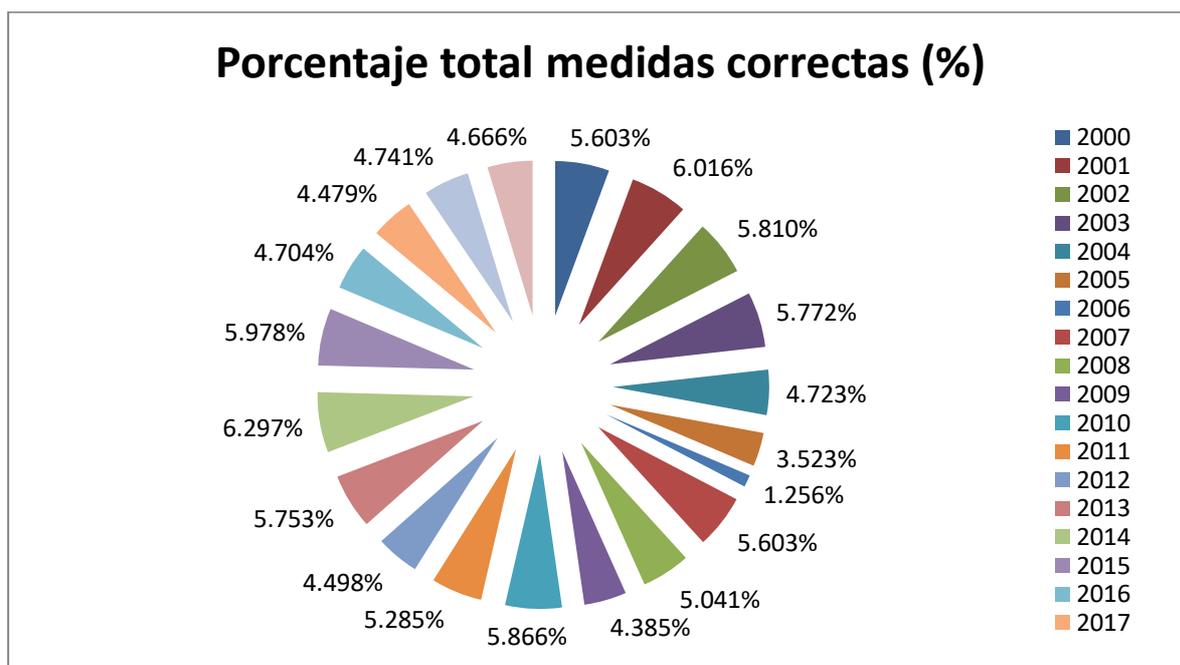


Figura 5.3. Distribución del total de días correctos en el periodo 2000-2019

Observando la gráfica, todos los años tienen una distribución similar de días correctos a excepción del año 2006. Como consecuencia de ello, los días pertenecientes a este año tienen menor probabilidad de ser seleccionados en la matriz muestra a crear para cada metodología.

Como el objetivo es generar el número de huecos, igual al tamaño de la muestra representativa, aleatoriamente en el periodo de años completo, es necesaria la suma de todas esas medidas. Así se obtendrá el valor total de todos los datos en el periodo 2000-2019.

Total medidas correctas periodo 2000-2019

5336

Tabla 5.6. Medidas correctas de radiación solar en el periodo 2000-2019

A continuación, se inserta una tabla con diferentes resultados del tamaño de la muestra variando tanto el nivel de confianza (NC) como el error (e) en 5 puntos.

NC (%)	Z	e (%)	n (días)
90	1,645	1	2983
90	1,645	5	285
90	1,645	10	67
95	1,96	1	3430
95	1,96	5	358
95	1,96	10	94
99	2,576	1	4038
99	2,576	5	590
99	2,576	10	161

Tabla 5.7. Tamaño de la muestra para diferentes niveles de confianza y errores

Como se puede observar, cuanto mayor sea el error para un mismo nivel de confianza, menor es el tamaño necesario de la muestra y menor precisión en los resultados. En cambio, a mayor nivel de confianza, mayor será el tamaño de la muestra necesario y por consiguiente, mayor será la precisión de los resultados.

Hay que llegar a un acuerdo nivel de confianza-errores que se ajuste a las necesidades y limitaciones de cada estudio. Fijándose en el caso donde el nivel de confianza y el margen de error toman el valor medio dentro de sus rangos estándar (NC=95% y e=5%), el tamaño de la muestra sería de 358 días. Estos valores son ideales para generar la matriz de días correctos aleatorios. Dicha matriz tendrá una dimensión de 358×2. La Tabla 5.8 recoge los resultados con los que finalmente se trabajará.

NC (%)	Z	e (%)	n (días)
95	1,96	5	358

Tabla 5.8. Valores finales del tamaño de la muestra

5.3 Métodos de muestreo probabilístico

Una vez conocido el tamaño de la muestra representativa, se elegirán al azar entre el conjunto total de datos de la radiación solar que se han registrado como correctos, los días donde se aplicará la metodología de relleno de huecos. Para llevar a cabo esta selección de datos al azar, hay que elegir una técnica de muestreo probabilístico que se ajuste a las características del proyecto.

El muestreo probabilístico es un método de muestreo que utiliza formas de métodos de selección aleatoria. El requisito más importante del muestreo probabilístico es que todos en una población tengan la misma oportunidad de ser seleccionados. Este método se puede aplicar tanto a una población como a cualquier conjunto de datos del que se quiera obtener una muestra representativa. Existen varios tipos de muestreo probabilístico [10]:

- **Muestreo aleatorio simple.** Método completamente aleatorio que se utiliza para seleccionar una muestra. Es tan fácil como asignar números a los individuos (muestra) y luego elegir de manera aleatoria números entre los componentes de la muestra a través de un proceso automatizado. Finalmente, los números que se eligen son los que se incluyen en la muestra. Hay dos tipos de muestreo aleatorio simple:
 - ❖ Muestreo con reemplazo: un elemento puede ser seleccionado más de una vez en la muestra. Para ello, se extrae un elemento de la población, se observa y se devuelve al conjunto, por lo que de esta forma se pueden hacer infinitas extracciones de la población aun siendo este finito.
 - ❖ Muestreo sin reemplazo: no se devuelve los elementos extraídos a la población hasta que no se hallan extraído todos los elementos de la población que conforman la muestra.

Para seleccionar el número de elementos de la población se puede recurrir:

- Método de lotería: solo funciona bien con pequeñas poblaciones de la muestra.
- Tabla de números aleatorios: en una tabla de números aleatorios, se selecciona una fila y una columna al azar y el valor que se obtenga de ese cruce, será el primer valor de la muestra. A partir de ese valor, se seleccionarán tal cantidad de valores como tamaño tenga la muestra. Es un proceso tedioso, consume tiempo y no se recomienda para grandes poblaciones.
- Software estadístico u hojas de cálculo: generan números aleatorios. Los elementos de las poblaciones cuyos números asignados coinciden con los números asignados por el software son incluidos en la muestra. Es el método más fácil, rápido y para cualquier tamaño de datos.
- **Muestreo estratificado.** Método en el cual una población grande se divide en dos grupos más pequeños, que generalmente no se superponen, sino que representan a toda la población en conjunto. Este método divide conjuntos de datos en grupos mutuamente exclusivos y luego utiliza un muestreo aleatorio simple para elegir miembros de los grupos.
- **Muestreo por conglomerados.** Método que selecciona de manera aleatoria a los participantes cuando están dispersos geográficamente. Por lo general, analiza a una población particular en la que la muestra consiste en varios elementos, por ejemplo, ciudad, familia, universidad, etc. Los conglomerados se seleccionan básicamente dividiendo la población mayor en varias secciones más pequeñas.
- **Muestreo sistemático.** Se enfoca en elegir a cada “enésima” persona para que sea parte de la muestra. Es una implementación extendida de la mismísima técnica de probabilidad en la cual, cada miembro de un grupo es seleccionado en periodos regulares para formar una muestra. Cuando se utiliza este método de muestreo, existe una oportunidad igual para que cada miembro de una población sea seleccionado.

Según las necesidades que requiere este proyecto, un muestreo aleatorio simple sería perfecto para elegir los valores que van a formar la muestra. Las ventajas y desventajas de este método son:

VENTAJAS**DESVENTAJAS**

Cada combinación posible de muestreo tiene igual probabilidad de ser seleccionado.	No se aprovecha del conocimiento que el investigador podría tener de la población.
Más fácil de entender y comunicar a todos.	Puede tener errores de muestreo más grandes y menos precisión que otros diseños de muestreo probabilístico con el mismo tamaño de la muestra.
Tiende a producir muestras representativas.	Si subgrupos de la población tienen intereses particulares no pueden ser incluidos con un número suficiente en la muestra.
Los procedimientos estadísticos necesarios para analizar errores de datos y de software de estadísticas son más fáciles.	Si la población está muy dispersa, los costos por recolección de datos pueden ser más altos que los de otros diseños de la muestra de probabilidad.

Tabla 5.9. Ventajas y desventajas del muestreo aleatorio simple

Como los valores de dicha muestra no pueden repetirse, el muestreo es sin reemplazo. Para ahorrar tiempo y ganar rapidez en la elección de los valores de la muestra, mediante Excel se realizará dicha elección con la función "Aleatorio.entre". El rango de esta función será igual al número total de días los cuales se ha registrado correctamente la radiación solar entre 2000 y 2019 (5336 días). El límite inferior de la función es el 1 y el superior el 5336. El tamaño de la matriz de la muestra es de 358 días. Si entre esa selección aleatoria se repitiera algún valor, se volvería a aplicar la función en Excel para generar un nuevo valor aleatorio. A continuación, se adjunta un ejemplo de una de las matrices de muestra.

Muestra CASO A.2 y CASO A.4 (n=358)				21	4553	318	2016
Muestra	Día aleatorio	Día Juliano	Año	245	4560	325	2016
257	10	10	2000	194	4562	329	2016
93	13	20	2000	180	4567	334	2016
227	65	98	2000	311	4571	338	2016
51	105	143	2000	254	4575	343	2016
310	117	155	2000	165	4597	2	2017
234	122	163	2000	222	4667	106	2017
36	131	172	2000	279	4675	114	2017
56	137	178	2000	5	4676	115	2017
94	163	205	2000	338	4679	118	2017
190	172	214	2000	88	4699	179	2017
39	173	215	2000	97	4798	326	2017
297	194	242	2000	43	4805	333	2017
13	197	245	2000	312	4815	343	2017
332	199	247	2000	126	4820	349	2017
319	208	256	2000	196	4831	362	2017
104	225	273	2000	195	4834	365	2017
230	230	281	2000	144	4839	6	2018
131	233	294	2000	85	4840	7	2018
70	258	321	2000	95	4870	45	2018
209	268	332	2000	125	4907	89	2018
239	276	340	2000	269	4935	97	2018
128	277	341	2000	40	4939	131	2018
252	322	25	2001	293	4947	145	2018
105	338	41	2001	237	4960	162	2018
335	347	50	2001	111	4969	171	2018
146	360	65	2001	290	5012	257	2018
147	366	71	2001	86	5027	274	2018
24	383	88	2001	139	5029	283	2018
192	390	95	2001	224	5057	318	2018
76	402	107	2001	243	5101	67	2019
171	432	161	2001	263	5119	85	2019
352	459	196	2001	181	5124	90	2019
140	465	202	2001	177	5149	115	2019
152	466	203	2001	281	5183	171	2019
329	474	211	2001	110	5199	187	2019
333	475	212	2001	215	5206	194	2019
89	497	237	2001	318	5210	198	2019
8	499	239	2001	122	5256	264	2019
322	514	254	2001	129	5257	265	2019
280	556	299	2001	339	5259	273	2019
81	619	364	2001	204	5267	284	2019
313	643	34	2002	26	5289	309	2019
				261	5307	327	2019

Figura 5.4. Resumen de la matriz muestra para el Caso A.2 y A.4

La matriz generada está ordenada cronológicamente desde la fecha más temprana a la más actual. En la primera columna de la matriz aparece la posición que ocupa dicho día en la matriz muestra, en la segunda el etiquetado correspondiente al día aleatorio generado por la función de Excel, en la tercera el día juliano al que corresponde ese día aleatorio y finalmente, el año al que pertenece el día juliano.

Como ya se explicará en apartados posteriores, esta matriz engloba tanto el Caso A.2 como el Caso A.4 porque la metodología a seguir para completar los datos faltantes de radiación solar en la base de datos es la misma. La única diferencia es si el hueco de datos se encuentra al principio o al final del día.

Una vez obtenidos los valores que van a formar la muestra representativa de todos los días donde la radiación solar se ha registrado correctamente, se simularán huecos artificiales en cada uno de esos días donde se aplicará cada uno de los métodos de relleno de huecos desarrollados en el proyecto anterior [1].

5.4 Generación de huecos

Para poder evaluar la incertidumbre de las medidas generadas por las metodologías aplicadas en cada caso, hay que generar huecos de las variables de radiación artificialmente en los archivos diarios. A excepción del caso de días descartados, la generación de huecos se realiza rellenando con ceros los valores de las variables en el tramo considerado erróneo. De esta forma, se simula un hueco sin aparecer ningún error por la falta de datos en el programa informático. Atendiendo a cada caso, la manera de proceder para generar los huecos varía.

5.4.1 Días corregibles: Caso A

Para la generación de huecos en este caso no hay distinción entre días claros o no claros, el procedimiento es el mismo. Mediante un programa informático desarrollado en MATLAB se generan los huecos. Los huecos generados van a tener una longitud de 59 minutos divididos en intervalos de cinco segundos. El hueco estará formado por 708 filas de cinco segundos donde se colocarán los ceros.

En primer lugar hay que identificar la posición del orto si el hueco a generar se encuentra al principio del día o del ocaso si se encuentra al final del día de cada archivo diario. Los valores del orto y del ocaso se han calculado de forma teórica en un archivo adicional de nombre 'duraciondia.xlsx'. Ambos datos se encuentran en formato de hora solar.

	A	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Día del año	Lat.GTER (°)	Long.GTER (°)	ws (GTER)	HS	Et	Γ	GMTps	GMTss	Sod(h)	
2	1	37,4	-6,01	71,0493855	4,7366257	-2,9044224	0	17,18569941	7,712448007	9,473251399	12,4490737
3	2	37,4	-6,01	71,13049634	4,74203309	-3,35165313	0,98630137	17,19856064	7,714494463	9,484066179	12,4565276
4	3	37,4	-6,01	71,21867186	4,747911457	-3,79462309	1,97260274	17,21182184	7,715998928	9,495822914	12,4639104
5	4	37,4	-6,01	71,31383253	4,754255502	-4,2329199	2,95890411	17,22547083	7,716959829	9,508511005	12,4712153
6	5	37,4	-6,01	71,4158932	4,761059547	-4,66613676	3,945205479	17,23949516	7,717376066	9,522119093	12,4784356
7	6	37,4	-6,01	71,52476325	4,76831755	-5,09387291	4,931506849	17,2538821	7,717246998	9,5366351	12,4855645
8	7	37,4	-6,01	71,64034694	4,776023129	-5,51573406	5,917808219	17,2686187	7,716572439	9,552046258	12,4925956
9	8	37,4	-6,01	71,76254362	4,784169575	-5,93133283	6,904109589	17,28369179	7,715352639	9,56833915	12,4995222
10	9	37,4	-6,01	71,8912481	4,792749873	-6,34028919	7,890410959	17,29908803	7,71358828	9,585499747	12,5063382
11	10	37,4	-6,01	72,02635088	4,801756725	-6,74223082	8,876712329	17,31479391	7,711280455	9,60351345	12,5130372
12	11	37,4	-6,01	72,16773847	4,811182565	-7,13679361	9,863013699	17,33079579	7,708430662	9,622365129	12,5196132
13	12	37,4	-6,01	72,31529373	4,821019582	-7,52362198	10,84931507	17,34707995	7,705040784	9,642039164	12,5260604
14	13	37,4	-6,01	72,46889615	4,831259743	-7,90236929	11,83561644	17,36363256	7,701113078	9,662519487	12,5323728
15	14	37,4	-6,01	72,62842216	4,841894811	-8,27269825	12,82191781	17,38043978	7,69665016	9,683789621	12,538545
16	15	37,4	-6,01	72,79374546	4,852916364	-8,63428124	13,80821918	17,39748772	7,69165499	9,705832728	12,5445714
17	16	37,4	-6,01	72,96473733	4,864315822	-8,98680069	14,79452055	17,4147625	7,686130856	9,728631644	12,5504467
18	17	37,4	-6,01	73,14126691	4,876084461	-9,32994942	15,78082192	17,43225028	7,680081363	9,752168922	12,5561658
19	18	37,4	-6,01	73,32320155	4,888213437	-9,66343098	16,76712329	17,44993729	7,673510413	9,776426874	12,5617238
20	19	37,4	-6,01	73,51040707	4,900693805	-9,98695994	17,75342466	17,4678098	7,666422194	9,80138761	12,567116
21	20	37,4	-6,01	73,70274807	4,913516538	-10,3002622	18,73972603	17,48585424	7,658821166	9,827033076	12,5723377
22	21	37,4	-6,01	73,90008821	4,926672547	-10,6030754	19,7260274	17,50405714	7,650712043	9,853345094	12,5773846
23	22	37,4	-6,01	74,10229048	4,940152699	-10,895149	20,71232877	17,52240518	7,642099784	9,880305397	12,5822525
24	23	37,4	-6,01	74,3092175	4,953947833	-11,1762446	21,69863014	17,54088524	7,632989576	9,907895667	12,5869374
25	24	37,4	-6,01	74,52073174	4,968048783	-11,4461363	22,68493151	17,55948439	7,623386823	9,936097565	12,5914356
26	25	37,4	-6,01	74,73669578	4,982446386	-11,7046109	23,67123288	17,5781899	7,61329713	9,964892771	12,5957435
27	26	37,4	-6,01	74,95697256	4,997131504	-11,9514681	24,65753425	17,59698931	7,602726297	9,994263008	12,5998578
28	27	37,4	-6,01	75,18142559	5,012095039	-12,1865205	25,64383562	17,61587038	7,591680303	10,02419008	12,6037753
29	28	37,4	-6,01	75,40991917	5,027327945	-12,4095943	26,63013699	17,63482118	7,580165294	10,05465589	12,6074932

Figura 5.5. Archivo Excel con valores teóricos del orto y ocaso diario

Una vez seleccionado el día donde se va a generar el hueco, hay que identificar los valores del orto o el ocaso en la matriz de datos de radiación. Encontrados estos valores, se obtienen las coordenadas de las posiciones del orto y el ocaso. Se rellenan con ceros la fila de estos valores y las 708 siguientes (orto) o las 708 anteriores (ocaso). Finalmente, se generará un hueco de duración de 59 minutos a rellenar por la metodología de cada caso.

5.4.2 Días corregibles: Caso B

Las medidas de la radiación directa normal son incorrectas. A través de un nuevo programa informático desarrollado en MATLAB, se rellena con ceros las posiciones de la componente directa normal de radiación.

5.4.3 Días corregibles: Caso C

Este caso se trata de un combinación de los dos anteriores, por ello, se aplican ambos procedimientos conjuntamente.

5.4.4 Días corregibles: Caso D

Para este caso se actúa de la misma manera que el caso B con la diferencia de rellenar con ceros las posiciones de la componente de radiación global horizontal al ser la variable incorrecta.

5.4.5 Días descartados

En este caso no se genera ningún hueco al descartarse los días de este grupo. Directamente se procede a la sustitución de el día en cuestión al ser inexistentes sus archivos o poseer medidas erróneas.

5.5 Metodologías y relleno de huecos artificiales

En este apartado se describirán las metodologías propuestas para cada caso en función del tipo de hueco que presente el día. Estas metodologías serán las que se simulen en los días correctos y así obtener nuevos valores artificiales y poder deducir el error de cada metodología. Solo se hablará de las metodologías para los días corregibles y descartados debido que los correctos ya presentan medidas de radiación válidas.

Aunque se describen todas las metodologías para cada uno de los casos, en este trabajo solo se analizará y se verificará su validez las aplicadas a los casos: Caso A.2, Caso B, Caso C, Caso D y Caso días descartados.

5.5.1 Días corregibles

5.5.1.1 Días corregibles: Caso A

Para la corrección de estos días se aplican dos metodologías diferentes en función de si el día es claro o no claro, independientemente si el hueco se encuentra al principio o final del día. Por ello, existirán dos grupos diferentes, el primero engloba el Caso A.1 y el Caso A.3 con la metodología para días claros y el segundo el Caso A.2 y el Caso A.4 con la metodología para días no claros.

A. Método aplicado a días claros: Caso A.1 y Caso A.3

Según lo comentado anteriormente, no existe distinción entre si el hueco se encuentra al principio o al final del día, por ello, se describirá el proceso seguido cuando el hueco se encuentra al principio del día. De forma análoga se rellenará el hueco si este se encuentra al final.

En primer lugar, hay que identificar la hora del orto para el día estudiado. Conocida esta hora, se comprueba el primer instante que se han recogido medidas en ese día. Con esta información y sabiendo que los valores de las medidas se registran cada cinco segundos, se puede calcular el número de registros necesarios para el relleno de ese hueco en el archivo:

$$N_{líneas} = \frac{(\text{primhora} - \text{orto}) \times 3600}{5} = (\text{primhora} - \text{orto}) \times 720 \quad (\text{Ec. 4})$$

A continuación, hay que generar un nuevo vector tiempo cuya primera entrada coincide con el valor del orto. Para el resto de valores se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{hora}(j) = \text{hora}(j - 1) + \left(\frac{5}{3600}\right) \quad (\text{Ec. 5})$$

Si el hueco se encontrara al final del día, el último valor del vector correspondería al valor del ocaso.

Antes de continuar con el siguiente paso, es necesario conocer los valores del tiempo solar verdadero, el ángulo horario (ω), el ángulo cenital (θ), la altura y el índice de claridad instantáneo (M_t). El índice de claridad instantáneo se calcula según:

$$M_t = \frac{I_g 0}{I_0} \quad (\text{Ec. 6})$$

El valor de la radiación global horizontal utilizado en la ecuación anterior es el primero que se registra correctamente en el día estudiado. Este valor será constante para todo el hueco. La irradiación extraterrestre se obtiene de forma teórica y varía a lo largo del día.

Una vez determinadas estas variables, se procede al cálculo de las variables de radiación solar asociadas al intervalo del hueco. En primer lugar se calcula la radiación global horizontal instantánea como:

$$I_g = I_0 \times A \times \sin(\alpha) \quad (\text{Ec. 7})$$

Siendo A:

$$A = \frac{M_t(1)}{\sin(\alpha(1))} \quad (\text{Ec. 8})$$

$M_t(1)$ hace referencia al índice de claridad instantáneo correspondiente al primer valor registrado del día y $\sin(\alpha(1))$ al seno de la altura solar correspondiente a ese primer valor registrado.

Seguidamente, se calcula el valor de las constantes CB y CA:

$$CB = \frac{\log\left[\frac{I_{bn}(20)}{I_{bn}(1)}\right]}{[\sec(\theta(1)) - \sec(\theta(20))]} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$CA = \frac{I_{bn}(1)}{\exp[-CB \times \sec(\theta(1))]} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde $I_{bn}(1)$ e $I_{bn}(20)$ hace referencia al primer y veinteavo valor de radiación directa normal registrado correctamente en el día analizado, respectivamente.

Ya se tiene toda la información necesaria para el cálculo de la radiación directa normal (I_{bn}). Para ello, se utilizará el modelo para días despejados de ASHRAE (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado) [3].

$$I_{bn} = CA \times \exp[-CB \times \sec(\theta)] \quad (\text{Ec. 11})$$

Se han determinado todos los valores de radiación global horizontal y radiación directa normal para el hueco del día estudiado. Existe la posibilidad de la aparición de picos en los instantes en torno al orto y el ocaso al evaluar el modelo. En estas situaciones, se descartan los valores obtenidos según el modelo de ASHRAE cuando la altura solar es inferior a 5°. Se linealiza desde el orto hasta el primer valor registrado correctamente con altura superior a 5°. Las condiciones que se imponen en el orto son que todas las variables de radiación sean nulas.

B. Método aplicado a días no claros: Caso A.2 y Caso A.4

El proceso aplicado a días no claro es mucho más simplificado que el anterior. Para el Caso A.2, se genera el vector tiempo del hueco de la misma forma que el método anterior y se linealiza entre el orto y el primer instante que se registran medidas para obtener los valores de la radiación global horizontal y radiación directa normal de ese hueco. Si el hueco se encuentra al final del día, Caso A.4, se linealiza entre el último instante que se recogen medidas y el ocaso. También se imponen las condiciones de todas las variables de radiación sean nulas en el orto.

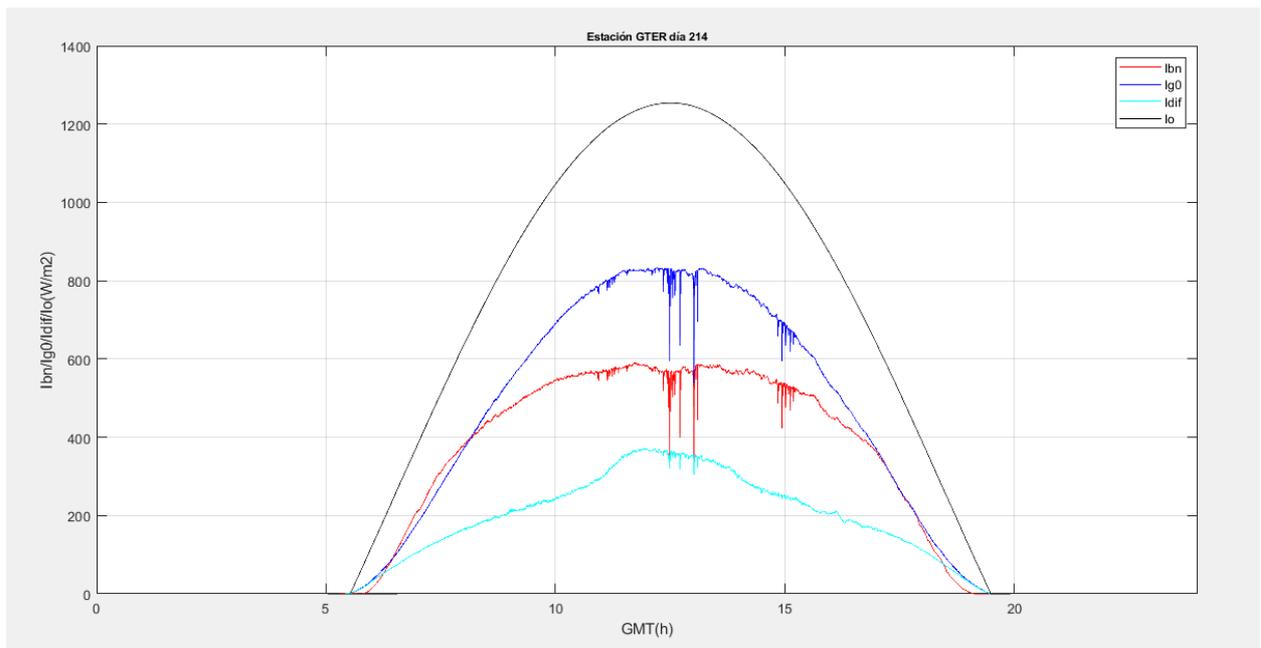


Figura 5.6. Gráfica diaria correspondiente al día 214 del año 2000, día nublado con directa normal y global horizontal estimada al principio del día, Caso A.2

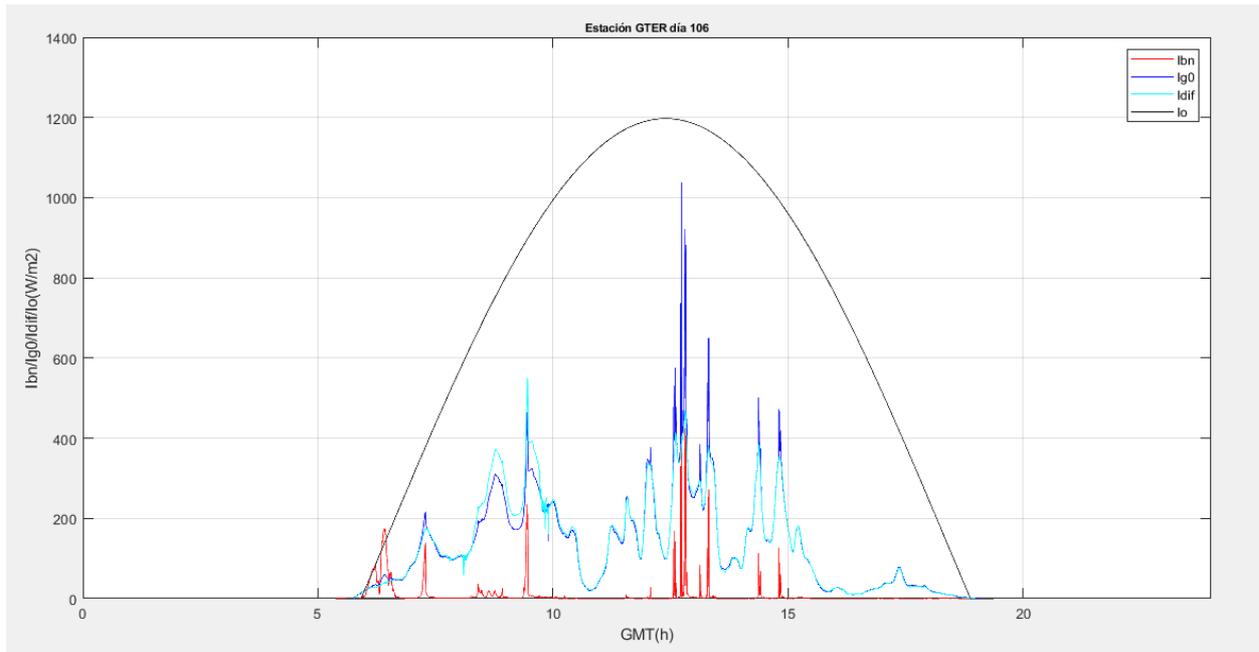


Figura 5.7. Gráfica diaria correspondiente al día 106 del año 2004, día cubierto con directa normal y global horizontal estimada al principio del día, Caso A.2

5.5.1.2 Días corregibles: Caso B

Como ya se ha detallado anteriormente, en este grupo se engloban aquellos días donde los registros de radiación global horizontal son correctos y completos y los de radiación directa normal son inexistentes o incompletos. El objetivo de este caso es corregir los valores de radiación directa normal.

Al igual que en el caso anterior, se calculan las variables de radiación solar como la altura solar (α), el ángulo horario (ω) o el índice de claridad instantáneo (M_t), siendo:

$$M_t = \frac{I_g}{I_0} \quad (\text{Ec. 12})$$

En segundo lugar, se hace uso de las correlaciones M_d - M_t obtenidas de forma experimental. Éstas permiten la generación sintética de los valores de radiación directa. Las correlaciones han sido extraídas del proyecto [1] y son definidas por la siguiente ecuación:

$$M_d = p_1 \times (M_t)^2 + p_2 \times M_t + p_3 \quad (\text{Ec. 13})$$

Los coeficientes en cada caso vienen determinados en función del mes del año y del tipo de día en función de la nubosidad.

	DÍAS DESPEJADOS			DÍAS NUBLADOS			DÍAS CUBIERTOS		
	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3
ENERO	0,5565	-1,687	1,093	0,8031	-2,254	1,453	-1,395	0,1232	1,022
FEBRERO	0,9407	-2,296	1,340	0,2054	-1,599	1,350	-1,094	-0,1017	1,049
MARZO	0,6636	-1,948	1,234	0,2829	-1,700	1,352	-0,9648	-0,1226	1,043
ABRIL	0,5001	-1,622	1,075	0,9336	-2,350	1,451	-0,4673	-0,6693	1,126
MAYO	0,7657	-2,095	1,291	0,3842	-1,771	1,345	-0,3125	-0,7993	1,150
JUNIO	0,6557	-2,014	1,296	0,4238	-1,881	1,379	-0,03367	-1,180	1,232
JULIO	0,7721	-2,192	1,369	0,2621	-1,634	1,284	0,06205	-1,185	1,188
AGOSTO	0,4852	-1,863	1,268	0,7417	-2,159	1,411	-0,04233	-1,119	1,200
SEPTIEMBRE	0,6407	-1,951	1,250	0,4913	-1,894	1,349	-0,5784	-0,5487	1,119
OCTUBRE	1,327	-2,949	1,596	0,9419	-2,29	1,401	-0,9437	-0,2346	1,059
NOVIEMBRE	0,4964	-2,247	1,531	0,4037	-1,719	1,282	-0,9796	-0,2751	1,062
DICIEMBRE	0,2416	-1,241	0,925	0,8649	-2,283	1,424	-1,369	0,1332	1,010

Tabla 5.10. Coeficientes de correlaciones M_d - M_t

Conocido el valor de M_d , se procede a calcular el valor de la radiación directa normal mediante la siguiente ecuación:

$$I_{bn} = I_g \times \frac{(1 - M_d)}{\cos(\theta)} \quad (\text{Ec. 14})$$

Como ocurre en los casos ya descritos, debido a los problemas que existen en los instantes en torno al orto y el ocaso, hay que linealizar los intervalos donde la altura solar sea menor de 5° . También se imponen las condiciones de hacer las variables de radiación solar nulas en el orto y el ocaso.

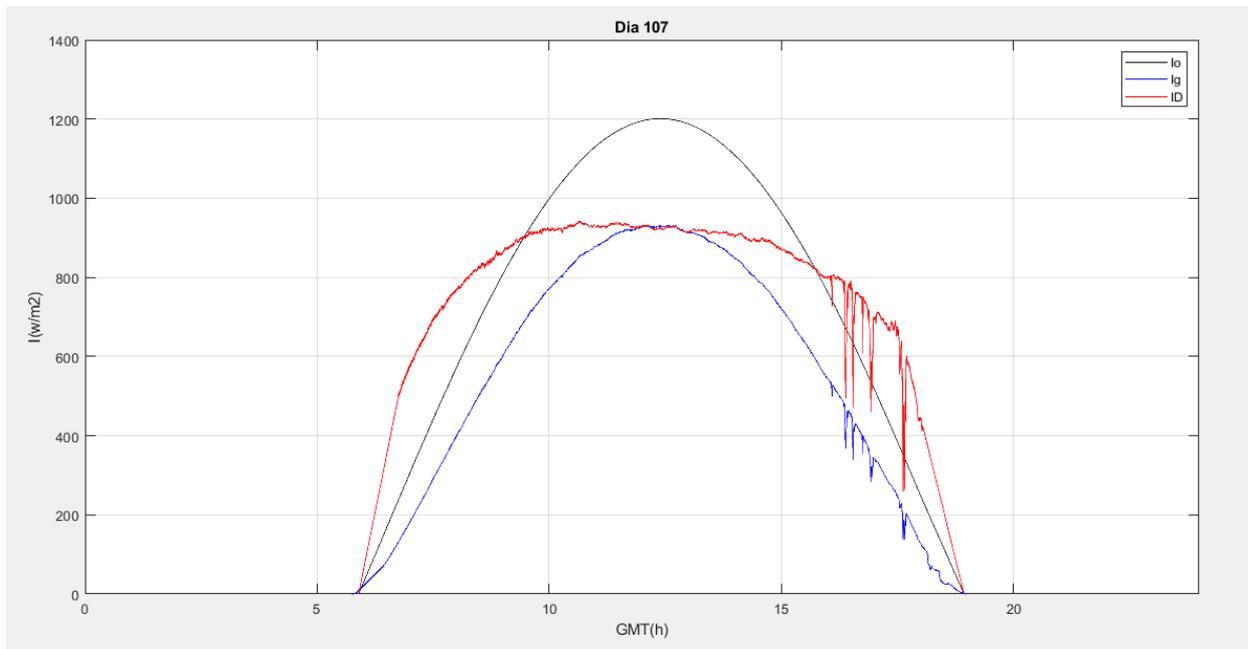


Figura 5.8. Gráfica diaria correspondiente al día 107 del año 2011, día despejado con directa normal estimada, Caso B

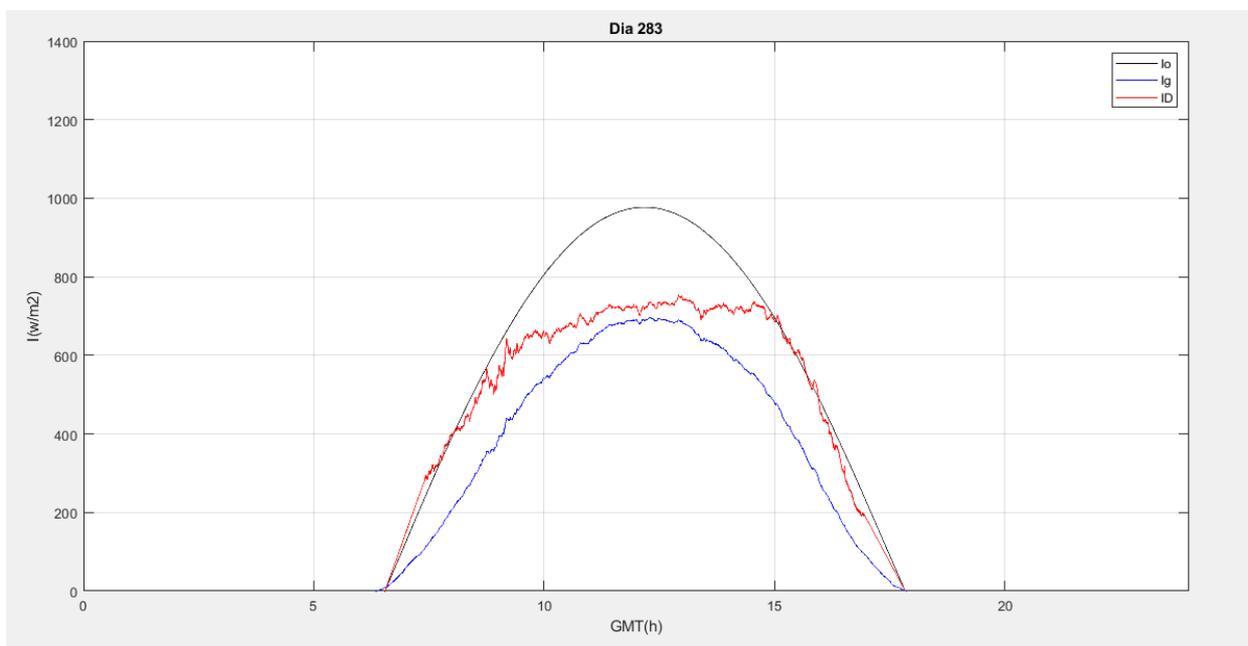


Figura 5.9. Gráfica diaria correspondiente al día 283 del año 2017, día nublado con directa normal estimada, Caso B

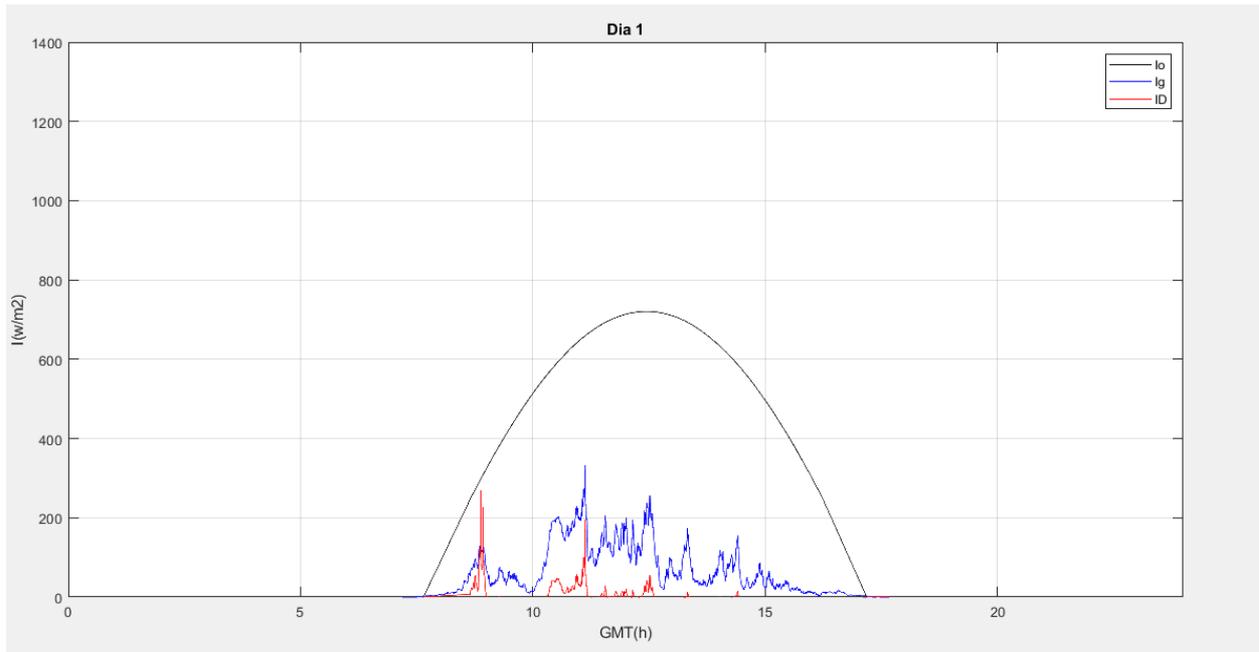


Figura 5.10. Gráfica diaria correspondiente al día 1 del año 2001, día cubierto con directa normal estimada, Caso B

5.5.1.3 Días corregibles: Caso C

Los días pertenecientes a este grupo se caracterizan por medidas correctas de radiación global horizontal pero con un hueco al principio o final del día menor a una hora y valores de radiación directa normal incorrectos o inexistentes.

Para este grupo no es necesario añadir una nueva metodología para completar los registros de radiación ya que se trata de una combinación de los casos anteriores. En primer lugar, se realiza la corrección de la variable de radiación directa normal aplicando las correlaciones M_d-M_t según se detalló en el Caso B y finalmente, se completa el hueco de radiación global horizontal con la metodología correspondiente en función si el día es claro o no claro, explicado en el Caso A.

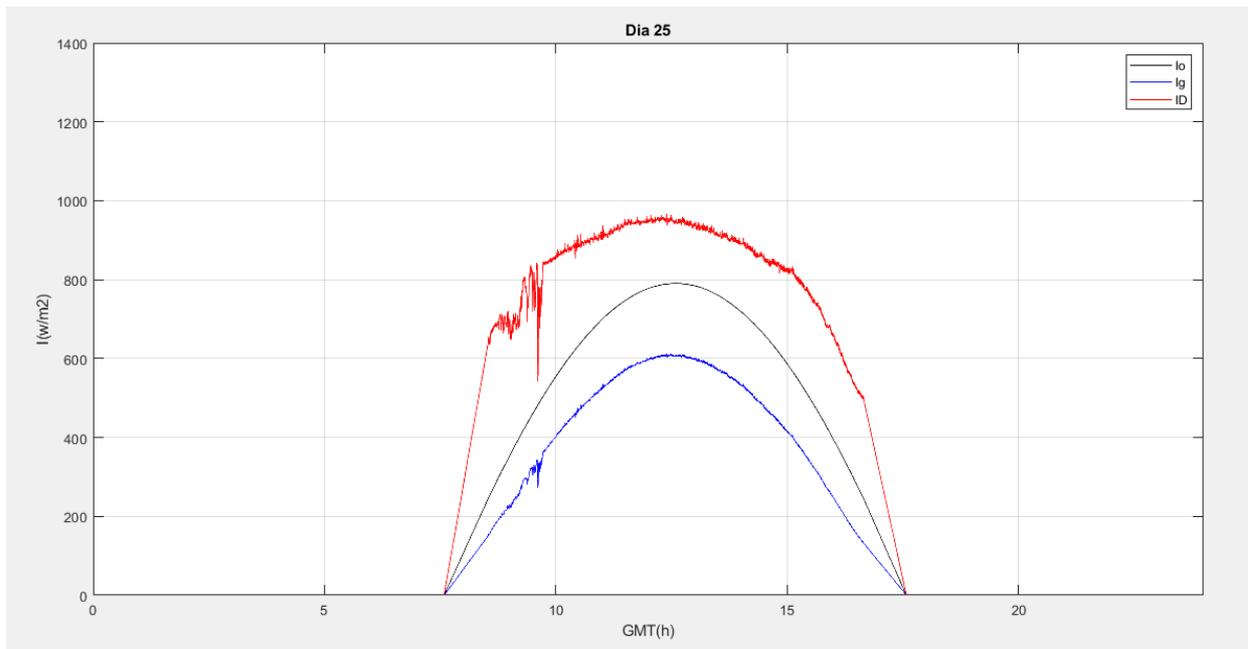


Figura 5.11. Gráfica diaria correspondiente al día 25 del año 2003, día despejado con directa normal y global horizontal estimadas, Caso C

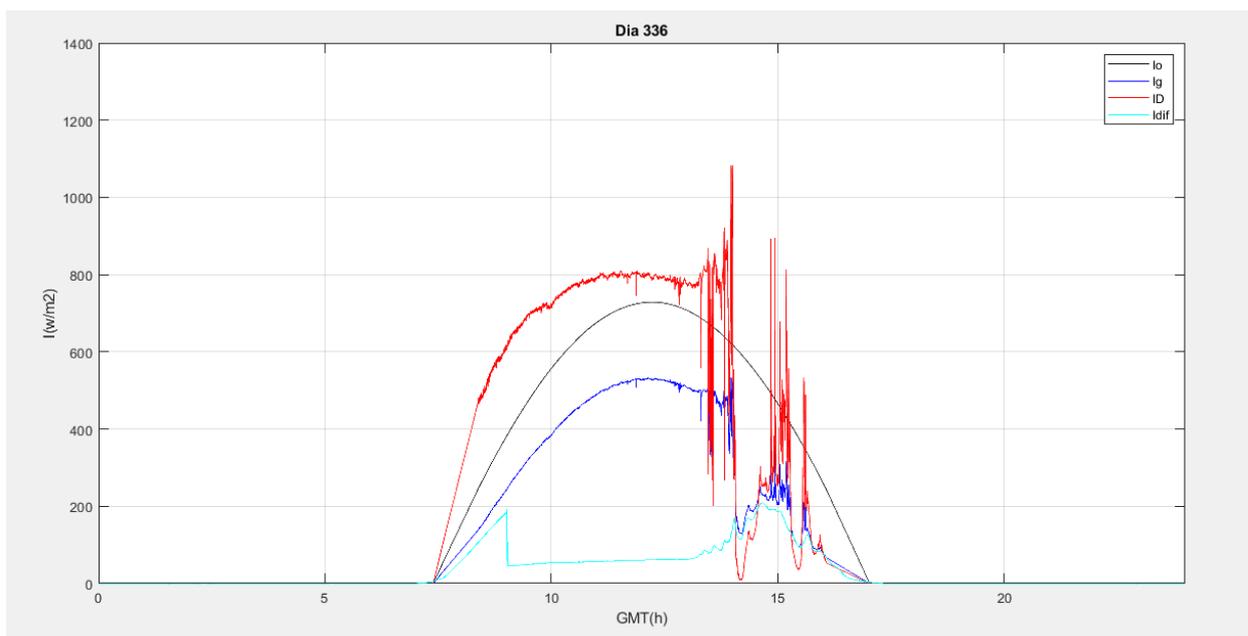


Figura 5.12. Gráfica diaria correspondiente al día 336 del año 2014, día nublado con directa normal y global horizontal estimadas, Caso C

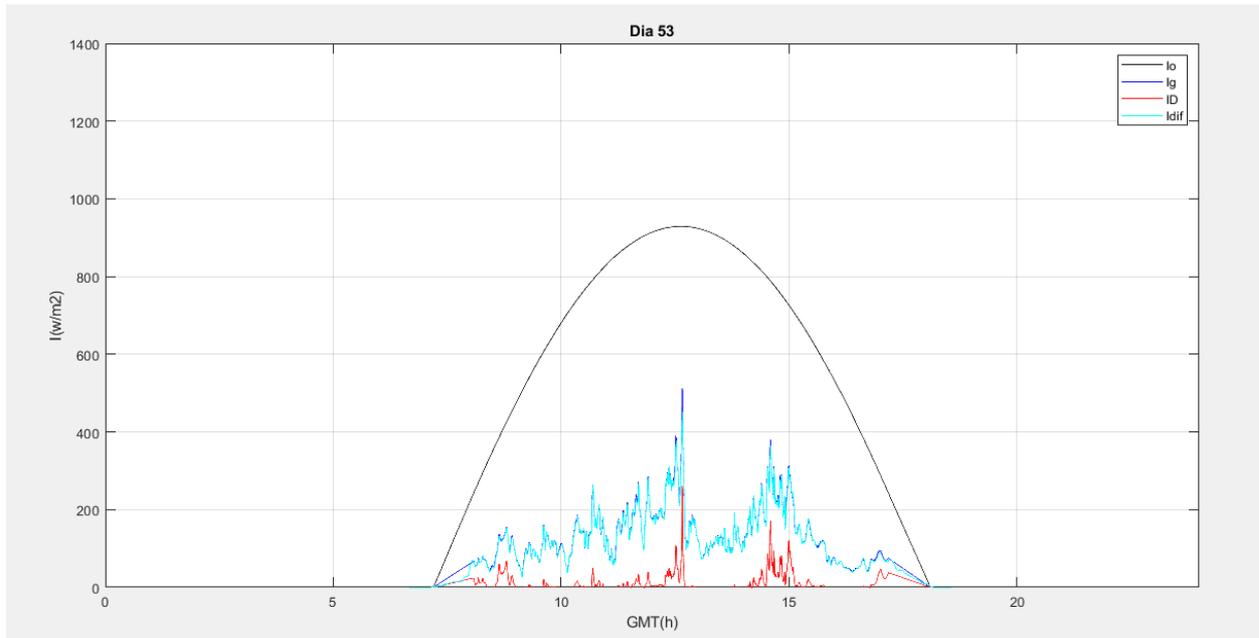


Figura 5.13. Gráfica diaria correspondiente al día 53 del año 2007, día cubierto con directa normal y global horizontal estimadas, Caso C

5.5.1.4 Días corregibles: Caso D

Este último grupo recoge los días en los que la radiación directa normal se ha medido de forma correcta y completa y la radiación global horizontal se ha registrado incorrectamente o no existen esos valores.

Durante los primeros años del periodo de estudio, entre el año 2000 y el 2009, este caso es el que menor probabilidad tiene de ocurrencia debido que la fiabilidad de las medidas de la radiación global horizontal es mayor que las de la radiación directa normal. Aunque en los últimos años, desde el 2016 hasta el 2019, se convierte en uno de los casos más probables de ocurrencia.

Para completar el registro de los días, se aplica la ecuación algebraica que relaciona las tres componentes en las que se divide la radiación.

$$I_{g0} = I_{d0} + I_{bn} \times \cos(\theta) \quad (\text{Ec. 15})$$

Para poder aplicar esta ecuación hay que conocer los valores de la radiación difusa horizontal y que estos sean correctos. Debido a la insuficiencia de equipos especializados para el registro de la variable difusa horizontal en los primeros años de la estación, existen días en los que el registro está incompleto o es inexistente. En estos casos, se opta por sustituir el día completo por otro de la misma estación, cuyos valores de radiación directa diaria acumulada sean similares. En proyectos posteriores al de Elena Pérez Aparicio [1], se ha realizado la corrección de esta variable en el periodo 2016-2019 [11]. A partir del año 2016, se podría coger los valores de difusa horizontal corregidos en lugar de sustituir el día en cuestión.

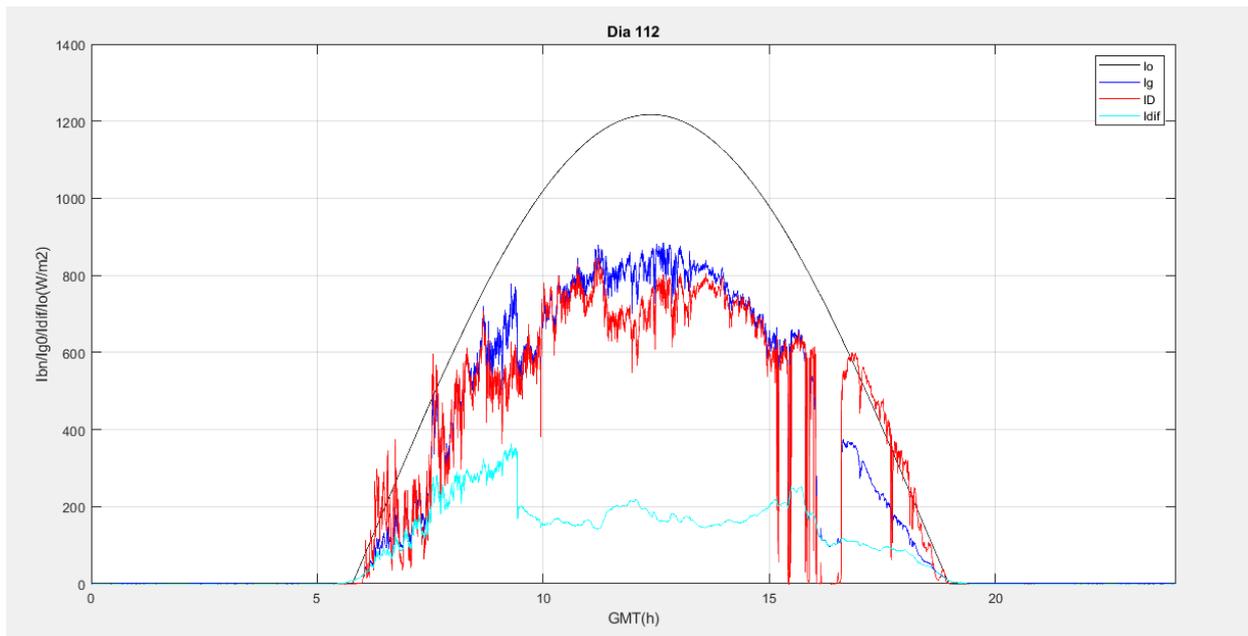


Figura 5.14. Gráfica diaria correspondiente al día 112 del año 2013, día despejado con global horizontal estimada, Caso D

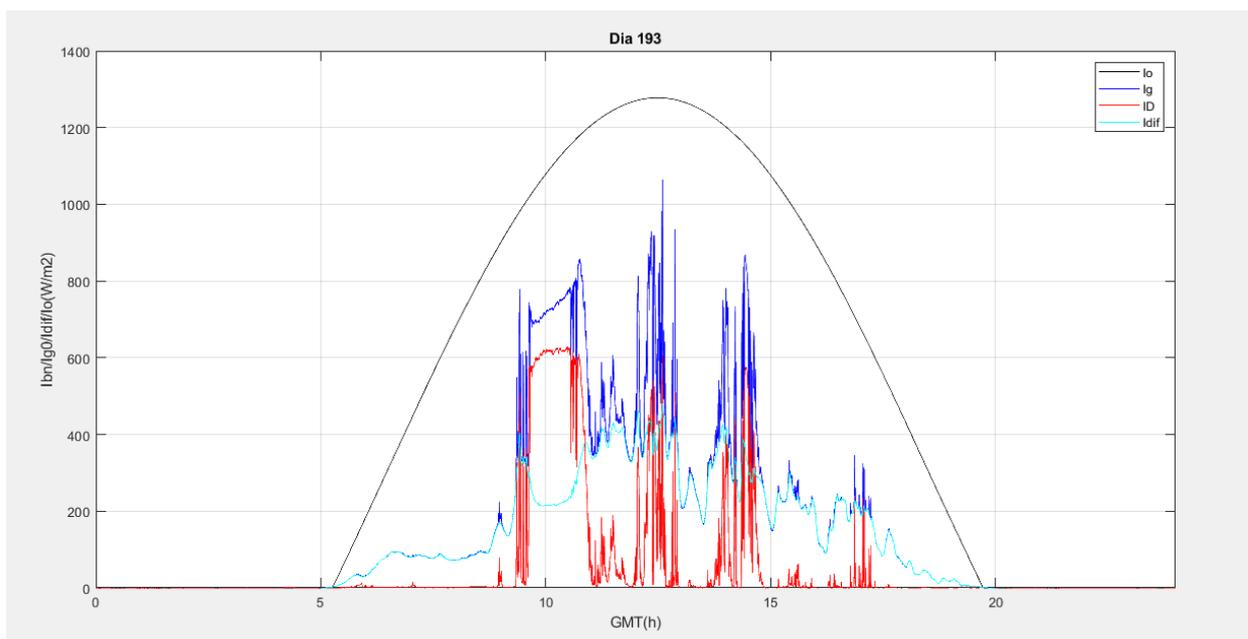


Figura 5.15. Gráfica diaria correspondiente al día 193 del año 2019, día nublado con global horizontal estimada, Caso D

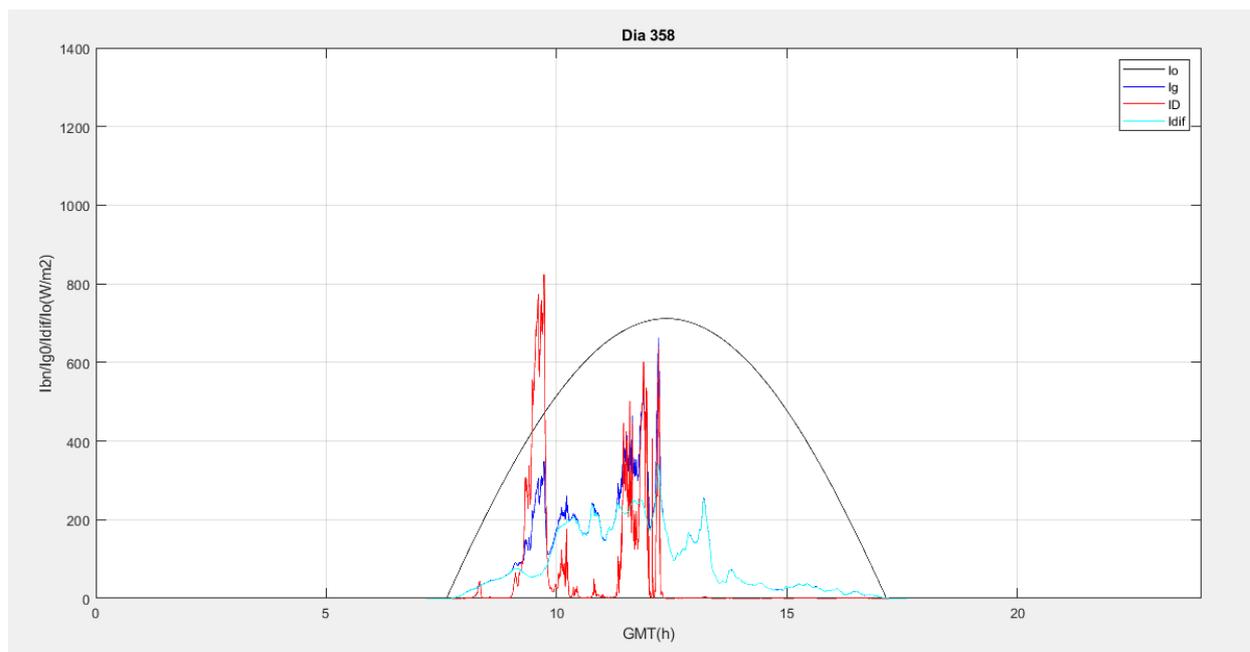


Figura 5.16. Gráfica diaria correspondiente al día 358 del año 2001, día cubierto con global horizontal estimada, Caso D

Debido a la aleatoriedad de la matriz muestra seleccionada para este caso, hay días donde la variable difusa horizontal es incorrecta lo que imposibilita la aplicación de la Ec. 15. Se ha optado por sustituir esos días con la radiación difusa horizontal incorrecta por otros donde esta variable es correcta y válida. A continuación, se muestra una tabla con los días incorrectos de la matriz muestra y el día por el que se ha sustituido dicho día en cuestión.

Día incorrecto	Día sustituido	Día incorrecto	Día sustituido
1 (2000)	74 (2000)	28 (2013)	21 (2013)
9 (2000)	98 (2000)	114 (2014)	112 (2014)
25 (2000)	115 (2000)	63 (2015)	6 (2015)
35 (2000)	145 (2000)	74 (2015)	10 (2015)
238 (2000)	253 (2000)	82 (2015)	37 (2015)
280 (2000)	311 (2000)	97 (2015)	93 (2015)
246 (2001)	206 (2001)	172 (2015)	94 (2015)
247 (2001)	227 (2001)	184 (2015)	124 (2015)
235 (2002)	266 (2002)	203 (2015)	137 (2015)
132 (2003)	146 (2003)	206 (2015)	145 (2015)
247 (2005)	235 (2005)	222 (2015)	147 (2015)
280 (2007)	291 (2007)	230 (2015)	149 (2015)

1 (2008)	28 (2008)	252 (2015)	161 (2015)
157 (2008)	118 (2008)	298 (2015)	166 (2015)
179 (2008)	145 (2008)	311 (2015)	213 (2015)
230 (2008)	238 (2008)	316 (2015)	201 (2016)
350 (2008)	349 (2008)	328 (2015)	222 (2016)
98 (2009)	77 (2009)	340 (2015)	236 (2016)
138 (2009)	132 (2009)	343 (2015)	322 (2016)
149 (2009)	248 (2009)	357 (2015)	339 (2016)
94 (2011)	75 (2011)	359 (2015)	351 (2016)
123 (2011)	160 (2011)	59 (2016)	61 (2016)
230 (2011)	225 (2011)	71 (2018)	54 (2018)
212 (2012)	220 (2012)		

Tabla 5.11. Sustitución de días incorrectos de la matriz muestra

5.5.2 Días descartados

Siguiendo la clasificación realizada en el Capítulo 5.1.2, son cinco tipos de días los que se engloban en este grupo, pero en todos se aplica la misma metodología de corrección ya que sus medidas o no se han generado o presentan huecos de larga duración inaceptables como para considerar ese día corregible.

Para el periodo entero a analizar, desde el año 2000 hasta el 2019, se va a emplear la misma fuente de información para obtener los datos de radiación. Esta fuente de información será la base de datos de las estaciones meteorológicas de SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) [12]. En esta, se pueden consultar datos de radiación solar de diversas estaciones radiométricas y meteorológicas. Los parámetros que se miden son: temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, precipitación, radiación, temperatura del suelo y evapotranspiración de referencia (E_{t0}). La base de datos del SIAR aporta el valor diario acumulado de radiación global horizontal.

En el proyecto [1] se trabajó con tres fuentes de información diferentes.

- Base de datos del SIAR → Periodo 1: 01/01/2002 – 31/12/2009
- Base de datos de la estación Inabensa → Periodo 2: 16/03/2000 – 31/12/2001
- Base de datos procedentes de medidas de satélite → Periodo 3: 01/01/2000 – 15/03/2000

Estas dos últimas bases de datos no serán analizadas en este proyecto. En primer lugar, la estación meteorológica de Inabensa posee una base de datos muy limitada y únicamente recoge datos en ese periodo de tiempo. Al ser muy estrecho el rango de tiempo, esta base de datos no se considerará en este proyecto. Finalmente, las medidas de satélite son la fuente de información menos fiable existente y también se suma que el periodo de tiempo, el cual no existen medidas, es muy pequeño. Así mismo, esta fuente de información tampoco se tendrá en cuenta para este proyecto.

Entre las diferentes estaciones propiedad del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [12], se han

seleccionado tres de ellas debido a su cercanía con la estación radiométrica del GTER. Estas estaciones son: la estación de la Rinconada (8,5 km), la estación de Guillena (12,5 km) y la estación de Sanlúcar la Mayor (22 km). Con estas tres estaciones elegidas, se realizará un proceso de comparación de cada una de ellas con la del GTER para cada año del periodo 2000-2019. Se representan los valores acumulados diarios de radiación global horizontal (H_g0) en MJ/m^2 de cada una de las estaciones seleccionadas del SIAR frente a los de la estación del GTER. Aquella que presente un comportamiento más parecido a la estación analizada, será la candidata para la sustitución de valores. Este análisis se realizará mediante el cálculo del error para cada una de ellas, eligiendo la que se corresponda con el valor más bajo. También hay que tener en cuenta la ordenada en el origen, a ser posible, que tenga el valor más bajo. Si este es demasiado grande, la curva estaría desplazada paralelamente a la curva $y=x$ (bisectriz) alejándose de los valores más próximos a la estación del GTER. En este caso, es mejor seleccionar la siguiente estación que presente menor error siendo los datos más precisos.

Teniendo en cuenta que estas estaciones comenzaron a registrar medidas a lo largo de los años 2000 y 2001. En la Tabla 5.12 se recoge la fecha exacta de la primera medida recogida por cada una de las estaciones.

ESTACIONES METEOROLÓGICAS	La Rinconada	Guillena	Sanlúcar la Mayor
Primer día registrado	15/11/2000	05/04/2001	15/11/2000

Tabla 5.12. Primer día de medidas registrado por cada estación analizada

Desde el 1 de enero del año 2000 hasta el 14 de noviembre del 2000, no existen datos de radiación disponibles de ninguna estación meteorológica. Los días comprendidos en este periodo de tiempo que hayan sido seleccionados en la matriz muestra para realizar la simulación de la metodología, serán eliminados del estudio debido a su pequeña franja temporal con respecto al periodo global de análisis. Con la función de Excel 'aleatorio.entre' se volverán a generar otros días aleatorios que dispongan de datos meteorológicos. Como hasta el día 5 de abril del año 2001, la estación meteorológica de Guillena no registra datos, los días seleccionados hasta esta fecha, serán analizados únicamente por la estaciones de La Rinconada y de Sanlúcar la Mayor. A partir de este día, ya hay registros para las tres estaciones elegidas, por ello, el resto de días serán analizados por todas ellas.

A continuación, se muestra la comparación para el año 2013 y el resto entre el periodo 2000-2019 se adjuntan en el Anexo I.

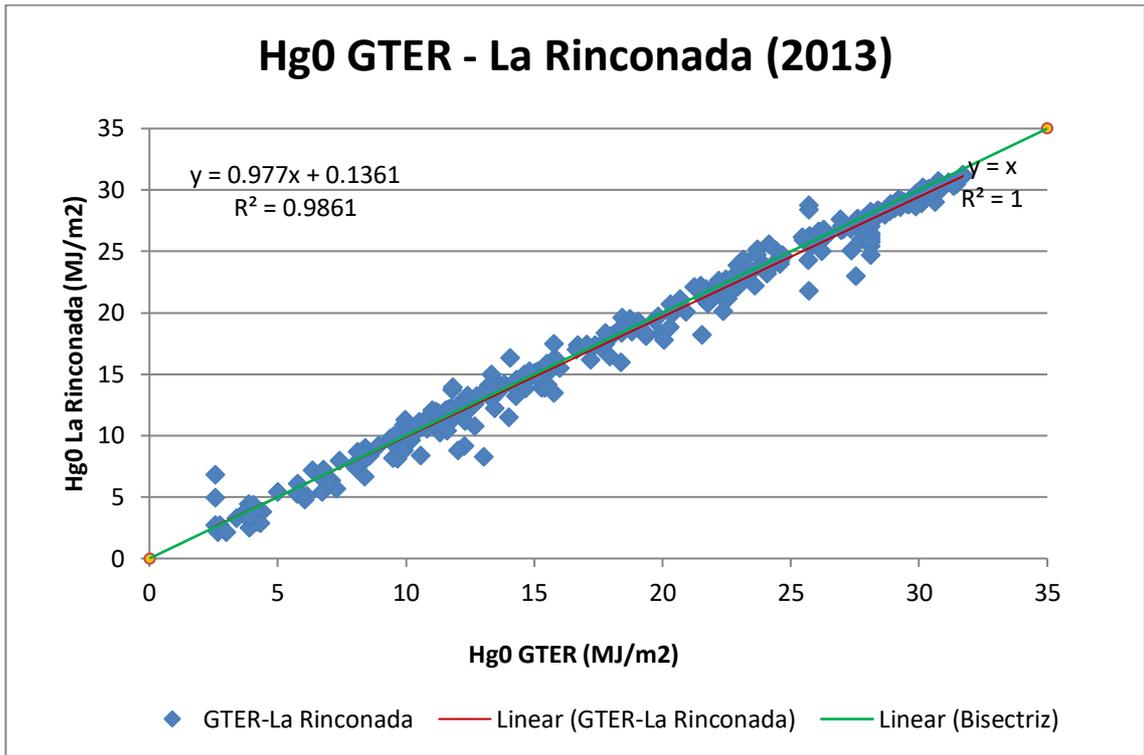


Figura 5.17. Comparación Hg0 GTER - La Rinconada año 2013

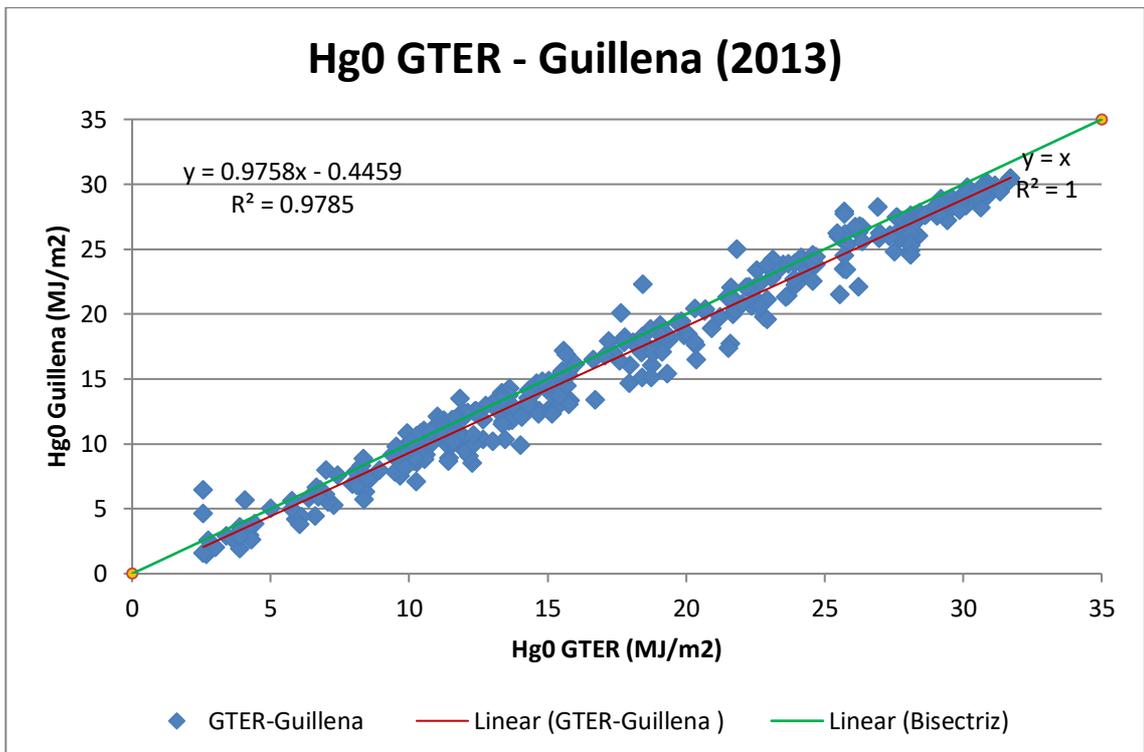


Figura 5.18. Comparación Hg0 GTER - Guillena año 2013

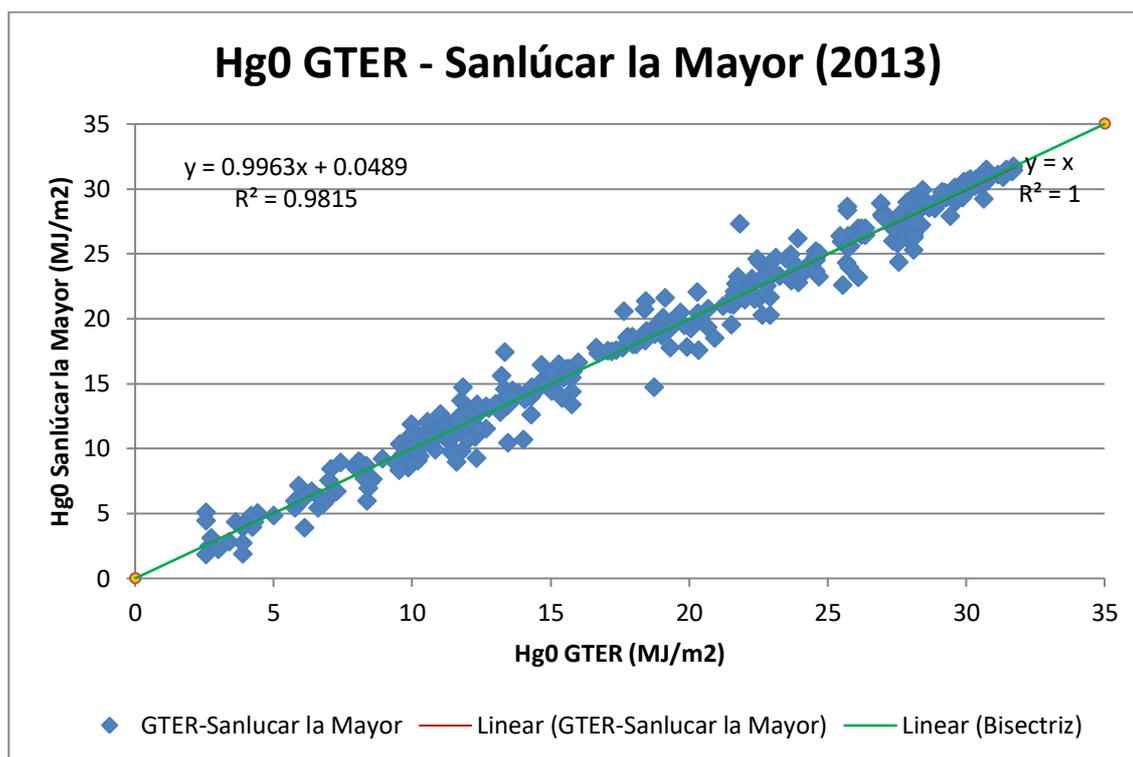


Figura 5.19. Comparación GTER - Sanlúcar La Mayor año 2013

La Tabla 5.13 recoge el error resultado de la comparación de la estación SIAR-estación del GTER para el año 2013.

2013	La Rinconada	Guillena	Sanlúcar la Mayor
Error (%)	2,3	2,5	0,4
R²	0,986	0,978	0,981
Ordenada en el origen	0,136	-0,445	0,048

Tabla 5.13. Error estaciones SIAR-estación GTER para el año 2002

Para este año, la estación de Sanlúcar la Mayor se selecciona como referencia al ser la que presenta un menor error y su ordenada en el origen es pequeña. Este proceso se realiza en todos los años analizados del periodo, desde 2000 hasta 2019. En el proceso de sustitución de días, se escala el valor diario de radiación de los datos del SIAR, para adaptarlo a la estación del GTER obteniendo un valor objetivo. Seguidamente, se compara ese valor objetivo con los valores de radiación global acumulada de la estación del GTER para días perfectos desde tres días posteriores y anteriores, al día descartado, a lo largo de todos los años para elegir el día que sustituye el hueco. Se debe cumplir como condición adicional que la diferencia entre el valor conseguido y el objetivo sea inferior al 5%. Si en algún caso excepcional, no se encuentra un valor que cumpla con la condición descrita, se amplía la búsqueda a cinco días, reflejándolo en el archivo correspondiente.

Una vez realizada la sustitución de los días descartados de la estación del GTER, hay que destacar algunos casos donde el error es sumamente alto y por ello, no cumple con las condiciones impuestas. Estos días registraron unos valores de radiación muy bajos, por ello, la diferencia de error se eleva a medida que disminuyen estos valores. Para descartar que esas medidas de radiación no son incorrectas, se compararon los valores registrados en esos días en cuestión de las tres estaciones de SIAR. Se comprueba que en todas ellas

las medidas de radiación recogidas son muy similares y con un valor muy bajo. Este hecho se debe al tratarse de días muy nublados con una alta cobertura de nubes que impiden el paso de los rayos de sol. , Estos días descartados han sido sustituidos por días cuyo rango sea de cinco días anteriores y posteriores al día en cuestión y cuyo error absoluto esté dentro del rango +/- 0,50MJ/m². Este criterio ha sido tomado al realizar una inspección en la base de datos del GTER de los días próximos a los descartados y no haber encontrado ninguno que cumpla con las condiciones descritas anteriormente.

Día Juliano	Día sustituido	Valor estación (MJ/m ²)	Valor objetivo (MJ/m ²)	Valor conseguido (MJ/m ²)	Error absoluto (MJ/m ²)
5 (2001)	9 (2018)	1,52 (Sanlúcar la Mayor)	1,726	2,096	0,37
86 (2003)	87 (2014)	2,76 (La Rinconada)	2,859	2,550	-0,309
87 (2004)	87 (2014)	5,15 (Guillena)	2,833	2,550	-0,283
43 (2010)	40 (2014)	1,86 (La Rinconada)	2,096	2,330	0,234

Tabla 5.14. Sustitución de días descartados con valores muy bajos de radiación solar

Dentro de este caso, hay cinco días que requieren mención especial. Estos días no cumplen con la condición de presentar un error absoluto dentro del rango impuesto, ni aún sustituyéndolos por el valor de radiación más bajo registrado dentro del periodo de años estudiado. Por este motivo, todos estos días han sido sustituidos por el mismo día, el día 353 del año 2019. A continuación se muestra la sustitución de estos días y su error absoluto.

Día Juliano	Día sustituido	Diferencia días (días)	Valor estación (MJ/m ²)	Valor objetivo (MJ/m ²)	Valor conseguido (MJ/m ²)	Error absoluto (MJ/m ²)
357 (2000)	353 (2019)	4	2,21 (La Rinconada)	0	0,935	0,935
363 (2000)	353 (2019)	10	1,73 (La Rinconada)	0	0,935	0,935
299 (2004)	353 (2019)	54	2,70 (Guillena)	0,140	0,935	0,795
344 (2008)	353 (2019)	9	1,57 (La Rinconada)	0	0,935	0,935
354 (2019)	353 (2019)	1	2,18 (Sanlúcar la Mayor)	0,305	0,935	0,630

Tabla 5.15. Días descartados con errores elevados por bajos valores de radiación acumulada

Aquellos días marcados en rosa en el Anexo II, ha sido necesario ampliar el rango de búsqueda a cinco días anteriores y posteriores al día analizado para que su diferencia de error sea menor al 5%. Se ha obtenido un resultado satisfactorio al haber encontrado días en ese rango para sustituirlo. También hay algunos días, los marcados en verde, donde ni con ese rango de cinco días se ha conseguido reducir la diferencia de error por debajo del 5%. Para estos días es necesaria la aplicación de una condición adicional a las ya detalladas para conseguir esa reducción. Para estos días puntuales, se buscará el día más cercano al día a sustituir entre el periodo de años completo dentro de la base de datos del GTER cuya diferencia de error sea menor al 5%. Se detallará la diferencia de días existente entre el día descartado y el día sustituido. En la Tabla 5.16 se recoge toda la información de estos días.

Día Juliano	Día sustituido	Diferencia días (días)	Valor estación (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
323 (2000)	292 (2010)	31	11,57 (La Rinconada)	18,062	17,337	-4,014
237 (2001)	248 (2015)	11	9,94 (Guillena)	9,669	9,363	-3,165
97 (2002)	88 (2003)	9	8,86 (La Rinconada)	8,942	9,288	3,869
222 (2007)	260 (2002)	38	11,89 (La Rinconada)	11,439	11,828	3,401
244 (2011)	290 (2015)	46	5,59 (Sanlúcar la Mayor)	5,434	5,641	3,809
43 (2016)	31 (2004)	12	3,36 (Guillena)	2,813	2,687	-4,479
239 (2018)	250 (2014)	11	12,29 (La Rinconada)	13,094	13,348	2,018

Tabla 5.16. Sustitución de días descartados aplicando la condición adicional

Existe un día, el día 164 del año 2012, donde se alcanza el valor de radiación solar más alto entre el periodo de años 2000-2019. No existe ningún día que pueda sustituirlo y cumpla con las condiciones descritas, ni dentro del rango de cinco días anteriores y posteriores ni fuera. Como consecuencia, se ha optado por sustituir este día por el siguiente día con el valor de radiación más alto. La Tabla 5.17 refleja todos los detalles de la sustitución de este día.

Día Juliano	Día sustituido	Valor estación (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
164 (2012)	150 (2013)	31,74 (La Rinconada)	33,628	31,720	-5,674

Tabla 5.17. Sustitución del días descartado con el máximo valor de radiación del periodo 2000-2019

5.6 Distribución de tipos de días en las matrices muestra

Cada caso analizado consta de una matriz muestra aleatoria de días correctos sobre los cuales se simulan los distintos tipos de huecos aplicando las metodologías vistas con anterioridad. Como consecuencia de dicha aleatoriedad, es importante conocer el tipo de días (despejado, nublado o cubierto) que forman parte de cada matriz. En la Tabla 5.18 se muestra la distribución de los tipos de días que forman parte de cada caso.

Casos	% días despejados	% días nublados	% días cubiertos
Caso A.2	0	86,59	13,41
Caso B	51,40	37,99	10,61
Caso C	50	37,71	12,29
Caso D	48,88	41,06	10,06
Caso días descartados	50	41,06	8,94

Tabla 5.18. Distribución de tipos de días para cada caso

Para obtener una mejor visión de la distribución de días, se representa de manera gráfica la tabla anterior, Figura 5.20.

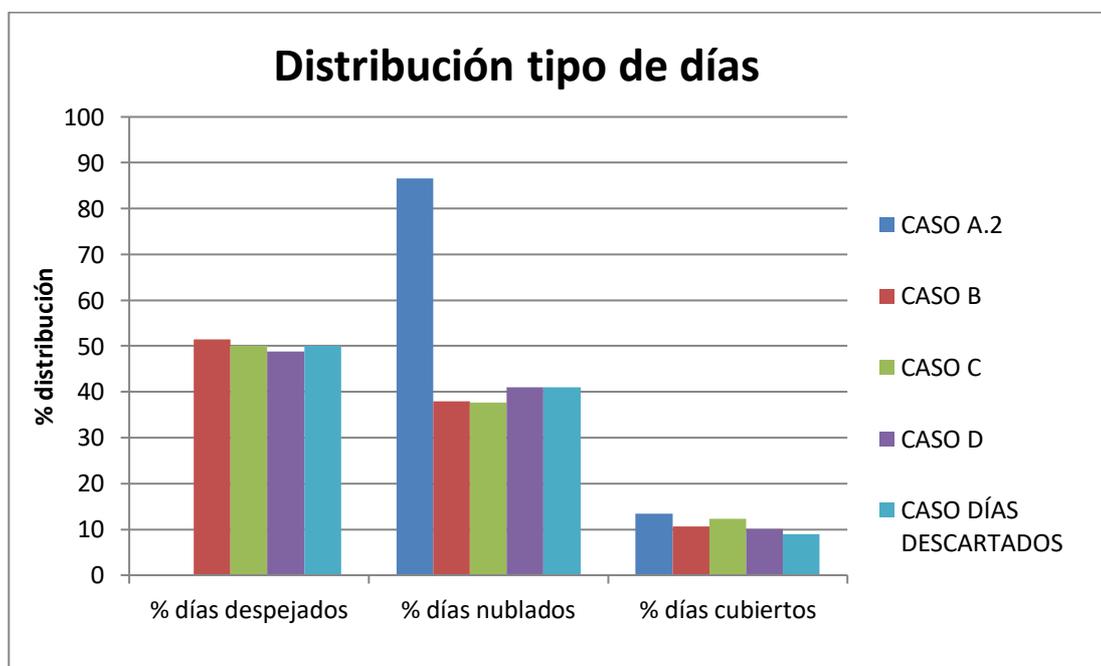


Figura 5.20. Distribución gráfica de tipos de días

Como es lógico, el Caso A.2 no posee ningún día despejado en su matriz muestra porque únicamente pertenecen los días no claros. El porcentaje de días cubiertos en todos los casos es menor porque la base de

datos de la estación radiométrica del GTER posee muy pocos días con estas características al estar situada en Sevilla.

Para un análisis más detallado, a continuación, se representan los tipos de días que poseen los casos por año.

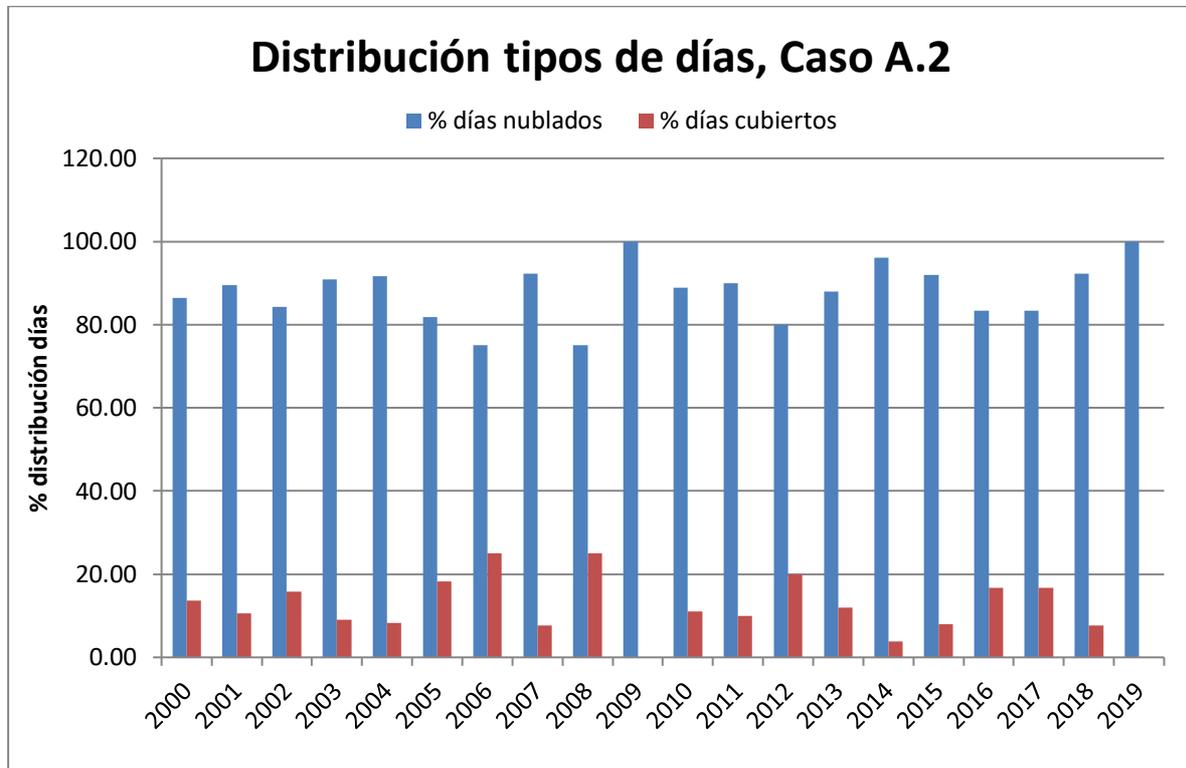


Figura 5.21. Distribución tipos de días por año, Caso A.2

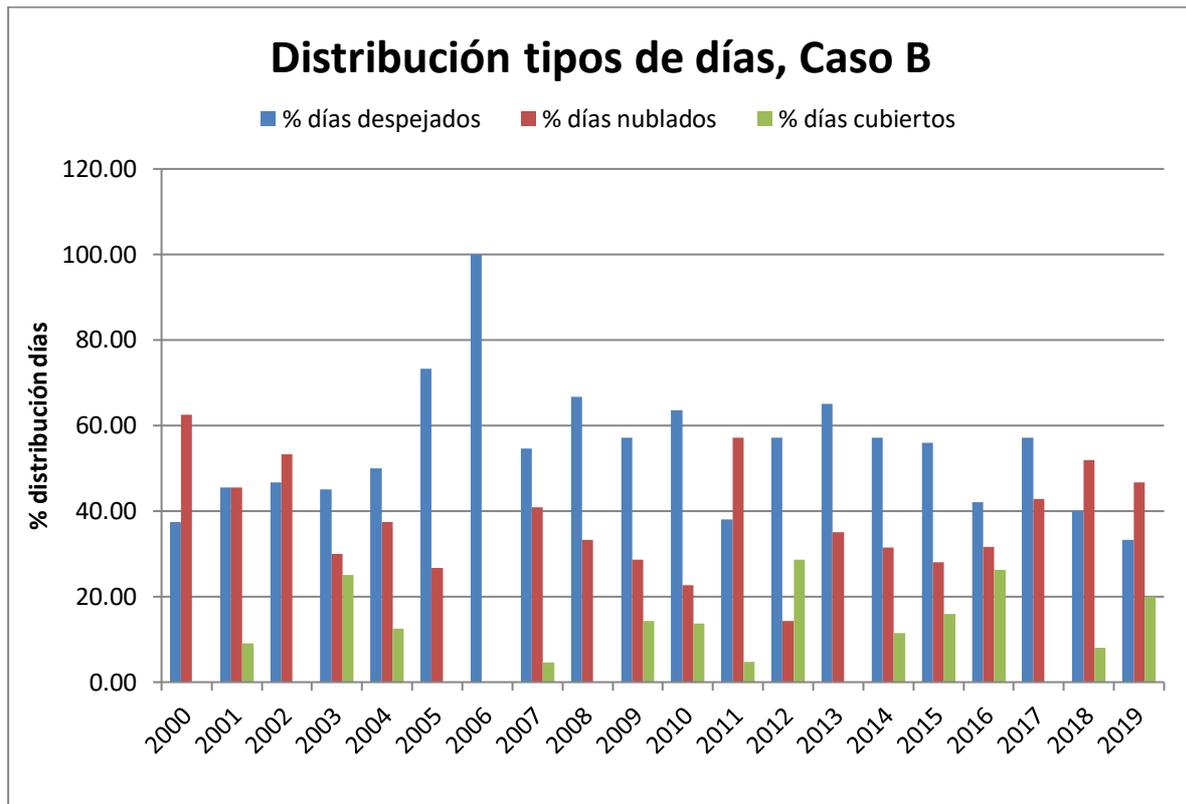


Figura 5.22. Distribución tipos de días por año, Caso B

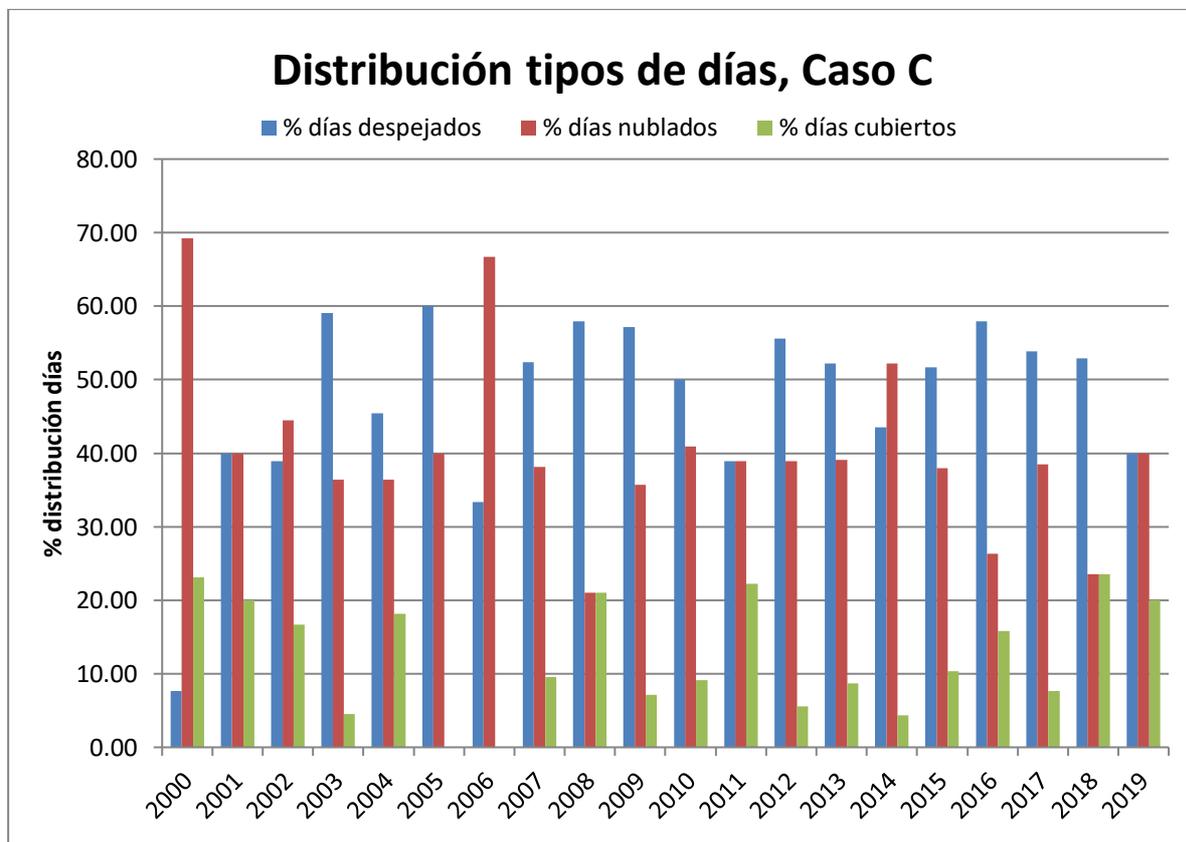


Figura 5.23. Distribución tipos de días por año, Caso C

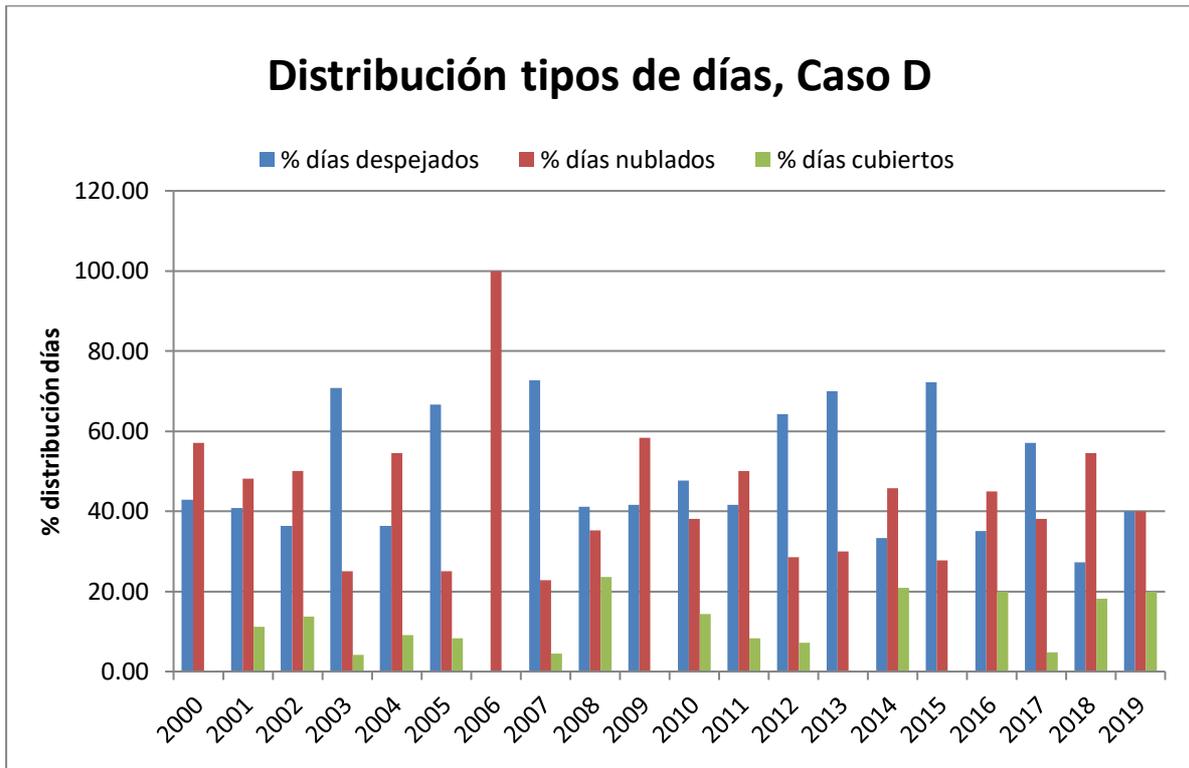


Figura 5.24. Distribución tipos de días por año, Caso D

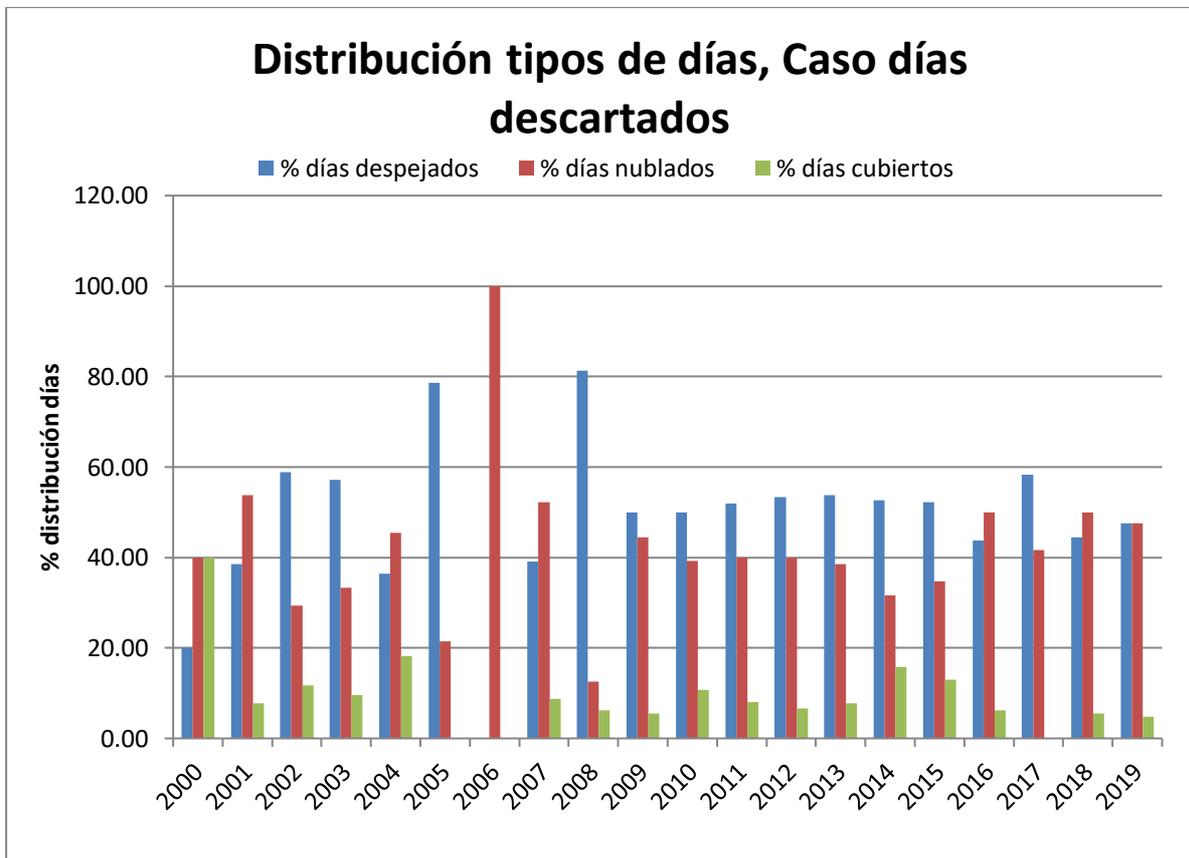


Figura 5.25. Distribución tipos de días por año, Caso días descartados

Este análisis servirá de apoyo para justificar los cálculos de errores futuros y conseguir el objetivo del proyecto, determinar la incertidumbre de cada metodología aplicada.

5.7 Casos especiales

A pesar de la validez de las metodologías aplicadas para la generación de las componentes de la radiación solar, existe un caso que necesita ser analizado en profundidad. Existe un problema generalizado al obtener la radiación directa normal mediante las correlaciones M_d-M_t . Los días con numerosas perturbaciones, normalmente los días nublados, presentan este tipo de problema. Inspeccionando estos días, aparecen valores de radiación directa normal físicamente imposibles que necesitan una corrección. Se aplica un filtro de cielos despejados porque teóricamente, los valores máximos de radiación directa normal se alcanzan en los días despejados.

$$ID_{\text{correlación}} > ID_{\text{filtro}} \rightarrow ID = ID_{\text{filtro}}$$

$$ID_{\text{correlación}} \leq ID_{\text{filtro}} \rightarrow ID = ID_{\text{correlación}}$$

El modelo empleado para la corrección de los picos es el modelo AB, detallado en el Proyecto Fin de Carrera de Elena Pérez Aparicio [1]. El objetivo de este modelo es realizar una especie de “peinado” que elimine y reduzca esos picos de radiación. Este modelo simula una curva de cielo claro para filtrar los valores que queden por encima de la curva. Solo hay que aplicarlo a los intervalos de tiempo donde se producen esos picos. Las ecuaciones fundamentales de este modelo son:

$$A = -5,0445 \times 10^{-10} \times d_n^3 + 1,2413 \times 10^{-6} \times d_n^2 - 3,9955 \times 10^{-4} \times d_n + 0,9092 \quad (\text{Ec. 16})$$

$$B = -1,2199 \times 10^{-8} \times d_n^3 + 2,7126 \times 10^{-6} \times d_n^2 + 5,6153 \times 10^{-4} \times d_n + 0,2298 \quad (\text{Ec. 17})$$

$$I_{bn} = I_{cs} \times E_0 \times \frac{A}{1 + (B \times m_R)} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$m_R = \frac{1}{\text{sen}(\alpha) + 0,50572 \times (57,29578 \times \alpha + 6,07995)^{-1,6364}} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

- I_{bn} : Irradiancia directa normal (W/m^2)
- I_{cs} : Constante solar (W/m^2) = 1367 W/m^2
- E_0 : Corrección distancia Tierra-Sol (rad)

- m_R : masa de aire relativa (Kasten y Young – 1898)
- α : altura solar (rad)
- d_n : día juliano

A continuación, se realiza un análisis de los días dentro de la matriz muestra de cada caso a los que se le ha aplicado el filtro descrito.

	CASO B	CASO C
Total días aplicación filtro	145	154
% días aplicación filtro	40,50	43,02
% días despejados	27,59	27,27
% días nublados	58,62	61,69
% días cubiertos	13,79	11,04

Tabla 5.19. Distribución de tipos de días a los que se ha aplicado el filtro de días claros

Dentro del porcentaje de días donde se ha aplicado el filtro, el mayor porcentaje corresponde con los días nublados. Para el Caso B, este porcentaje es del 58,62% y en el Caso C, 61,69%. Como era de esperar, estos días son los que mayores perturbaciones presentan en sus gráficas diarias al impedir el paso de la radiación las nubes. En los días cubiertos, el nivel de nubosidad aumenta, cubriendo el cielo con una mayor cobertura de nubes, disminuyendo el porcentaje de radiación que llega hasta la superficie terrestre. Este hecho verifica que el menor porcentaje de días a los que hay que aplicar el filtro sean los cubiertos, para el Caso B un 13,79% y para el Caso C un 11,04%. Por último, un día despejado puede poseer una ligera cobertura de nubes en algún momento del día, pudiendo llegar a tener alguna irregularidad en su representación gráfica.

En las Figura 5.26 y Figura 5.27, se representa gráficamente la distribución de días en cada caso para una mejor visualización.

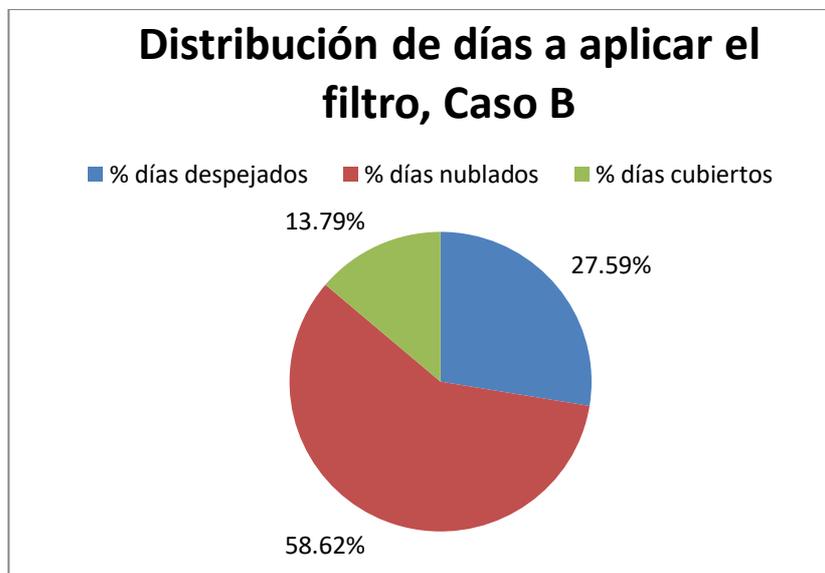


Figura 5.26. Distribución de días a aplicar el filtro, Caso B

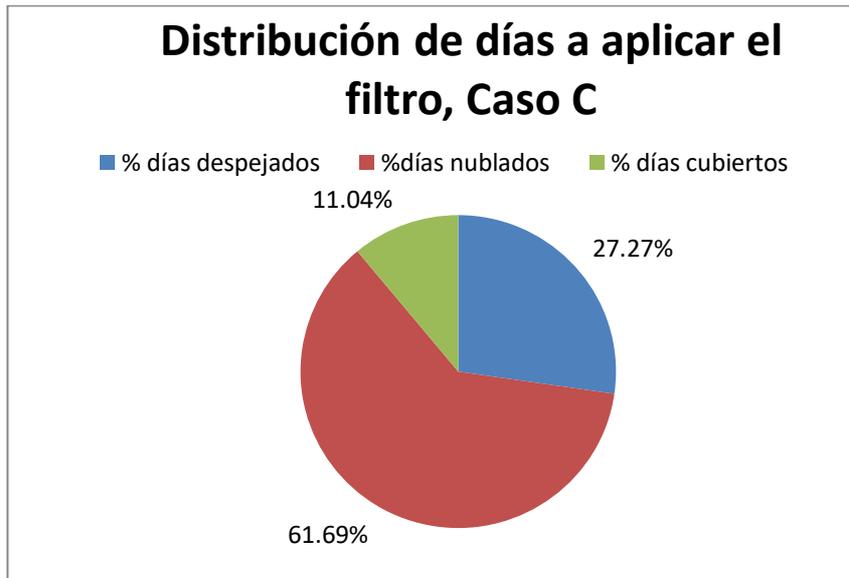


Figura 5.27. Distribución de días a aplicar el filtro, Caso C

Aplicando este filtro a los días que presentan grandes picos de los Casos B y C, a continuación, se muestran gráficamente varios ejemplos de su aplicación y efectividad, eliminando los picos de radiación en cada caso.

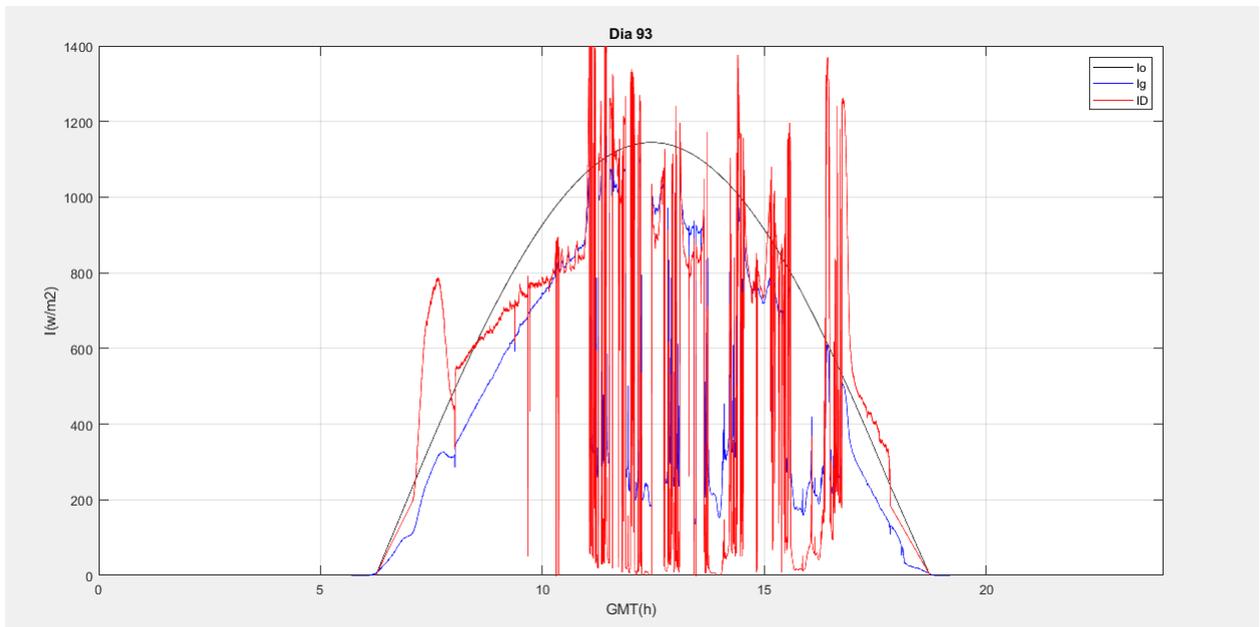


Figura 5.28. Gráfica diaria correspondiente al día 93 del año 2004, día cubierto sin aplicación del filtro, Caso B

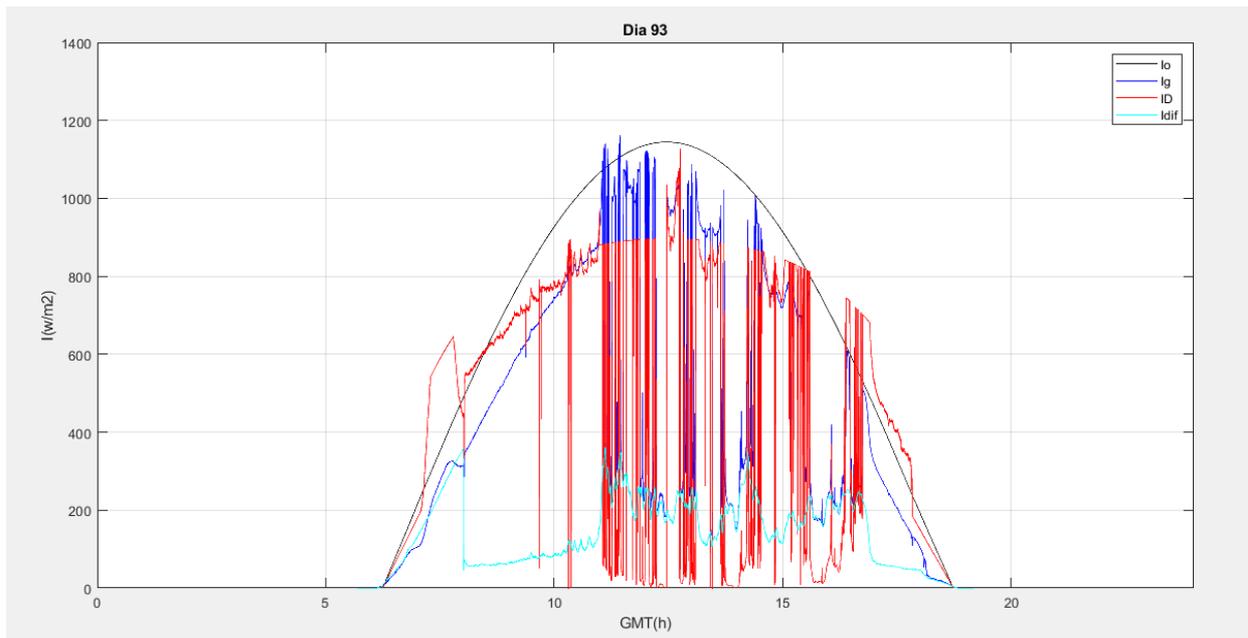


Figura 5.29. Gráfica diaria correspondiente al día 93 del año 2004, día cubierto con aplicación del filtro, Caso B

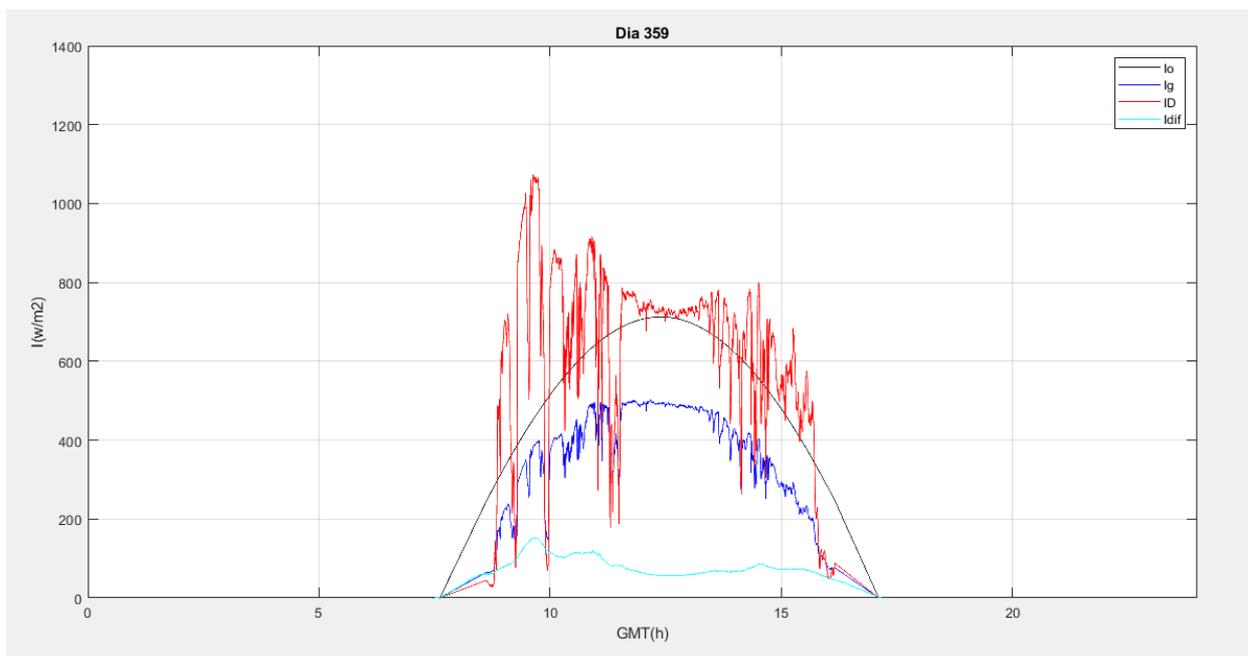


Figura 5.30. Gráfica diaria correspondiente al día 359 del año 2019, día nublado sin aplicación del filtro, Caso C

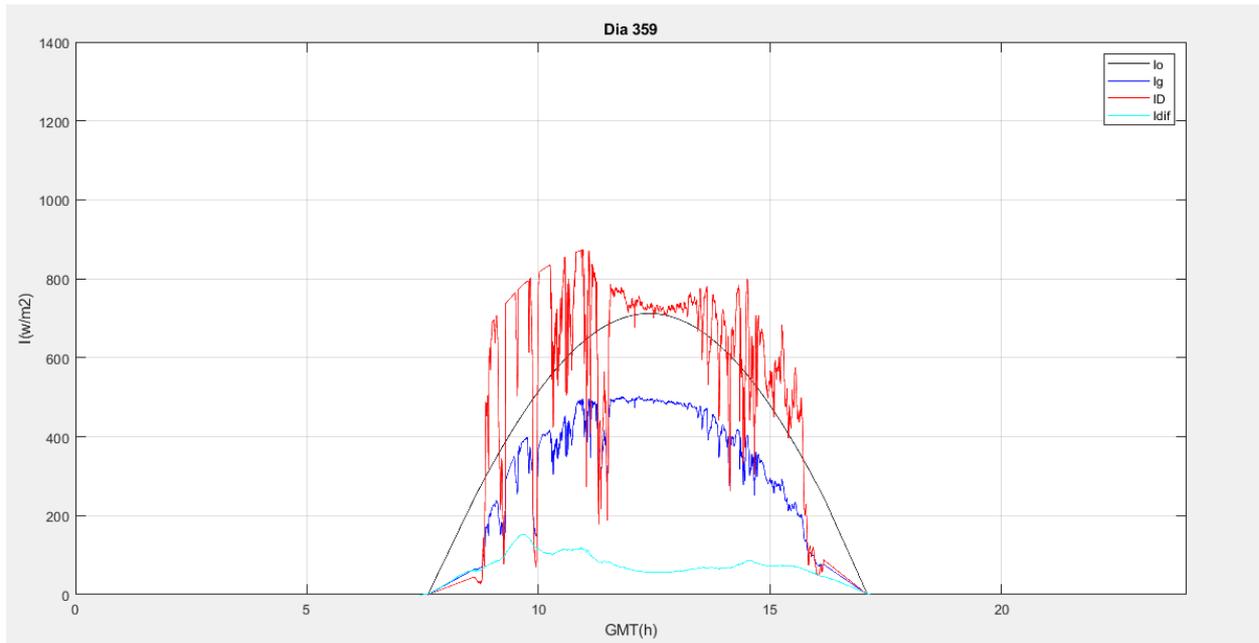


Figura 5.31. Gráfica diaria correspondiente al día 359 del año 2019, día nublado con aplicación del filtro, Caso C

De esta manera, queda demostrada gráficamente la efectividad de la aplicación del modelo para suavizar los grandes picos de radiación.

5.8 Cálculo de la radiación acumulada diaria

La radiación acumulada diaria asume un valor de radiación constante durante un día completo. Es una buena variable para realizar comparaciones entre diferentes días o estaciones radiométricas. En este trabajo se obtiene tanto la radiación acumulada diaria global horizontal como la radiación acumulada diaria directa normal. A partir de estas variables, se realiza el análisis de errores de cada metodología aplicada.

El cálculo de ambas variables de radiación se realiza a través de unos programas informáticos desarrollados en MATLAB. En primer lugar, se modifica el archivo procesarad_2.m en función del formato del fichero de radiación de los días con los que se quiere trabajar. Una vez actualizado este programa, se ejecuta el siguiente, proc_f.m y se seleccionan los archivos de los cuales se quiera calcular la acumulada diaria.

Aunque se han calculado la radiación acumulada diaria global horizontal, directa normal y difusa horizontal, solo se hará uso de las dos primeras variables durante este trabajo.

En este trabajo se han calculado las acumuladas diarias en función del número de cifras que presente el día del que se quiera conocer dichas variables de radiación. A continuación, se muestra una imagen del programa que calcula las acumuladas diarias para los días con tres cifras del año 2010 en el Caso B.

Desktop ▸ CASO B ▸ ARCHIVOS CASO B (V) ▸ ACUMULADAS DIARIAS CASO B

Editor - C:\Users\Patriciafdez\Desktop\CASO B\ARCHIVOS CASO B (V)\ACUMULADAS DIARIAS CASO B\acum0002010.m

procesarad_2.m x proc_f.m x acum0002010.m x +

	Día	HD (kWh/m2)	Hg (kWh/m2)	Hd0 (kWh/m2)
1	-			
2	-			
3	103	3.6465	4.6024	2.4870
4	111	0.9407	2.5432	1.8413
5	164	5.2183	6.3886	2.9649
6	165	6.9946	7.1881	1.6276
7	166	8.8052	8.1587	1.3690
8	167	10.0034	8.5511	0.9588
9	176	6.8181	7.2952	2.6559
10	186	8.6851	7.9837	1.3944
11	213	8.5160	7.5498	1.4725
12	218	8.3987	7.3918	1.1452
13	219	7.4972	7.0576	1.5741
14	245	7.8313	6.4669	1.2683
15	272	7.8035	5.4729	0.7942
16	294	7.4076	4.4510	0.7117
17	310	7.0341	3.8407	0.5971

Figura 5.32. Acumuladas diarias de los días con tres cifras del año 2010 para el Caso B

6 RESULTADOS

Finalmente, se analizan todos los resultados obtenidos al aplicar cada una de las metodologías descritas. Este análisis será determinante en la calidad de las mediciones que aporta la estación radiométrica del GTER. Se cuantifican los errores en los datos obtenidos al simular los huecos artificiales de radiación en los días que conforman las matrices muestras seleccionadas.

6.1 Parámetros de medición estadística

Para conocer la precisión e idealidad de las metodologías de relleno de huecos aplicadas en la base de datos de la estación del GTER, es necesario emplear parámetros de medición estadística. Estos parámetros permiten cuantificar el error asociado a cada metodología. Existe una diferencia entre parámetros absolutos y relativos para el análisis de datos. Los indicadores usados para cuantificar el error en este proyecto serán el error absoluto (ϵ_a), el error relativo (ϵ_r), el error cuadrático medio absoluto (RMSE) y el error cuadrático medio relativo (RMSE_r).

El error absoluto de una medida (ϵ_a) es la diferencia entre el valor real de la medida (\bar{X}) y el valor que se ha obtenido de la medición X_i . En este caso, el valor real es la radiación acumulada original correcta de la base de datos de la estación radiométrica. Puede ser un valor positivo o negativo, según si la medida es superior al valor real o inferior y además tiene las mismas unidades que las de la medida.

$$\epsilon_a = \bar{X} - X_i \quad (\text{Ec. 20})$$

El error relativo de una medida (ϵ_r) es el cociente entre el error absoluto y el valor que se considera como exacto. Al igual que el error absoluto, puede ser tanto positivo como negativo porque se puede producir por exceso o por defecto. Este parámetro no viene acompañado de unidades, se mide en porcentaje (%).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_a}{\bar{X}} \times 100 \quad (\text{Ec. 21})$$

El error cuadrático medio, tanto absoluto como relativo, mide la cantidad de error entre dos conjuntos de datos. Compara un valor previsto y un valor observado o conocido. Penaliza las grandes desviaciones en las estimaciones de los datos respecto a los valores medidos. Esta variable es una buena medida de la precisión del modelo para predecir la respuesta. Cuanto menor sean los valores de RMSE, mejor ajuste posee el modelo. El error cuadrático medio absoluto (RMSE) se expresa como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t^{est} - y_t)^2}{n}} \quad (\text{Ec. 22})$$

Y el error cuadrático medio relativo ($RMSE_r$):

$$RMSE_r = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t^{est} - y_t)^2}{n}}}{\sum_{t=1}^n y_t} \times 100 \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde:

- y_t^{est} : variable de radiación estimada (radiación acumulada calculada)
- y_t : variable de radiación real (radiación acumulada original del día correcto)
- n : número de puntos medidos

Aunque los valores absolutos dan una idea del grado de aproximación entre los valores de radiación acumulada, a nivel práctico, es más favorable el análisis de los resultados con valores relativos.

Al realizar el análisis para cada método, se calculan los valores medios anuales para cada parámetro observando el comportamiento de las variables durante ese año. También se justifican aquellos días cuyas medidas producen significantes desviaciones en el error, no siendo representativas para el resto del año y la metodología.

6.2 Cálculo de errores

En este apartado se cuantifica el error asociado a cada metodología aplicada para el relleno de huecos de radiación solar. Se han calculado los errores absolutos y relativos medios para cada año, así como los valores de $RMSE$ y $RMSE_r$ a partir del cálculo de las variables de radiación acumulada diaria global horizontal y acumulada diaria directa normal. A partir del análisis de errores de cada caso, se conoce la incertidumbre asociada a todos ellos, objetivo del actual proyecto. A continuación, se realiza el análisis de los resultados obtenidos para cada caso.

6.2.1 Caso A.2

Recordando la clasificación realizada en el apartado 5, este caso se compone de los días nublados y cubiertos (no claros) donde se ha generado un hueco inferior a una hora (59 minutos) al principio del día, a partir del orto.

El objetivo es linealizar en el periodo de tiempo donde existe el hueco, entre el orto y el primer instante que se registran medidas de radiación. Se ha completado tanto la radiación global horizontal como la radiación directa normal.

En primer lugar, se muestra el análisis de errores para la variable acumulada global horizontal, Tabla 6.1.

H_{g0}

Año	ϵ_a (kWh/m²)	ϵ_r (%)	RMSE (kWh/m²)	RMSE_r (%)
2000	-0,001	-0,018	0,016	0,154
2001	0,006	0,125	0,015	0,166
2002	0,158	2,767	0,695	7,825
2003	-0,004	-0,092	0,018	0,191
2004	0,000	0,038	0,013	0,196
2005	0,003	0,093	0,011	0,153
2006	-0,003	-0,073	0,010	0,225
2007	0,004	0,081	0,010	0,144
2008	-0,003	-0,038	0,010	0,106
2009	0,003	0,115	0,012	0,188
2010	0,002	0,034	0,014	0,128
2011	-0,001	-0,005	0,008	0,091
2012	0,002	0,040	0,009	0,116
2013	0,000	-0,010	0,015	0,153
2014	0,003	0,125	0,014	0,140
2015	0,001	0,022	0,008	0,078
2016	0,003	0,121	0,009	0,115
2017	0,001	0,077	0,005	0,079
2018	0,001	-0,028	0,016	0,209
2019	0,199	3,748	0,778	9,294

Tabla 6.1. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y RMSE_r para radiación acumulada global horizontal, Caso A.2

El comportamiento del método aplicado en este caso obtiene buenos resultados para la componente global horizontal. El RMSE_r de cada año presenta valores muy bajos, indicando muy buen ajuste de la metodología. Hay que resaltar los valores obtenidos en los años 2002 y 2019, donde se obtienen valores de 7,825% y 9,294%, respectivamente. En el año 2002, uno de los días que componen la matriz muestra, el día juliano 237 eleva notablemente tanto el error relativo hasta un 2,767% y el RMSE_r hasta un 7,825%. Este día presenta una gran diferencia entre la variable acumulada registrada en la estación del GTER y la obtenida nuevamente al generar el hueco, siendo su error relativo del 53,611%. Aunque este día eleva los valores de dichas variables, el resto de días obtienen buenos resultados. En el año 2019 ocurre lo mismo, el día juliano 115 posee un error

relativo del 57,194%, llevando hasta un error relativo medio de ese año del 3,748% y un RMSE del 9,294%. Aunque ambos días producen desviaciones y alteran los valores de los errores, no son representativos a la hora de actuación de la metodología quedando reflejado en el resto de años.

A continuación, se analiza la variable acumulada directa normal, en la Tabla 6.2.

H_{bn}				
Año	ϵ_a (kWh/m ²)	ϵ_r (%)	RMSE (kWh/m ²)	RMSE _r (%)
2000	-0,001	0,099	0,021	0,222
2001	0,008	0,253	0,018	0,228
2002	0,153	3,715	0,668	9,437
2003	-0,002	0,188	0,014	0,159
2004	-0,002	0,390	0,016	0,248
2005	0,001	0,338	0,011	0,162
2006	-0,007	0,024	0,016	0,418
2007	0,004	0,174	0,012	0,171
2008	-0,006	0,487	0,012	0,139
2009	0,006	0,292	0,016	0,246
2010	0,001	1,154	0,016	0,185
2011	-0,024	-2,019	0,061	0,743
2012	-0,034	-6,338	0,053	0,736
2013	-0,002	0,871	0,018	0,192
2014	0,003	0,437	0,017	0,178
2015	0,003	0,162	0,012	0,128
2016	0,008	4,178	0,015	0,208
2017	0,005	2,437	0,011	0,201
2018	0,001	0,004	0,020	0,290
2019	-0,001	-0,101	0,015	0,187

Tabla 6.2. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y RMSE_r para radiación acumulada directa normal, Caso A.2

Al igual que la variable analizada anteriormente, los resultados de la componente directa normal son muy buenos al aplicar la metodología. Los valores de RMSE_r de cada año son muy próximos a cero, indicando un

ajuste casi perfecto del método de relleno del hueco. En el año 2002 ocurre lo mismo que anteriormente, el día juliano 237 eleva notablemente el error relativo medio a un 3,715% y el $RMSE_r$ a un 9,437%, pero aún así, sigue sin ser representativo para el resto de resultados del año.

En línea general, esta metodología posee un comportamiento muy bueno para todos los años, quedando reflejados en el análisis obtenido. La incertidumbre asociada en este caso es muy pequeña, proporcionando alta calidad de la base de datos de la estación radiométrica del GTER. Adicionalmente, el periodo de tiempo del hueco, donde no se registran medidas o estas son incorrectas, es pequeño en comparación con el resto del día donde se almacenan valores de radiación. Este hecho motiva a los buenos resultados del análisis.

6.2.2 Caso B

Dentro de este grupo se encuentran los días donde la componente global horizontal es correcta pero la directa normal no se registra o es incorrecta. Para rellenar esta variable, se hace uso del modelo de correlaciones M_d - M_t en el periodo de tiempo de radiación solar faltante.

Al igual que el caso anterior, en primer lugar se realiza el análisis de la radiación acumulada global horizontal, Tabla 6.3.

H_{g0}				
Año	ϵ_a (kWh/m²)	ϵ_r (%)	RMSE (kWh/m²)	RMSE_r (%)
2000	-0,002	-0,033	0,006	0,087
2001	0,003	0,082	0,013	0,121
2002	-0,003	0,035	0,018	0,199
2003	0,001	-0,003	0,011	0,110
2004	0,002	0,011	0,010	0,105
2005	0,000	-0,008	0,003	0,036
2006	-0,001	-0,021	0,007	0,198
2007	0,001	0,004	0,008	0,070
2008	0,001	0,018	0,005	0,056
2009	0,002	-0,029	0,015	0,180
2010	0,000	-0,004	0,007	0,066
2011	-0,003	-0,097	0,016	0,151
2012	-0,001	0,015	0,004	0,052
2013	0,002	0,039	0,015	0,142
2014	-0,001	-0,001	0,010	0,071
2015	0,001	0,025	0,006	0,052
2016	-0,001	-0,050	0,009	0,096

2017	0,001	-0,012	0,008	0,093
2018	0,003	0,077	0,011	0,098
2019	0,002	0,140	0,005	0,064

Tabla 6.3. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada global horizontal, Caso B

La variable global horizontal de los días incluidos en este caso se registra correctamente desde su inicio. Por este motivo, los errores obtenidos al evaluar esta variable para cada año presentan valores tan bajos, en torno a cero. De esta manera, se verifican las medidas que registra la estación del GTER.

A continuación, se analiza la variable verdaderamente importante del método, la variable acumulada directa normal. En la Tabla 6.4 se muestra el análisis de errores realizado.

Año	H_{bn}			
	ϵ_a (kWh/m ²)	ϵ_r (%)	RMSE (kWh/m ²)	$RMSE_r$ (%)
2000	-0,502	-127,405	0,919	13,917
2001	-0,484	-72,802	0,810	7,533
2002	-0,361	-16,696	0,671	7,252
2003	-0,371	-64,464	0,873	8,903
2004	-0,407	-14,906	0,794	8,503
2005	-0,079	-1,467	0,436	4,101
2006	0,360	6,322	0,494	11,005
2007	-0,192	-15,667	0,743	6,324
2008	-0,171	-12,061	1,108	11,907
2009	-0,244	-67,309	0,716	7,993
2010	-0,217	-53,404	0,707	6,337
2011	-0,804	-39,256	1,125	10,966
2012	-0,074	-96,135	0,701	7,673
2013	-0,298	-6,741	0,632	5,623
2014	-0,416	-41,478	0,759	5,098
2015	-0,435	-22,493	1,272	10,896
2016	-0,373	-52,388	0,936	10,296

2017	-0,644	-35,847	1,033	11,368
2018	-0,746	-33,483	0,936	8,737
2019	-0,353	-23,341	0,634	7,939

Tabla 6.4. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada directa normal, Caso B

Haciendo una inspección visual de los errores obtenidos, son muchos los factores que afectan al análisis realizado. Al tratarse de un modelo, el ajuste conseguido no es perfecto justificando los resultados obtenidos.

El $RMSE_r$ máximo se alcanza en el año 2000, siendo su error relativo -127,405% y su $RMSE_r$ 13,917%. El 63% de los días pertenecientes a este año seleccionados en la matriz muestra, son días nublados (apartado 5.6). Estos días son los que mayores perturbaciones presentan, incrementando la imprecisión e incertidumbre del método. Como adición a este motivo, el modelo de correlaciones M_d-M_t actúa peor en días con numerosas perturbaciones. A diferencia de este año, el año 2005 muestra los menores errores dentro del periodo analizado. El error relativo medio toma valor de -1,467% y el $RMSE_r$ de 4,101%.

En comparación con la radiación global horizontal, esta componente presenta mayores desviaciones y variaciones en sus datos, llevando a obtener errores más elevados.

Existen días, casos aislados, donde los valores originales de radiación acumulada son muy bajos, próximos a cero, cualquier pequeña desviación sobre los valores medidos, dispara los errores a valores muy altos.

Este método genera una mayor incertidumbre en las medidas con respecto al caso anterior.

Concluyendo, la aplicación del modelo de correlaciones M_d-M_t genera la incertidumbre máxima entre todos los métodos aplicados. Estos resultados son mejorables con metodologías más complejas y mayor periodo de estudio.

6.2.3 Caso C

Este tercer caso es una combinación de los dos vistos anteriormente. La componente directa normal es incorrecta o no se registran datos y la global horizontal presenta un hueco inferior a una hora al principio o final del día. Los resultados obtenidos también serán una combinación de los anteriores.

Primeramente, se analiza la radiación acumulada global horizontal, Tabla 6.5.

H_g0				
Año	ϵ_a (kWh/m²)	ϵ_r (%)	RMSE (kWh/m²)	$RMSE_r$ (%)
2000	-0,005	-0,022	0,011	0,111
2001	-0,007	-0,125	0,012	0,149
2002	-0,016	-0,389	0,030	0,333
2003	-0,013	-0,303	0,018	0,166
2004	-0,006	0,086	0,016	0,232
2005	-0,017	-0,254	0,022	0,275
2006	-0,010	-0,287	0,011	0,318

2007	-0,010	-0,242	0,014	0,149
2008	-0,006	-0,035	0,014	0,144
2009	-0,007	-0,105	0,013	0,167
2010	-0,006	-0,112	0,018	0,176
2011	-0,008	-0,183	0,020	0,209
2012	-0,018	-0,803	0,021	0,236
2013	-0,030	-0,391	0,019	0,183
2014	-0,013	-0,305	0,022	0,210
2015	-0,010	-0,232	0,018	0,144
2016	-0,009	-0,128	0,016	0,159
2017	-0,010	-0,245	0,018	0,257
2018	-0,002	0,032	0,014	0,162
2019	-0,005	-0,146	0,009	0,096

Tabla 6.5. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada global horizontal, Caso C

Los resultados obtenidos para esta primera variable son bastante favorables. Todos los años presentan errores relativos medios y $RMSE_r$ en torno a cero, indicando la alta precisión y calidad de los datos obtenidos. Las medidas de radiación acumulada global horizontal obtenidos rozan la idealidad.

Debido a la aleatoriedad de la selección de días de la matriz muestra y no existir ningún apunte señalable en ambos casos anteriores, los resultados obtenidos son muy fiables, otorgando una base de datos de calidad de la estación radiométrica del GTER.

Cabe destacar, el periodo de tiempo a rellenar con esta variable es muy corto respecto al resto de horas que se registran medidas de radiación, favoreciendo los bajos errores obtenidos.

Seguidamente, se realiza el análisis de la radiación acumulada directa normal, Tabla 6.6.

H_{bn}				
Año	ϵ_a (kWh/m ²)	ϵ_r (%)	RMSE (kWh/m ²)	$RMSE_r$ (%)
2000	-0,229	-87,105	0,776	7,395
2001	-0,442	-49,719	0,766	9,255
2002	-0,581	-37,803	0,825	9,124
2003	-0,228	-19,499	0,635	5,469
2004	-0,077	-382,624	0,917	12,779

2005	-0,266	-9,735	0,725	8,787
2006	0,175	-7,768	0,982	23,527
2007	-0,020	-27,031	0,635	5,841
2008	-0,376	-16,519	1,009	10,016
2009	-0,084	-53,668	0,764	8,682
2010	-0,357	-26,649	0,885	8,221
2011	-0,727	-98,374	0,974	10,765
2012	-0,203	-786,286	0,785	7,793
2013	-0,451	-68,984	0,773	6,982
2014	-0,112	-49,189	0,692	5,968
2015	-0,291	-44,401	0,775	5,861
2016	-0,023	-51,501	0,531	4,822
2017	-0,352	-24,832	1,564	18,946
2018	-0,490	-83,201	0,966	10,888
2019	-0,047	-67,696	0,616	6,198

Tabla 6.6. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada directa normal, Caso C

Los resultados obtenidos de esta variable son, sin duda, los peores de todos. Todos las causas y problemas descritos en los casos anteriores, se presentan en este.

Los años que conforman la matriz muestra del caso presentan días con valores de radiación acumulada directa normal muy próximos a cero, elevando notablemente los errores y la incertidumbre del caso. Este problema ya se comentó en el caso anterior, el Caso B.

Se llega a alcanza el valor de $RMSE_r$ máximo en el año 2006, siendo de 23,527%. La matriz muestra únicamente posee tres días de este año, siendo el 67% de ellos días nublados con numerosas perturbaciones. De esta manera, se justifican los altos errores obtenidos. También hay que destacar el año 2004 con un error relativo medio y $RMSE_r$ alto en ambos casos, -382,624% y 12,779%, respectivamente. El error absoluto medio máximo se consigue en el año 2012 con un valor de -786,286%. En este año, el día juliano 326 llega a alcanzar un error relativo de -12955%. Se suman los hechos de ser un día nublado con altas perturbaciones y poseer un valor de radiación acumulada directa normal muy próximo a cero. El año 2017 presenta un $RMSE_r$ alto, siendo su valor de 18,946%. La causa de este alto valor es la misma que la de los años anteriores señalados.

No existe ningún año cuyo error cuadrático medio relativo ($RMSE_r$) sea inferior al 5%.

Para este caso habría que proponer, en estudios posteriores, una metodología de mayor complejidad que mejore notablemente los errores para obtener resultados más precisos.

En general, este es el caso que peor actuación presenta de todos los analizados y genera una alta incertidumbre para la base de datos de la estación radiométrica del GTER.

6.2.4 Caso D

Este caso está compuesto por aquellos días donde la componente global horizontal no se registra o presenta mediciones incorrectas y la componente directa normal es correcta.

Para el relleno de esta variable, se aplica la ecuación algebraica que relaciona las tres componentes de la radiación solar (Ec. 15). Para ello, es necesario que la componente difusa horizontal sea correcta.

En primer lugar, se analiza la variable acumulada global horizontal, Tabla 6.7.

H_{g0}				
Año	ε_a (kWh/m²)	ε_r (%)	RMSE (kWh/m²)	RMSE_r (%)
2000	0,095	0,813	0,431	4,105
2001	0,162	3,624	0,194	1,702
2002	0,191	4,426	0,227	2,357
2003	0,213	3,011	0,323	2,788
2004	0,243	5,179	0,286	3,987
2005	0,032	0,434	0,399	4,822
2006	0,021	0,725	0,064	2,259
2007	0,172	2,782	0,230	2,136
2008	0,139	2,403	0,226	2,533
2009	0,177	3,102	0,209	2,543
2010	0,220	5,531	0,319	3,215
2011	0,427	8,332	0,475	5,824
2012	0,254	4,191	0,376	4,478
2013	0,303	4,395	0,473	4,400
2014	0,106	2,744	0,209	2,142
2015	0,304	5,060	0,422	4,040
2016	0,202	5,677	0,258	3,030
2017	0,240	5,168	0,284	2,900
2018	0,344	8,254	0,379	4,012
2019	0,123	2,602	0,618	2,034

Tabla 6.7. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y RMSE_r para radiación acumulada global horizontal, Caso D

En comparación con los casos anteriores, donde se ha generado la componente directa normal, la ecuación algebraica obtiene datos de calidad de radiación. El $RMSE_r$ de cada año es inferior del 5%, siendo un error aceptable para los cálculos obtenidos. Hay que destacar el año 2011, donde el error relativo es del 8,332% y el $RMSE_r$ del 5,824%, superando el límite de error aceptable. Los días pertenecientes a la matriz muestra de este año son mayoritariamente días no claros (días nublados y cubiertos), el 60%. Los días no claros presentan muchas perturbaciones dando lugar a grandes desviaciones en las medidas obtenidas. Este tipo de días aumentan la imprecisión del método aplicado. La aleatoriedad de la elección de los días que conforman la matriz muestra a aplicar el método, puede tanto penalizar como favorecer los resultados obtenidos.

En general, la ecuación algebraica consigue valores de radiación de calidad de la componente global horizontal a rellenar en cada día.

Finalmente, se muestra el análisis para la variable acumulada directa, Tabla 6.8.

H_{bn}				
Año	ϵ_a (kWh/m ²)	ϵ_r (%)	RMSE (kWh/m ²)	RMSE _r (%)
2000	-0,003	-0,204	0,015	0,135
2001	0,002	0,001	0,014	0,113
2002	0,008	-0,038	0,025	0,177
2003	-0,006	-0,281	0,022	0,177
2004	-0,003	0,112	0,008	0,108
2005	0,002	-0,007	0,009	0,103
2006	-0,006	-0,118	0,008	0,263
2007	0,000	0,257	0,005	0,040
2008	0,001	-0,211	0,015	0,169
2009	-0,004	-0,170	0,013	0,147
2010	0,000	0,827	0,014	0,130
2011	-0,016	-0,993	0,046	0,572
2012	-0,026	-3,517	0,071	0,801
2013	0,000	0,036	0,013	0,114
2014	-0,001	1,200	0,008	0,078
2015	-0,002	-0,064	0,012	0,109
2016	0,003	0,561	0,011	0,123
2017	0,002	0,383	0,011	0,106
2018	0,000	0,688	0,008	0,093

2019	0,002	2,623	0,005	0,057
-------------	-------	-------	-------	-------

Tabla 6.8. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y RMSE_r para radiación acumulada directa normal, Caso D

Al contrario que el Caso B, este método únicamente calcula la variable global horizontal siendo la directa normal correcta. Este hecho se verifica con los resultados obtenidos en la Tabla 6.8. Todos los errores, tanto el error relativo medio como el RMSE de todos los años rozan la perfección validando así las mediciones realizadas por la estación del GTER.

6.2.5 Caso días descartados

En este último caso se engloban todos los días restantes donde sus valores de radiación no pueden considerarse correctos o corregibles. En el apartado 5.1.2 de este trabajo se muestran cuales son los casos que pertenecen a este grupo.

Se opta por la sustitución del día clasificado como correcto por otro cuya radiación acumulada diaria global horizontal no supere una diferencia de error de +/- 5%, ese día se encuentre en un rango de tres días anteriores o posteriores al día a sustituir y sea clasificado originalmente como correcto. Si no se cumplen estas condiciones, se amplía el rango de búsqueda a cinco días anteriores o posteriores al día en cuestión.

Siguiendo la misma tendencia de los casos anteriores, en la Tabla 6.9 se muestra el análisis realizado para la variable acumulada global horizontal.

H_{g0}				
Año	ε_a (kWh/m²)	ε_r (%)	RMSE (kWh/m²)	RMSE_r (%)
2000	-0,076	19,036	0,786	27,788
2001	0,113	3,420	0,307	2,789
2002	0,025	-3,167	0,475	5,176
2003	-0,013	0,505	0,166	1,636
2004	0,009	8,933	0,465	4,476
2005	-0,125	-2,535	0,244	2,577
2006	-0,001	-0,892	0,173	3,971
2007	-0,087	-1,325	0,785	8,035
2008	-0,092	2,025	0,271	2,699
2009	0,051	4,132	0,294	2,927
2010	0,049	1,699	0,572	4,805
2011	0,051	0,930	0,348	3,052
2012	0,049	3,515	0,232	2,584

2013	-0,030	-0,123	0,277	3,437
2014	0,058	2,698	0,242	3,025
2015	-0,056	-1,790	0,426	4,070
2016	-0,075	1,761	0,409	4,824
2017	0,045	0,705	0,256	3,108
2018	-0,104	-2,694	0,262	2,843
2019	0,010	2,661	0,204	2,067

Tabla 6.9. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada global horizontal, Caso días descartados

Al tener una amplia base de datos con medidas de calidad, es muy fácil encontrar un día a sustituir que posea unas mediciones muy similares a las deseadas. Este hecho puede reflejarse en los resultados obtenidos.

En el apartado 5.5, donde se describe la metodología a seguir en este caso, se detallan cuales son los días que han necesitado la aplicación de condiciones especiales para poder ser sustituidos. Estos casos son los que van a elevar los errores del estudio realizado.

El año 2000 presenta el error relativo medio y el $RMSE_r$ más alto de todos, sus valores son 19,036% y 27,788%. La matriz muestra posee cinco días de este año y a tres de ellos se les ha aplicado una condición adicional. Los días julianos 357 y 363 poseen valores de acumulada global horizontal muy bajos, en torno a 0 y su error relativo se dispara al realizar la sustitución. Para el día juliano 323 se sustituyó por otro con un rango de 31 días al no haber ninguno para con las condiciones iniciales para sustituir. El año 2002 también muestra un $RMSE_r$ alto, del 5,176 %. En este año también hay un día, el 322, con una gran diferencia entre el valor de la acumulada del día incorrecto y el día a sustituir, siendo el error absoluto de -1,426 kWh/m². Este resultado es la justificación de la desviación producida en el $RMSE_r$ del año. En el año 2007 ocurre lo mismo, el día juliano 160 posee un error absoluto de -3,566 kWh/m². Ambos días son nublados con presencia de altas perturbaciones en sus registros de radiación, motivando a aumentar el RMSE del año.

En regla general, aunque no sea el método con mejores resultados, la mayoría de años presentan $RMSE_r$ por debajo del 5%.

Finalmente, la Tabla 6.10 recoge el análisis de errores de la variable acumulada directa normal.

H_{bn}				
Año	ϵ_a (kWh/m²)	ϵ_r (%)	RMSE (kWh/m²)	$RMSE_r$ (%)
2000	-0,240	43,082	1,071	36,873
2001	0,191	-62,053	0,786	6,973
2002	0,133	-36,044	2,125	20,541
2003	-0,196	-31,318	0,700	6,511
2004	0,018	10,019	1,266	11,869
2005	-0,075	-5,265	0,907	9,020

2006	0,114	-18,965	1,219	26,150
2007	-0,135	-5,858	1,763	17,648
2008	-0,294	1,309	1,201	10,673
2009	-0,152	-3,502	1,026	10,076
2010	0,026	-2,264	1,890	15,372
2011	-0,069	-32,245	1,206	10,113
2012	-0,266	-2,805	1,354	15,058
2013	0,103	6,782	1,123	13,208
2014	0,001	-151,171	0,756	7,052
2015	-0,365	-32,893	1,399	1,282
2016	-0,397	-7,538	1,404	16,225
2017	-0,012	0,172	1,215	14,223
2018	-0,388	-13,178	1,393	15,918
2019	-0,234	-11,085	0,867	8,185

Tabla 6.10. Errores absolutos y relativos medios, RMSE y $RMSE_r$ para radiación acumulada directa normal, Caso días descartados

El criterio de sustitución adoptado en el método, únicamente tiene en cuenta la radiación acumulada global horizontal. Se realiza una comparación de esta última variable mencionada entre el día seleccionado en la matriz muestra y el día sustituido. Si a este hecho se suma, la alta variabilidad de la componente directa normal, son coherentes los altos valores de errores obtenidos en el análisis.

En este caso se obtienen los $RMSE_r$ más altos de todos ellos, llegando hasta valores de 36,871% en el año 2000 y de 26,150% en el 2006. Ambos años son los que menor número de días aportan a la matriz muestra. A este motivo se añade la considerable diferencia entre los valores del día de la matriz muestra y el sustituido y los bajos niveles de radiación acumulada directa normal disparando los errores. El error relativo medio máximo alcanzado es en el año 2014 tomando valor de -151,171%. Un total de tres días presentan errores relativos diarios superiores al 90% elevando el error medio del año.

Los resultados obtenidos de esta variable aumentan notablemente la incertidumbre de las medidas.

Como propuesta a la mejora del análisis de errores de este método, realizar la sustitución de días teniendo en cuenta la radiación acumulada directa normal. Aunque aumenta la complejidad del método, aporta una alta calidad y precisión en los resultados.

6.3 Representación gráfica resultados diarios

La mejor forma de observar la tendencia y los valores de los resultados obtenidos es mediante una representación gráfica. Se han representado las dos variables calculadas, la radiación acumulada diaria global horizontal y la radiación acumulada diaria directa normal, durante el periodo de años estudiado, desde el 2000 hasta el 2019. Al representar todos los días que conforman las matrices muestra de cada caso, los datos se consideran representativos para cada metodología.

En primer lugar, se adjuntan las gráficas correspondientes a la variable acumulada global horizontal desde el Caso A.2 hasta el Caso días descartados, siguiendo el mismo orden del apartado anterior. Se muestran a continuación desde la Figura 6.1 hasta la Figura 6.5.

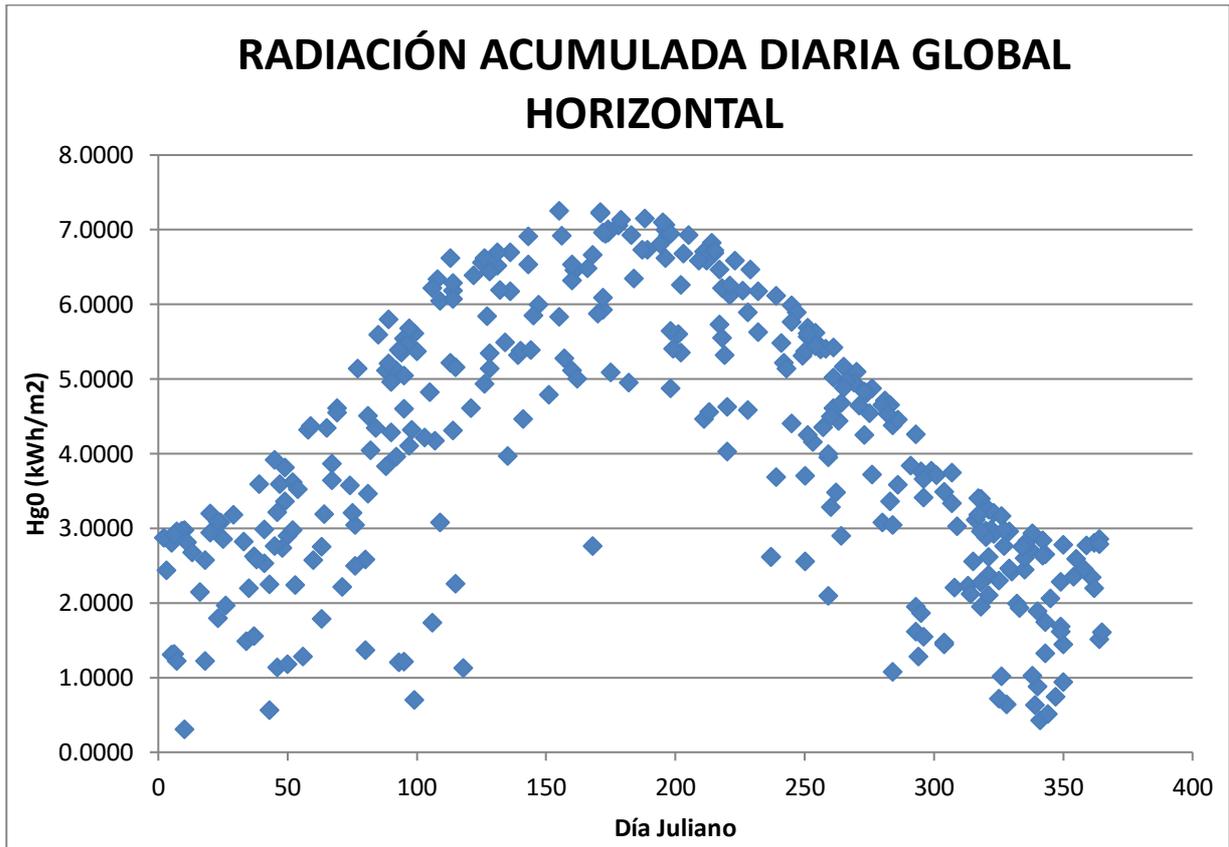


Figura 6.1. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso A.2

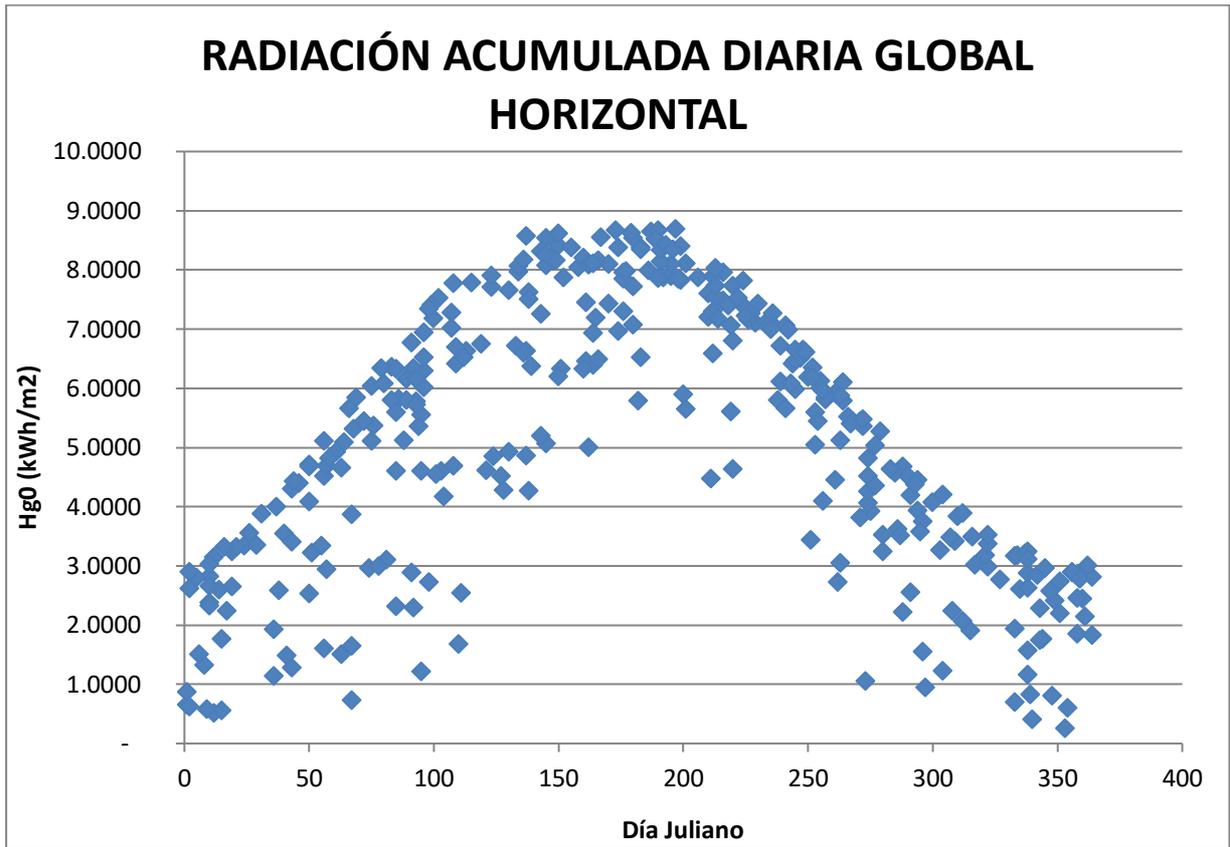


Figura 6.2. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso B

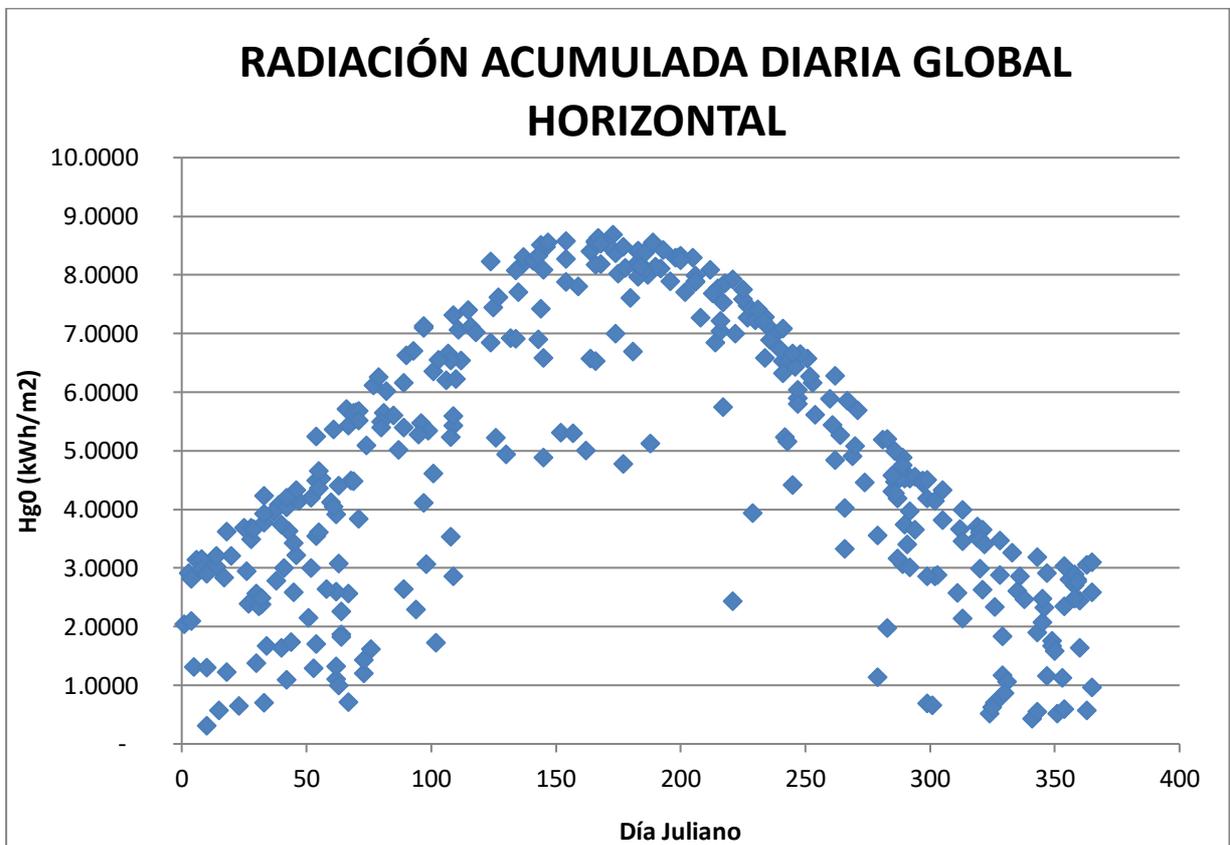


Figura 6.3. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso C

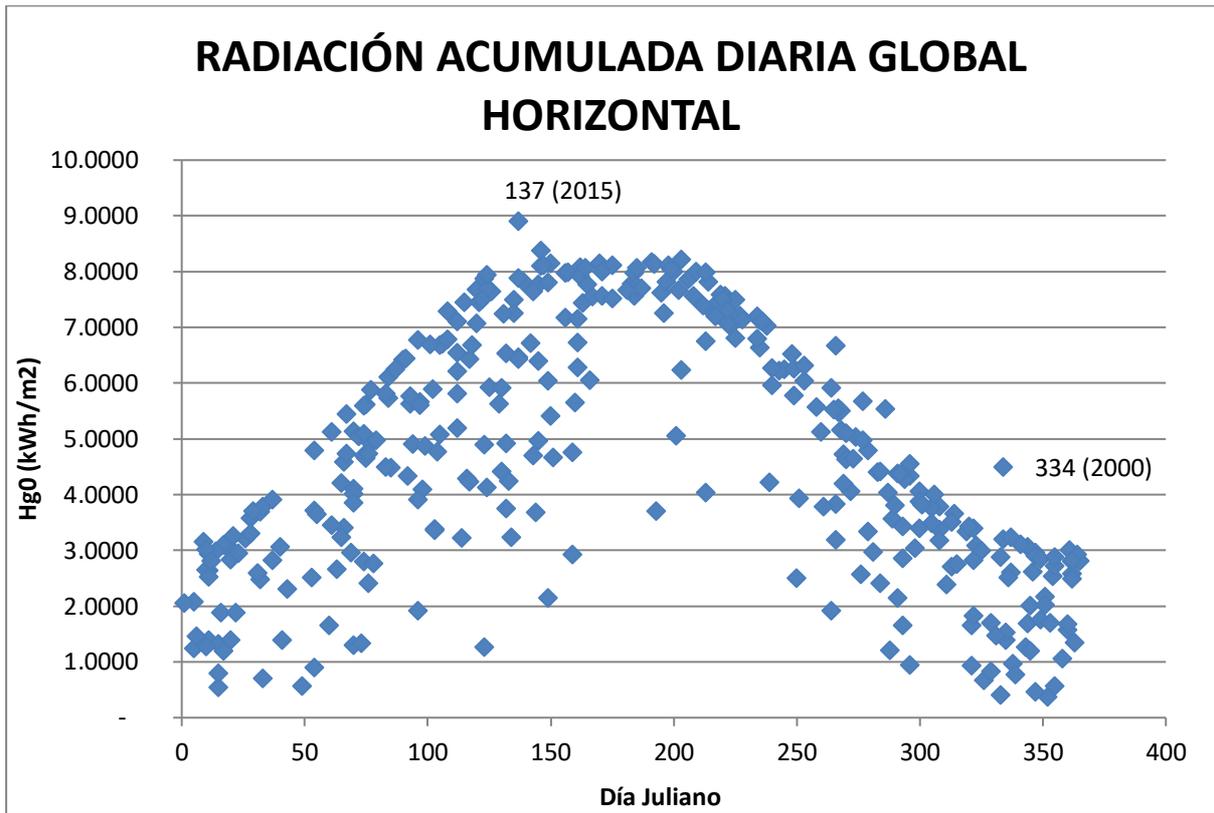


Figura 6.4. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso D

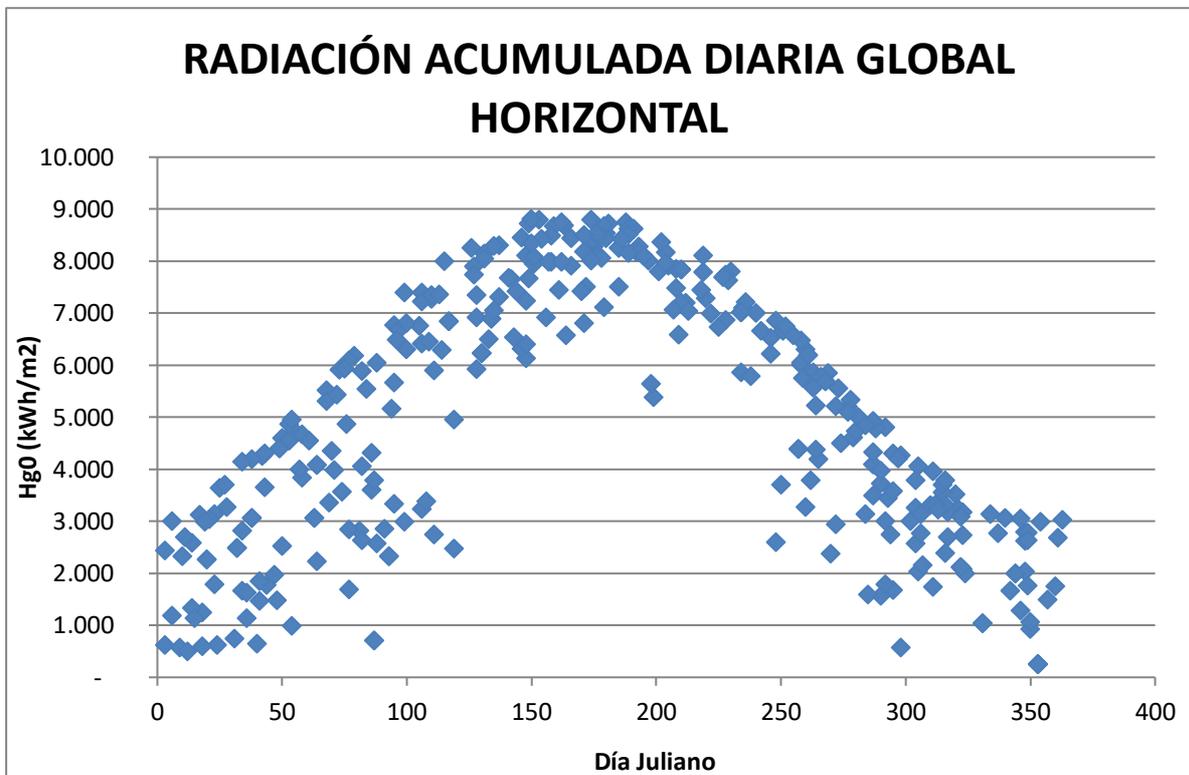


Figura 6.5. Radiación acumulada diaria global horizontal, periodo 2000-2019, Caso días descartados

Lo primero que llama la atención es la distribución seguida por los puntos, representando una curva muy definida. Todos los casos presentan muy buen comportamiento para esta variable. Se observa como los valores de radiación máximos se alcanzan en los meses de verano, donde por regla general, son los meses con mayor porcentaje de días despejados. Todos los casos siguen una tendencia favorable verificando la calidad y precisión de los resultados obtenidos en el apartado anterior.

Si hubiera algo que destacar, en el Caso D existen dos días, el 137 del año 2015 y el 334 del año 2000 que se alejan suavemente de la tendencia que sigue la curva. Al tratarse de dos días aislados, no son representativos ni afectan en el comportamiento del método.

La incertidumbre asociada a esta variable en todos los casos es muy baja dando lugar a resultados de calidad.

Por último, se realiza la misma representación anterior pero con la variable acumulada diaria directa normal. Se sigue el mismo orden anterior, desde la Figura 6.6 hasta la Figura 6.10.

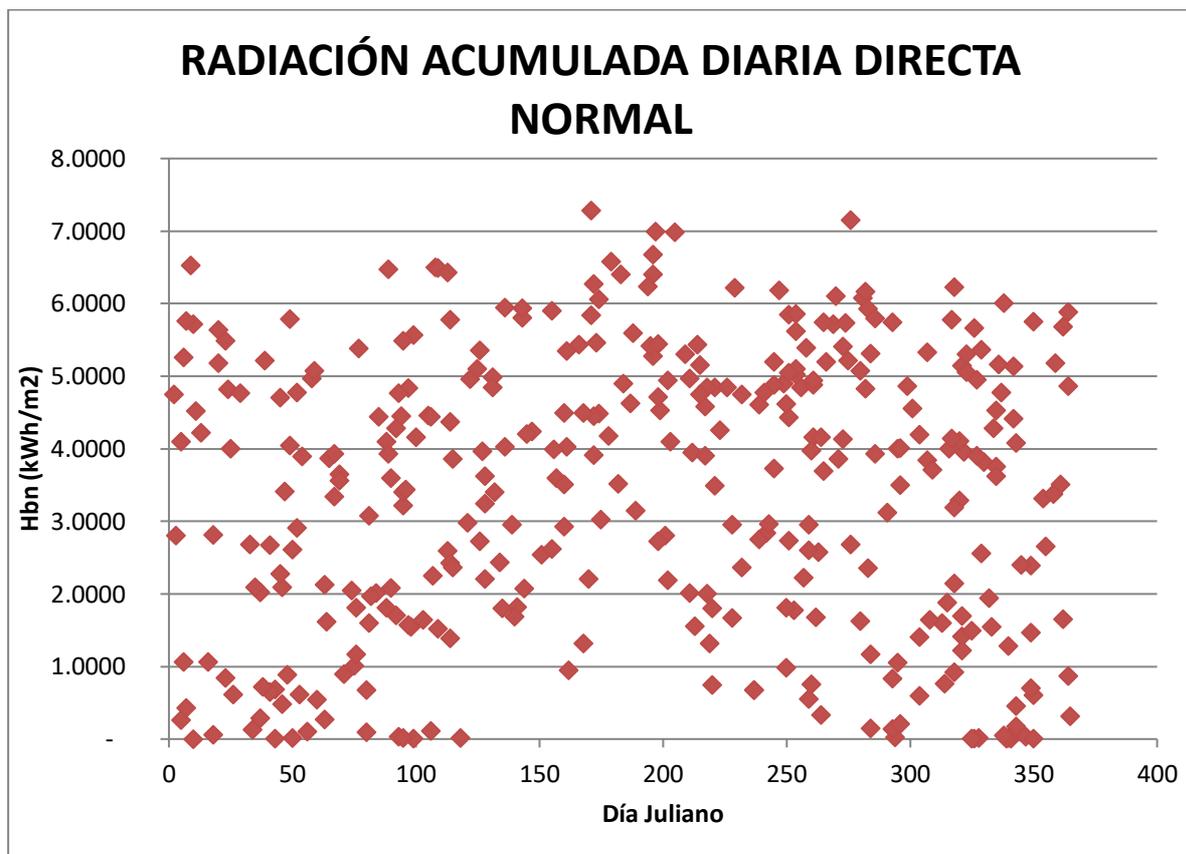


Figura 6.6. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso A.2

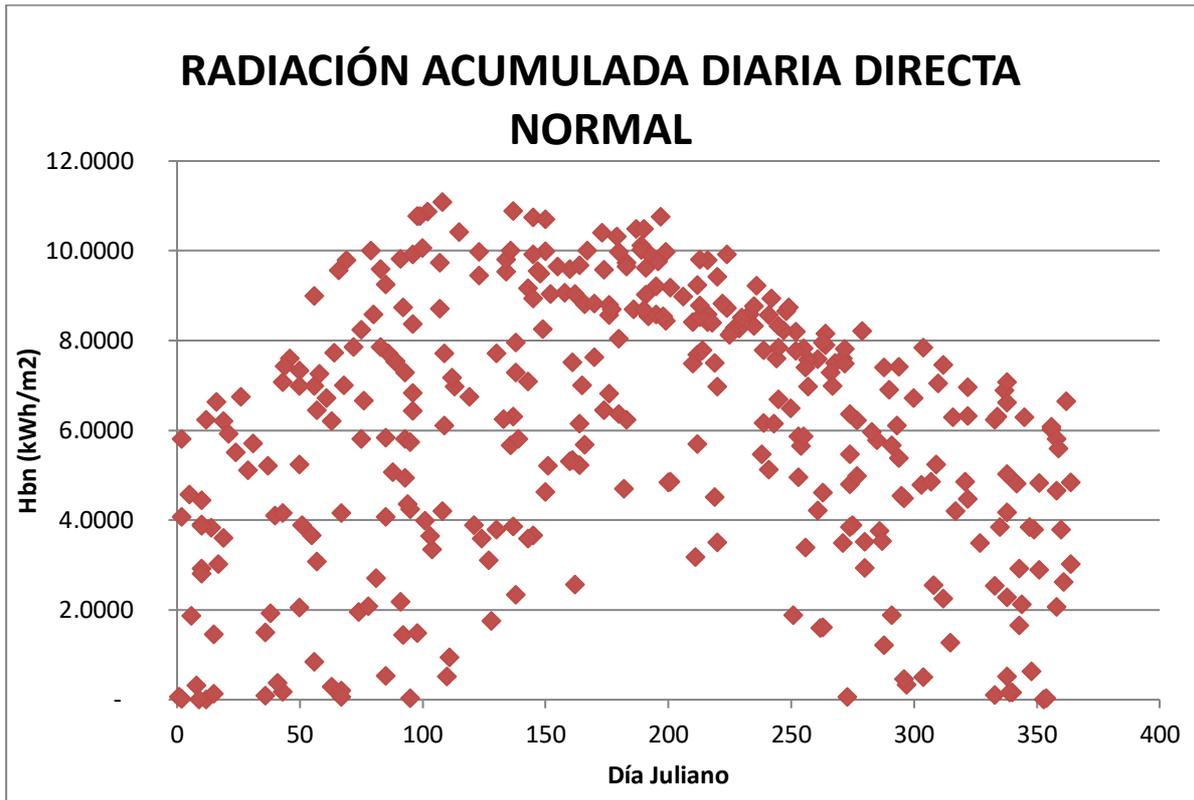


Figura 6.7. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso B

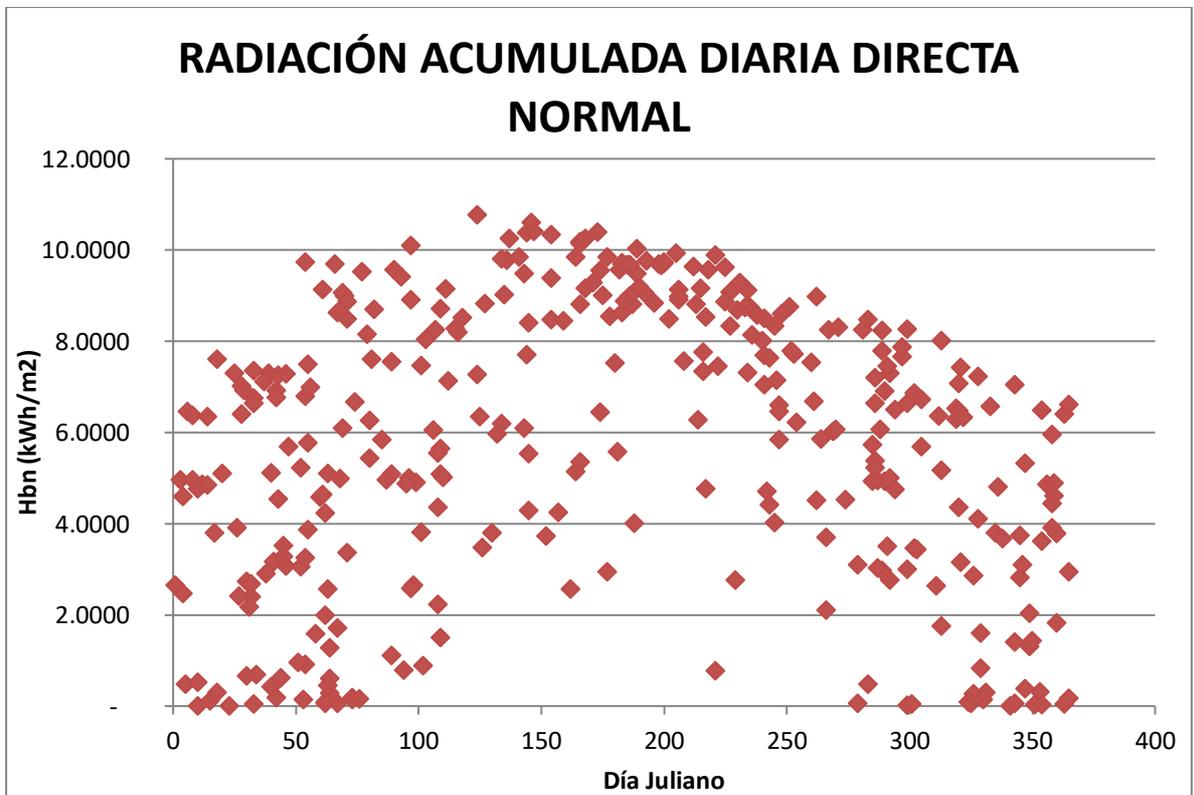


Figura 6.8. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso C

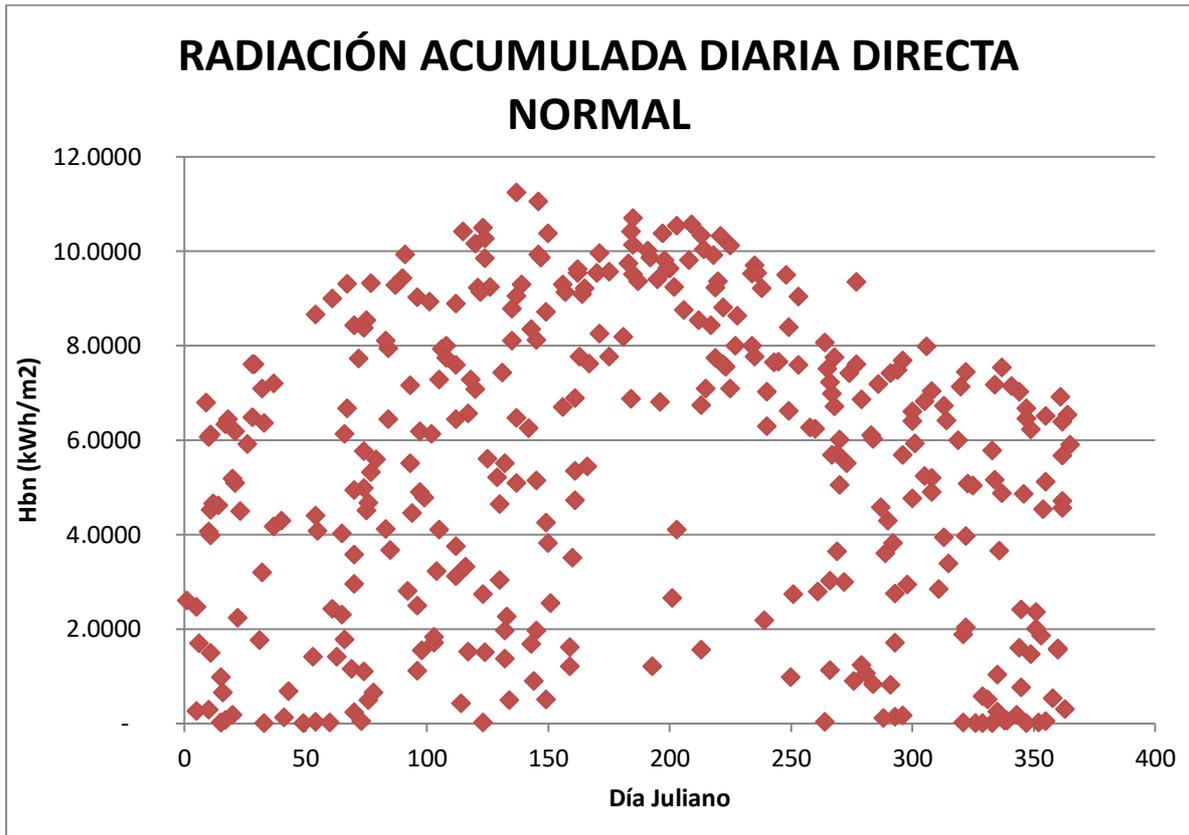


Figura 6.9. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso D

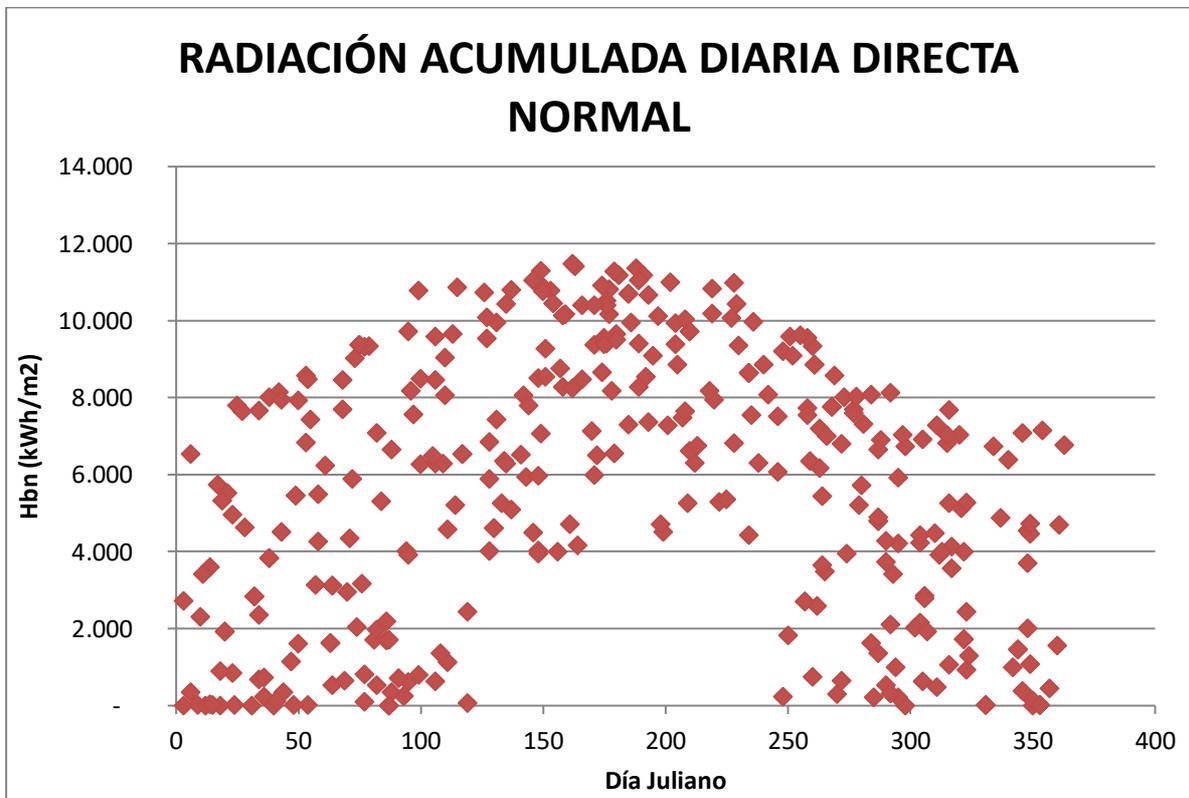


Figura 6.10. Radiación acumulada diaria directa normal, periodo 2000-2019, Caso días descartados

Las conclusiones para esta variable no son tan evidentes como la global horizontal. Se puede observar una ligera tendencia de los puntos hacia una curva pero no se consigue a la perfección. El hecho de que esta componente sea mucho más variable que la anterior justifica las representaciones obtenidas. También, en el análisis de errores, se ha demostrado como esta variable es mucho más imprecisa y presenta errores mucho más elevados que la acumulada global horizontal. El Caso A.2 es el que mayor dispersión de puntos presenta no siguiendo ninguna tendencia.

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

En el presente proyecto se ha cuantificado la incertidumbre de la base de datos radiométricos del GTER de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla asociada a las metodologías de relleno de huecos con medidas de radiación global horizontal y radiación directa normal durante el periodo 2000-2019. Este estudio adquiere cierta importancia, debido que en función del análisis realizado y los resultados obtenidos, la base de datos del GTER adquiere una alta calidad y precisión en sus registros. El hecho de analizar un largo periodo de tiempo, 20 años, adiciona importancia y validez a las medidas conseguidas. Así mismo, ofrece una alta fiabilidad como base para estudios y proyectos futuros.

Sobre los resultados obtenidos al realizar el análisis de errores, se destaca:

- La metodología aplicada en los días del Caso A.2 es la que menor incertidumbre genera justo con la seguida en el Caso D. Tanto la linealización como la ecuación algebraica (Ec. 15) proporciona medidas de calidad.
- Los resultados del Caso B también se consideran aceptables aunque la variable acumulada directa normal puede mejorar ciertos puntos aplicando metodologías de mayor complejidad.
- Los dos casos restantes, el Caso D y el Caso de días descartados son los que mayor incertidumbre generan en sus medidas, por ello, es necesaria la investigación de nuevas metodologías que mejoren notablemente estos resultados.

Los puntos que se comentan a continuación, son algunas de las recomendaciones para futuras mejoras en la calidad y precisión de las mediciones y otorgar una mayor fiabilidad a la base de datos de la estación radiométrica del GTER.

- Calcular las variables de radiación acumuladas 10-minutales, 5-minutales o 5-secundales y realizar comparaciones entre ellas para ver su comportamiento.
- Completar el análisis de errores para los casos restantes, el Caso A.1 (hueco al principio del día <1 hora para un día claro), Caso A.3 (hueco al final del día <1 hora para un día claro) y Caso A.4 (hueco al final del día <1 hora para un día no claro). Elaborar un análisis comparativo entre los cuatro casos que conforman el Caso A y ver la diferencia entre poseer un hueco al principio o final del día y según la tipología del día estudiado.
- Investigar en metodologías más complejas que sustituyan el modelo de correlaciones Md-Mt para el cálculo de radiación directa normal y así reducir la incertidumbre tanto del Caso B como del Caso C.
- Para el Caso de días descartados, realizar la sustitución de días en función a la variable acumulada directa normal y comprobar si de esta manera, se reduce la incertidumbre del método. También sería de interés la comparación entre la sustitución realizada en este proyecto, en función de la variable acumulada global horizontal y la sustitución citada en primer lugar.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pérez Aparicio, E., & Silva Pérez, M. A. (2011). Metodología para el análisis y corrección de la base de datos meteorológicos del GTER aplicación al periodo 2000-2009 : [Proyecto Fin de Carrera] . s.n.].
- [2] Ogunsola, O. T., & Song, L. (2014). Restoration of long-term missing gaps in solar radiation. *Energy and Buildings*, 82, 580–591. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.088>
- [3] American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. (1972). *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. Universidad Estatal de Pensilvania: The American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers.
- [4] Schwandt, M., Chhatbar, K., Meyer, R. et al. (2014). Development and test of gap filling procedures for solar radiation data of the Indian SRRA measurement network. *Energy Procedia*, 57, 1100-1109. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.096>
- [5] Kumar, D., & Ravindra, B. (2020). Gap-Filling Techniques for Solar Radiation Data and Their Role in Solar Resource Assessment. In *Advances in Energy Research*, Vol. 1 (pp. 555–564). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2666-4_53
- [4] Schwandt, M., Chhatbar, K., Meyer, R. et al. (2014). Development and test of gap filling procedures for solar radiation data of the Indian SRRA measurement network. *Energy Procedia*, 57, 1100-1109. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.096>
- [6] Pereira, G. M. S., Stonoga, R. L. B., Detzel, D. H. M., Kuster, K. K., Neto, R. A. P., & Catussi Paschoalotto, L. A. (2018). Analysis and Evaluation of Gap Filling Procedures for Solar Radiation Data. 2018 IEEE 9th Power, Instrumentation and Measurement Meeting (EPIM), 1–6. <https://doi.org/10.1109/EPIM.2018.8756358>
- [7] Moreno Tejera, S., & Silva Pérez, M. A. (2007). Obtención de modelos Kd-Kt horario y diario a partir del análisis de datos medidos en la estación radiométrica de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. [Proyecto Fin de Carrera] . s.n.].
- [8] Grupo de Termodinámica y Energías Renovables. Recuperado el 12 de mayo de 2021, de <http://estacionmeteo.gter.es/>
- [9] QuestionPro (2002). Tamaño de la muestra. Recuperado el 2 de mayo de 2021, de <https://www.questionpro.com/es/tama%C3%B1o-de-la-muestra.html>
- [10] Bolaños Rodríguez, E. (2012). Muestra y Muestreo. Gestión Tecnológica, Asignatura Estadística para el Desarrollo Tecnológico. 3er semestre. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Tizayuca.

[11] Bueis Bellota, C. de los, Pérez Aparicio, E., & Gómez Camacho, C. (2020). Análisis y corrección de la base de datos meteorológicos del GTER. Aplicación al periodo 2016-2019 : Trabajo Fin de Grado. El autor.

[12] Gobierno de España. Mapa SIAR. Recuperado el 31 de mayo de 2021, de <https://eportal.mapa.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1>

ANEXOS

Anexo I. Comparación de estaciones del SIAR con estación del GTER en el periodo 2000-2019.

Para la sustitución de los días descartados pertenecientes a la base de datos de la estación del GTER en el periodo 2000-2019, es necesaria la comparación de dicha estación con las estaciones del SIAR. De esta manera, se averiguará cuál de ellas presenta una tendencia más cercana a la analizada. Se han seleccionado tres de las estaciones del SIAR por su proximidad a la del GTER, la estación de La Rinconada, la de Guillena y la de Sanlúcar la Mayor. En este anexo se amplía la información del Capítulo 5, donde solo aparecía la referente al año 2013 a modo de ejemplo.

En la siguiente tabla, se recopila toda la información necesaria para la comparación, el error obtenido de cada una de las estaciones con respecto a la del GTER, el coeficiente de determinación (R^2) de cada comparación y la ordenada en el origen de cada gráfica.

Año	La Rinconada	Guillena	Sanlúcar la Mayor	Año	La Rinconada	Guillena	Sanlúcar la Mayor	
2000	Error (%)	51,3	-	69,9	Error (%)	1,6	6,1	3,3
	R^2	0,273	-	0,104	R^2	0,971	0,978	0,981
	Ordenada en el origen	2,774	-	3,451	Ordenada en el origen	-0,202	-0,79	-0,104
2001	Error (%)	6,3	0,9	3,6	Error (%)	1,7	3,4	1,3
	R^2	0,977	0,984	0,976	R^2	0,980	0,980	0,970
	Ordenada en el origen	0,146	0,358	-0,144	Ordenada en el origen	-0,431	-0,572	0,227
2002	Error (%)	2,4	2,9	3,9	Error (%)	9,5	9,7	10,9
	R^2	0,986	0,974	0,974	R^2	0,824	0,801	0,812
	Ordenada en el origen	-0,297	-0,026	0,085	Ordenada en el origen	1,307	0,702	1,691
2003	Error (%)	0,01	4,3	1,7	Error (%)	2,3	2,5	0,4
	R^2	0,975	0,974	0,981	R^2	0,986	0,978	0,981

	Ordenada en el origen	-0,099	0,080	-0,061		Ordenada en el origen	0,136	-0,445	0,048
2004	Error (%)	12,5	9,4	13,2	2014	Error (%)	4,9	3,6	4,5
	R ²	0,757	0,749	0,758		R ²	0,982	0,977	0,973
	Ordenada en el origen	2,259	2,583	2,185		Ordenada en el origen	0,167	0,001	0,545
2005	Error (%)	1,6	4,3	4,6	2015	Error (%)	4,2	3,7	4,7
	R ²	0,971	0,970	0,960		R ²	0,988	0,982	0,975
	Ordenada en el origen	0,317	0,419	0,808		Ordenada en el origen	0,420	0,278	0,081
2006	Error (%)	2,1	6,3	0,4	2016	Error (%)	10,8	5,6	8,1
	R ²	0,990	0,979	0,942		R ²	0,825	0,825	0,841
	Ordenada en el origen	-0,022	-0,193	0,409		Ordenada en el origen	1,403	0,705	0,952
2007	Error (%)	2,8	4,5	4,6	2017	Error (%)	5	11,6	6,8
	R ²	0,939	0,932	0,925		R ²	0,977	0,972	0,981
	Ordenada en el origen	0,131	0,443	0,787		Ordenada en el origen	0,153	1,005	0,703
2008	Error (%)	5,5	6,4	11	2018	Error (%)	3,5	2,5	7,3
	R ²	0,799	0,784	0,791		R ²	0,980	0,908	0,941
	Ordenada en el origen	1,801	2,327	2,005		Ordenada en el origen	-0,336	-2,283	0,835
2009	Error (%)	5,6	8,8	1,4	2019	Error (%)	2,9	30,2	0,6
	R ²	0,955	0,979	0,980		R ²	0,988	0,761	0,980
	Ordenada en el origen	-0,015	-0,31	0,128		Ordenada en el origen	0,498	2,018	1,877

Tabla A.I.1. Análisis comparativo de las gráficas de datos de radiación global horizontal acumulada diaria de las estaciones de SIAR vs GTER en el periodo 2000-2019

En los años 2018 y 2019 la estación del SIAR seleccionada para servir de referencia no ha sido la que presenta menor error debido que su ordenada en el origen es relativamente alta. Se puede observar en la Figura A.I.52 y Figura A.I.56 como la línea de tendencia está ligeramente desplazada paralelamente, alejándose de los valores más próximos de la estación del GTER. Por este motivo, se selecciona la siguiente estación de menor error.

Seguidamente, se insertan las gráficas comparativas de cada estación seleccionada del SIAR con la del GTER para cada año.

Las gráficas resultantes para el año 2000:

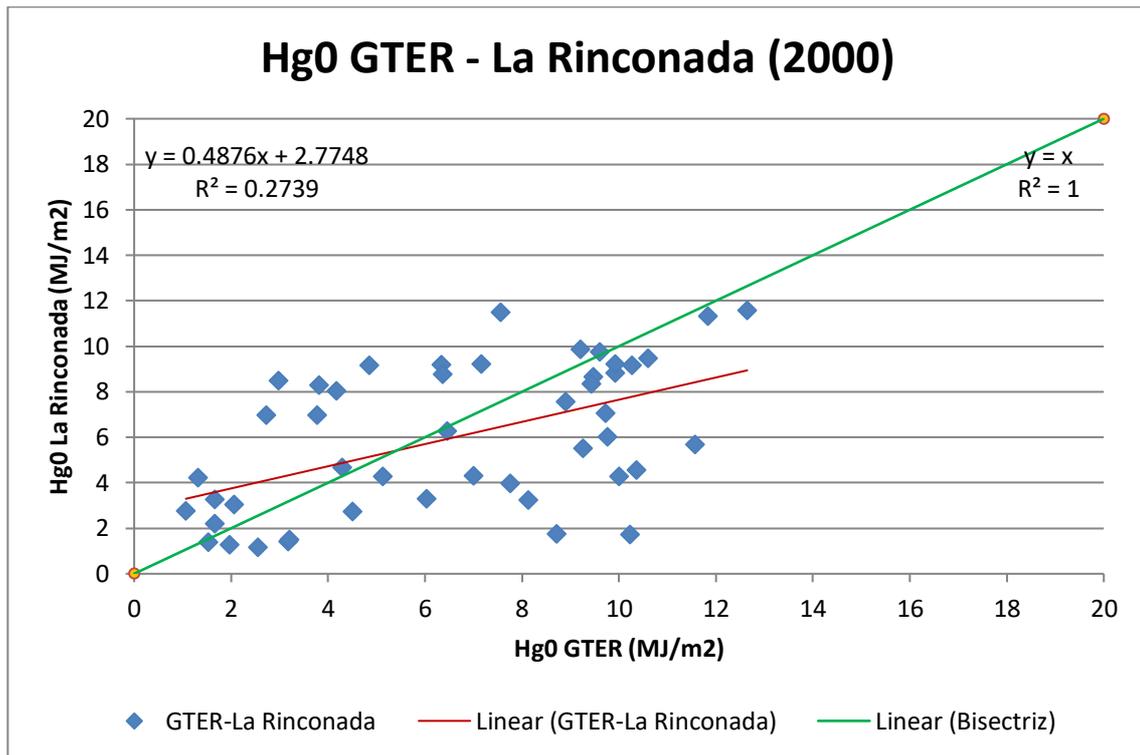


Figura A.I.1. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2000

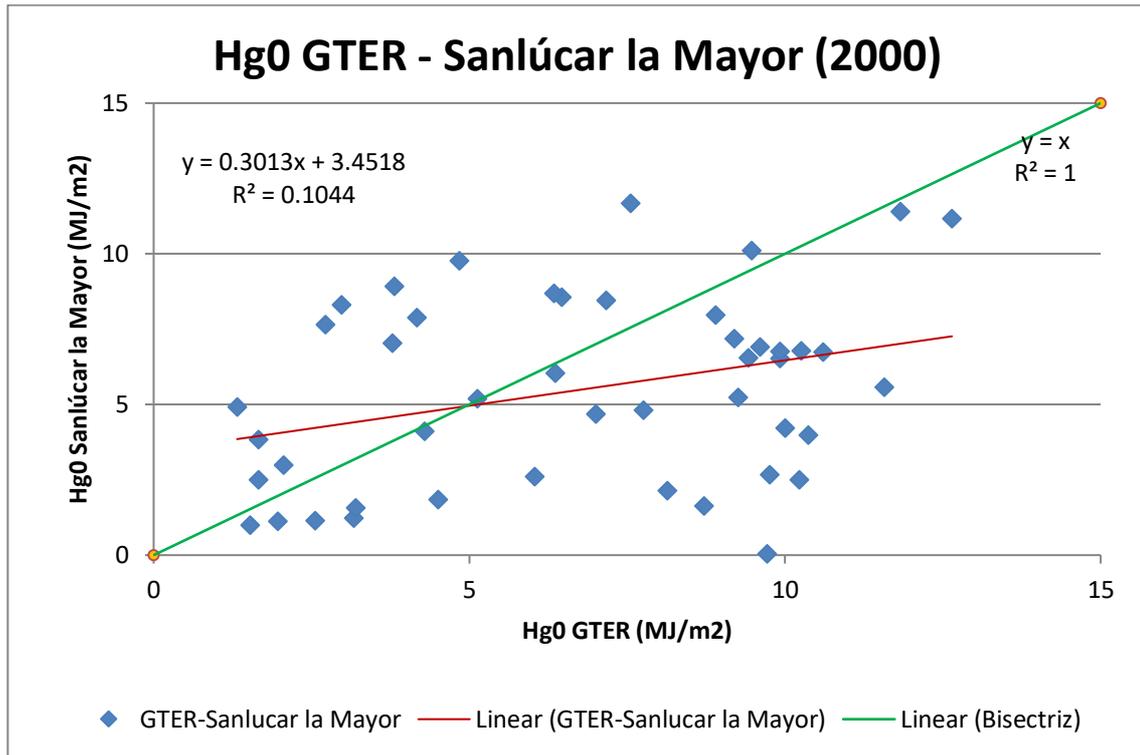


Figura A.I.2. Comparación Hg₀ GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2000

Las gráficas resultantes para el año 2001:

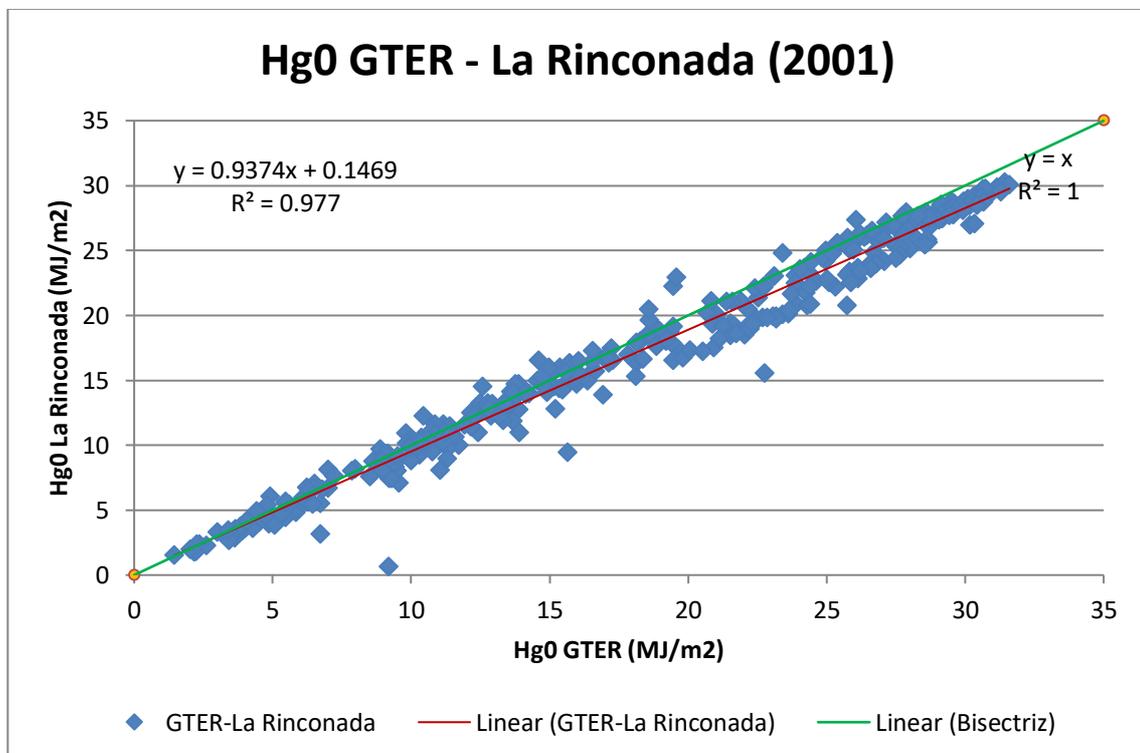


Figura A.I.3. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2001

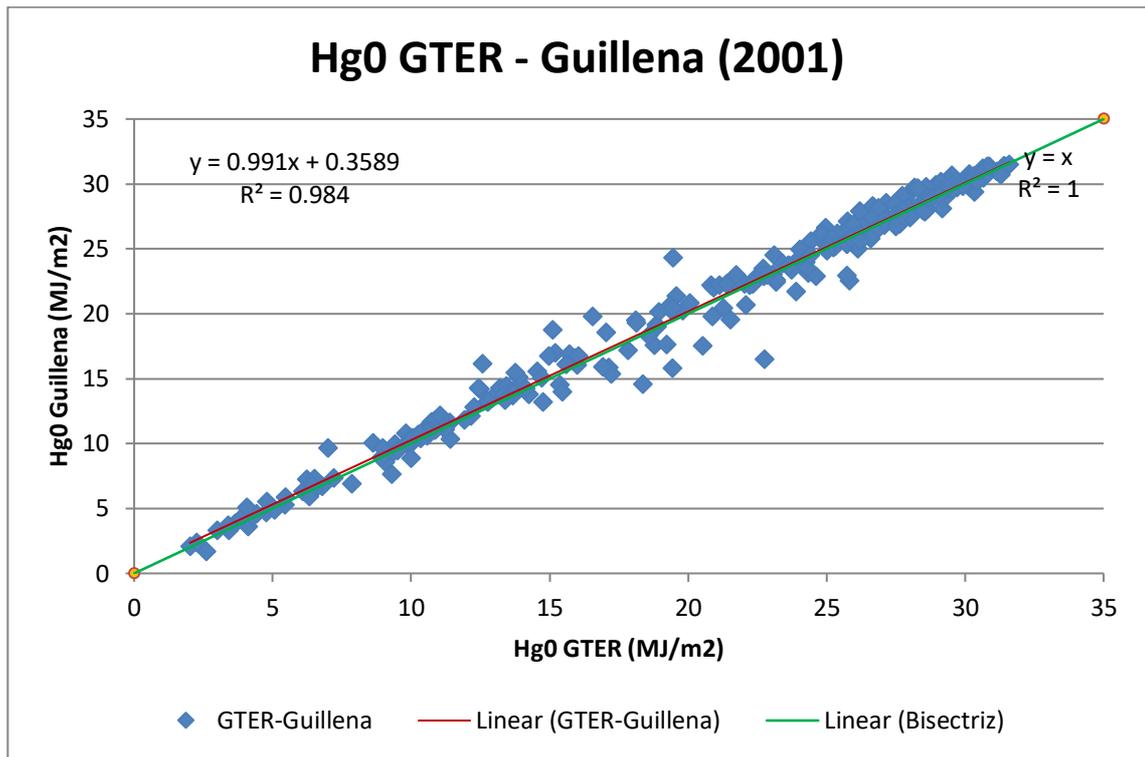


Figura A.I.4. Comparación H_g0 GTER-Guillena, año 2001

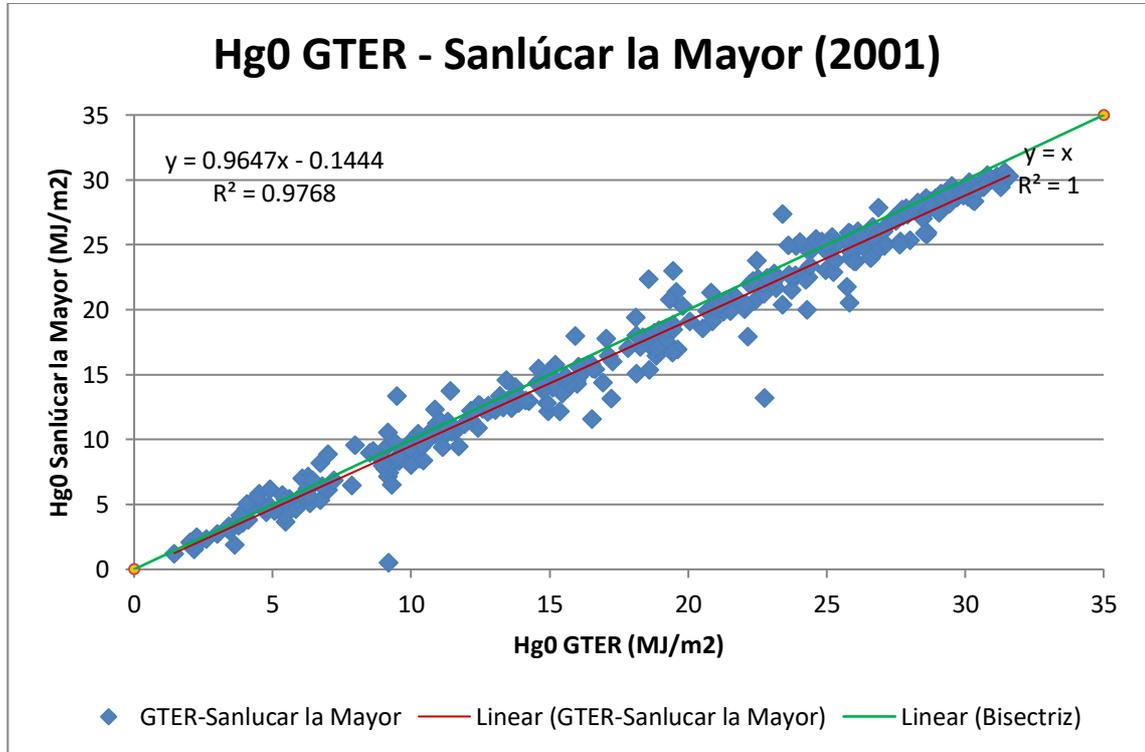


Figura A.I.5. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2001

Las gráficas resultantes para el año 2002:

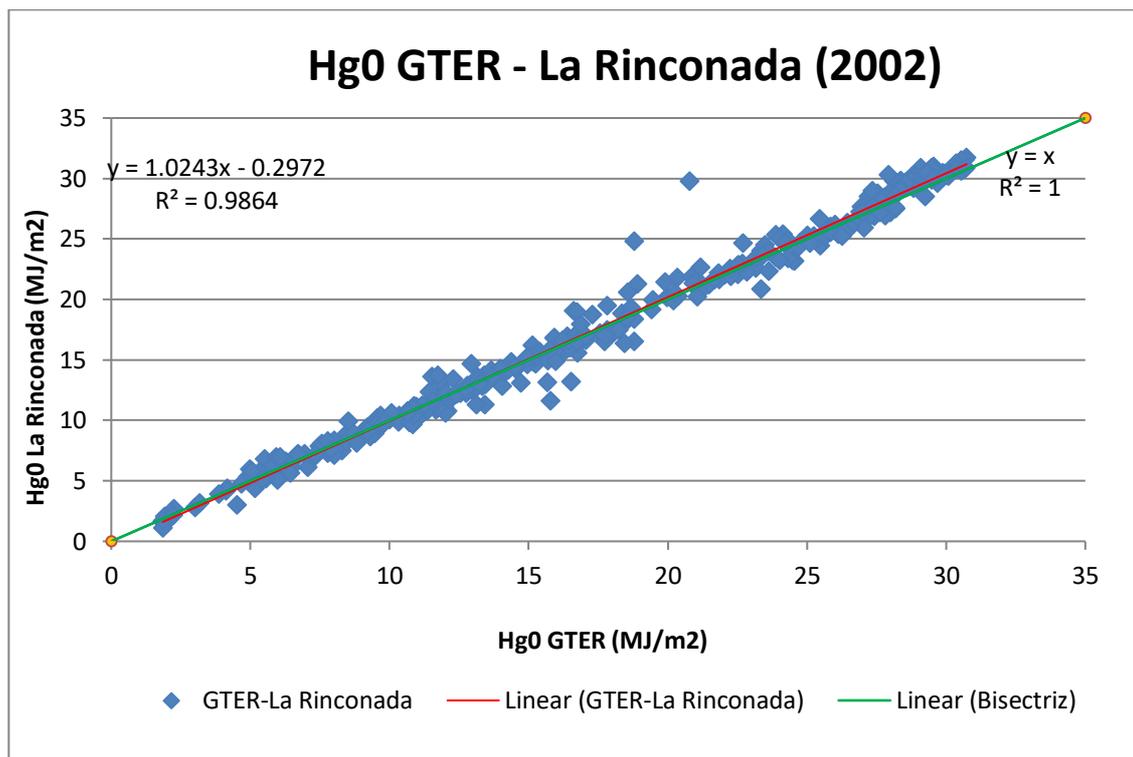


Figura A.I.6. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2002

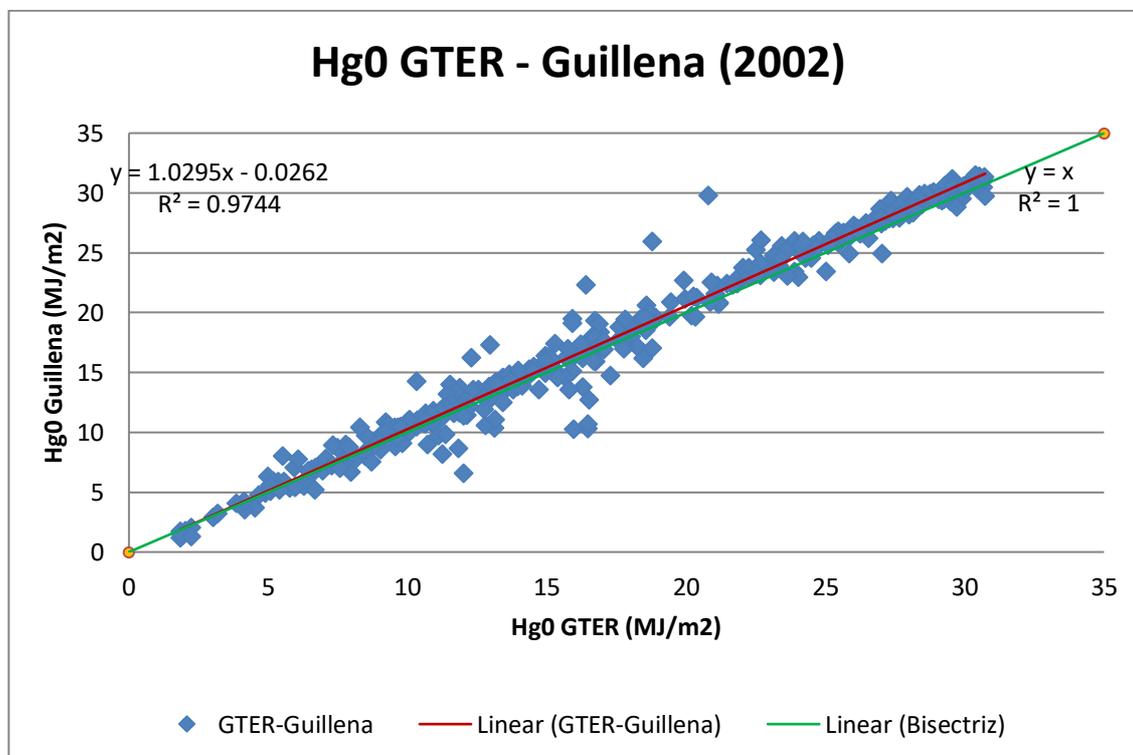


Figura A.I.7. Comparación Hg₀ GTER-Guillena, año 2002

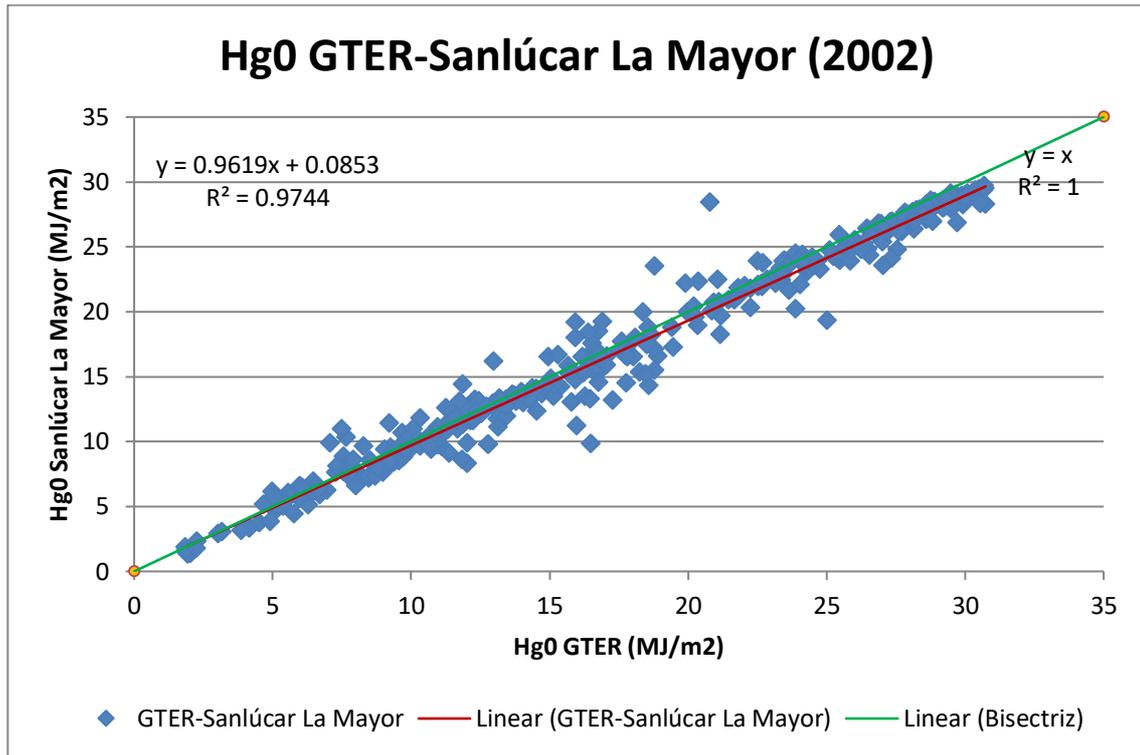


Figura A.I.8. Comparación Hg₀ GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2002

Las gráficas resultantes para el año 2003:

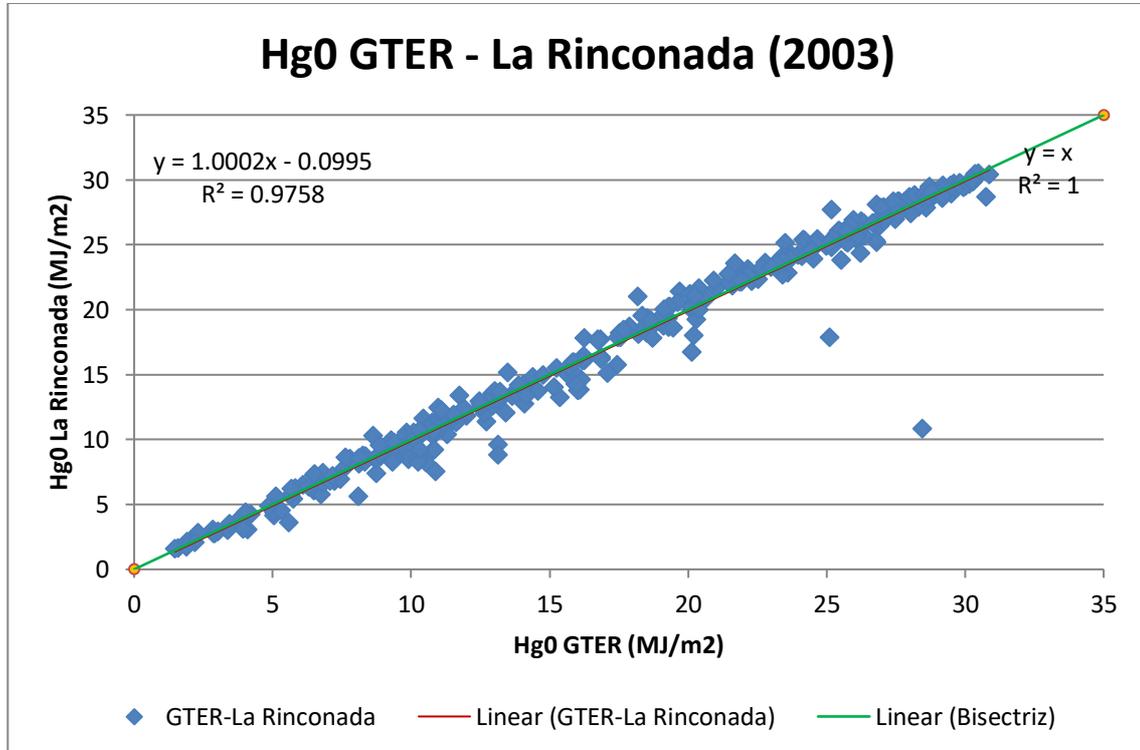


Figura A.I.9. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2003

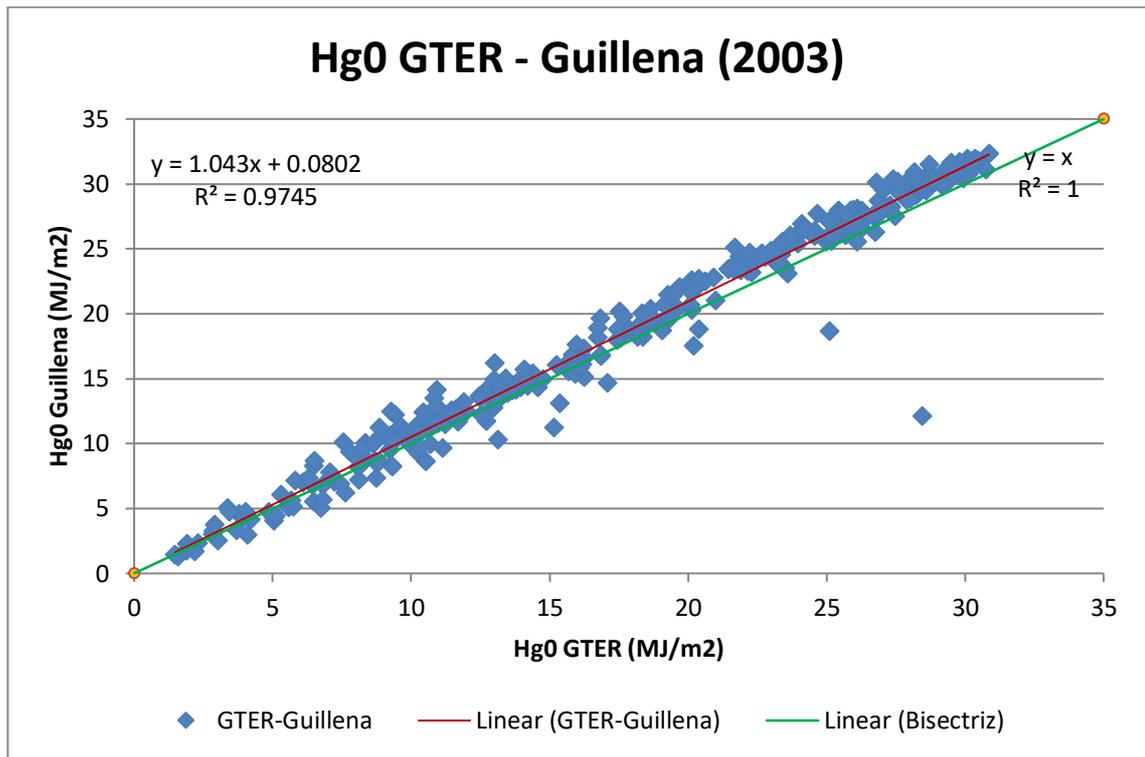


Figura A.I.10. Comparación H_g0 GTER-Guillena, año 2003

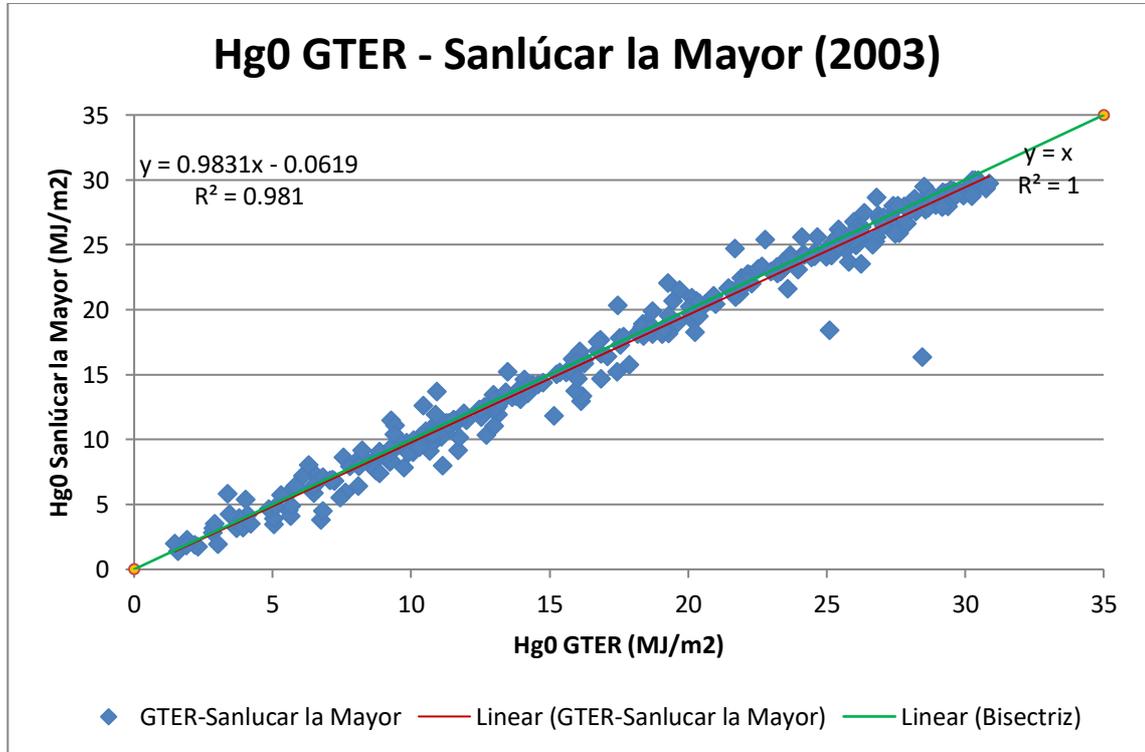


Figura A.I.11. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2003

Las gráficas resultantes para el año 2004:

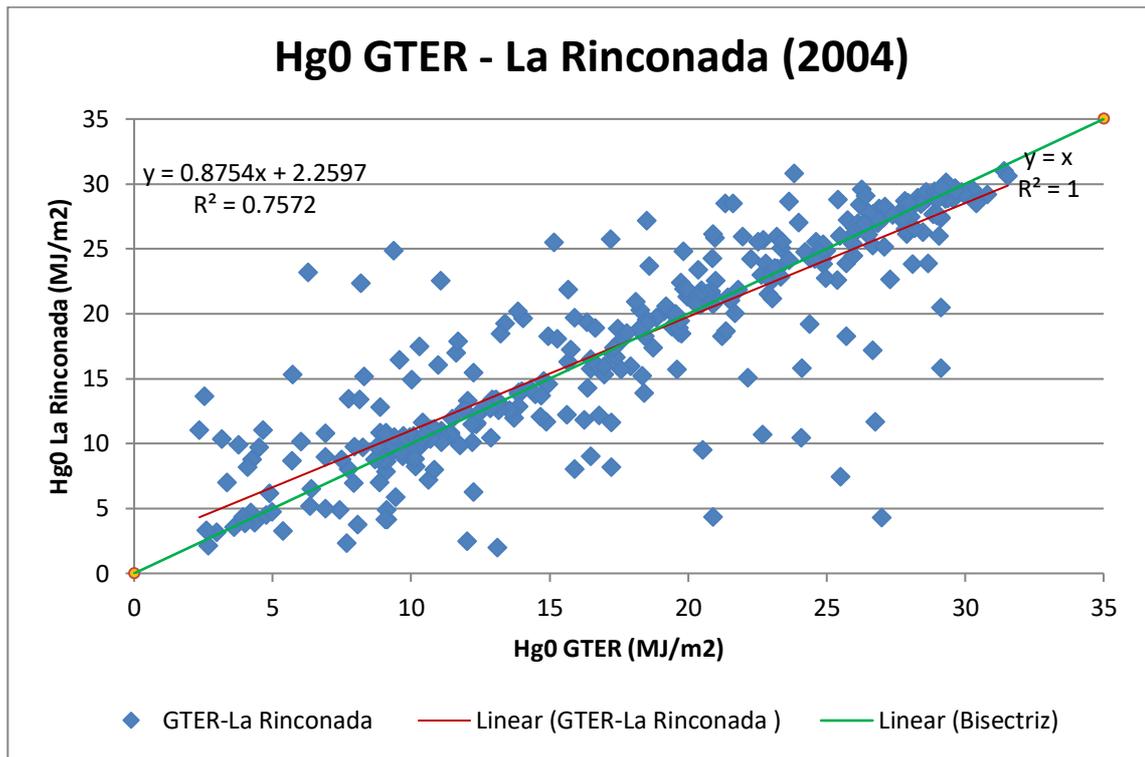


Figura A.I.12. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2004

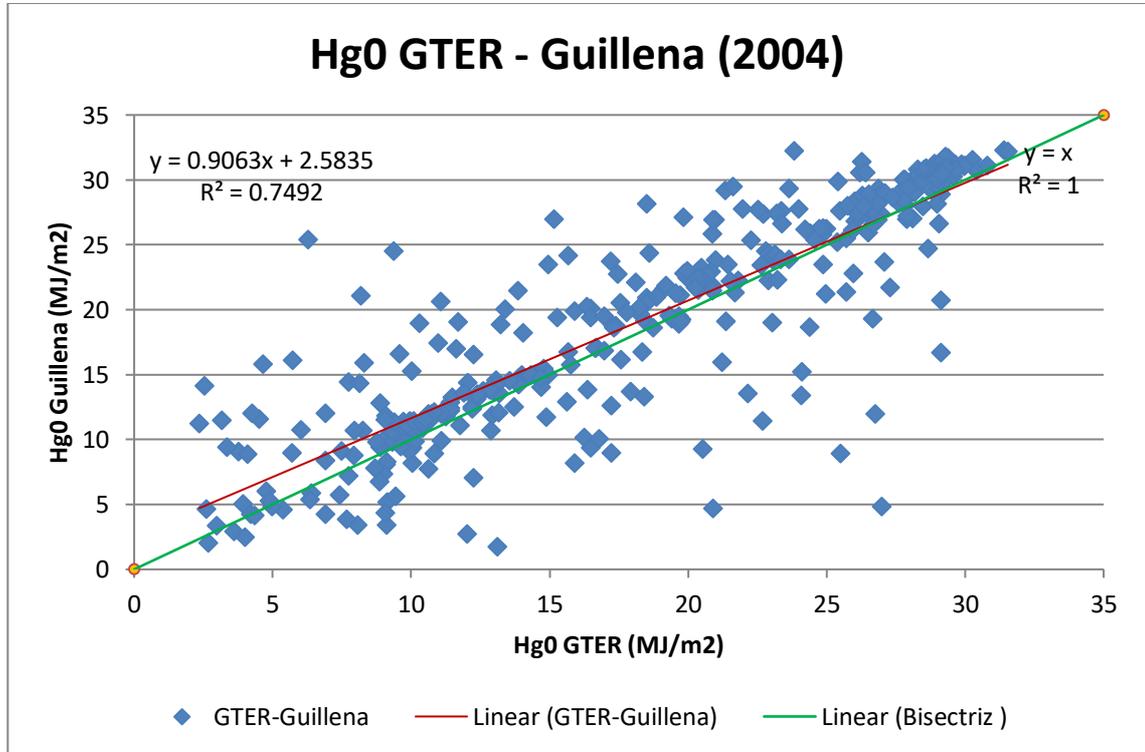


Figura A.I.13. Comparación H_g0 GTER-Guillena, año 2004

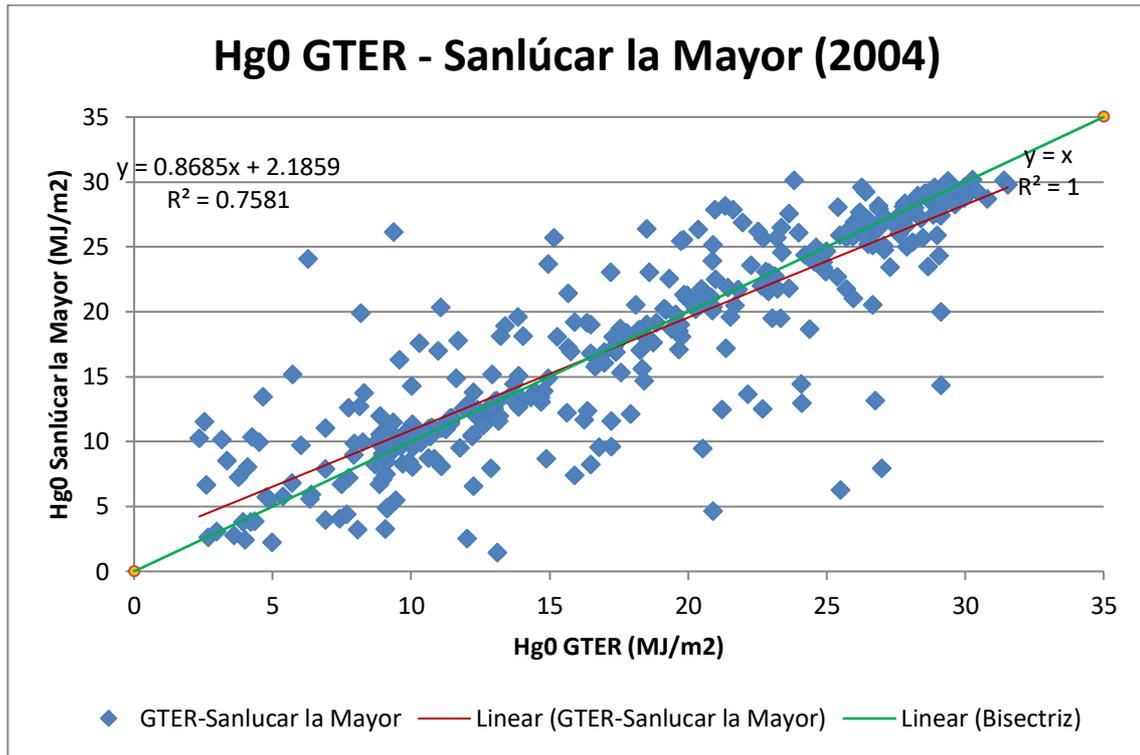


Figura A.I.14. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2004

Las gráficas resultantes para el año 2005:

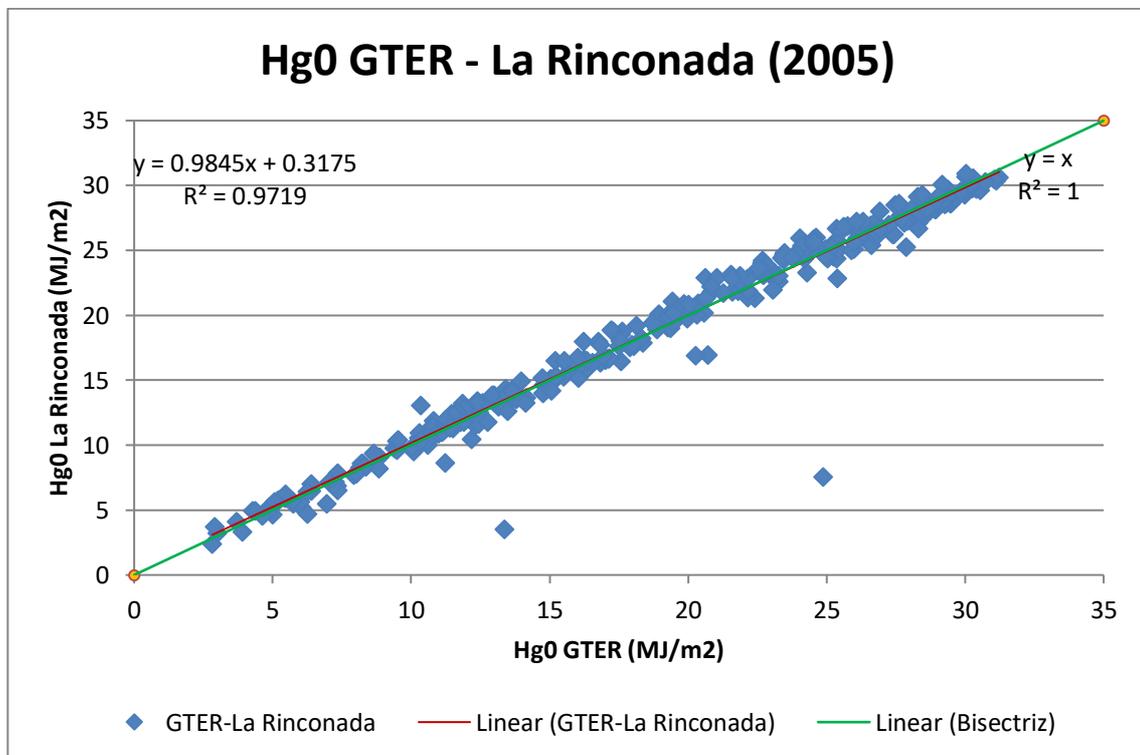


Figura A.I.15. Comparación H_g0 GTER-La Rinconada, año 2005

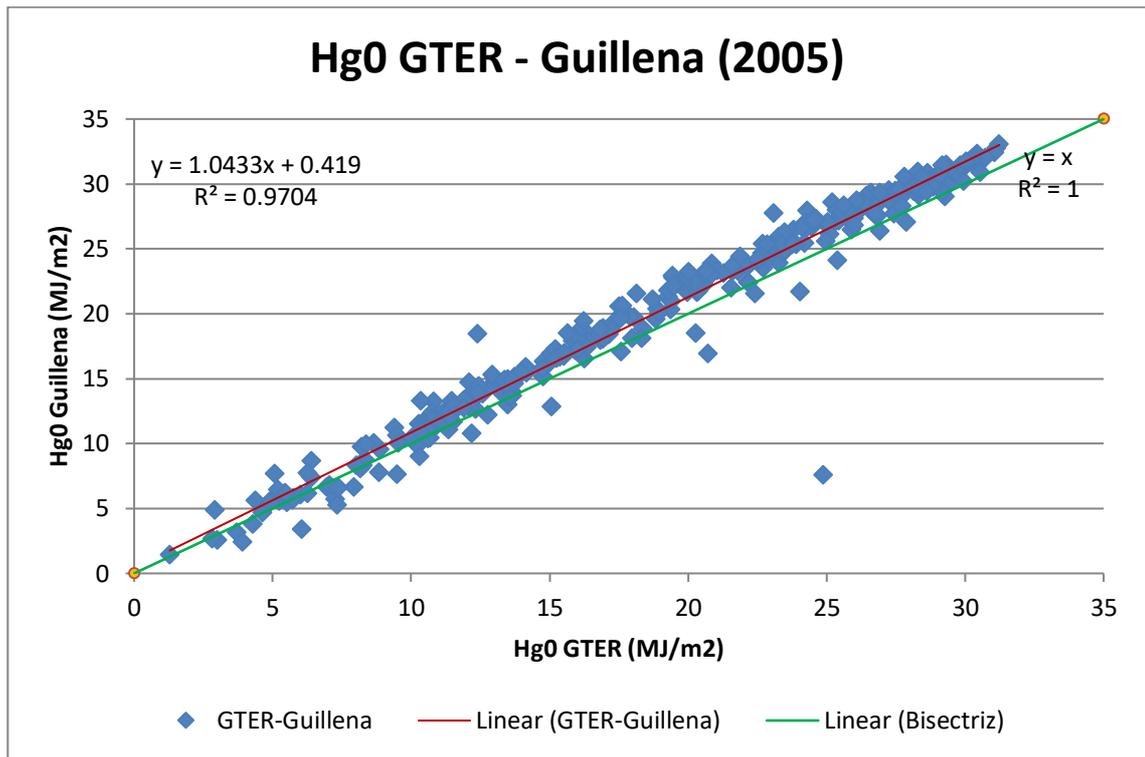


Figura A.I.16. Comparación H_g0 GTER-Guillena, año 2005

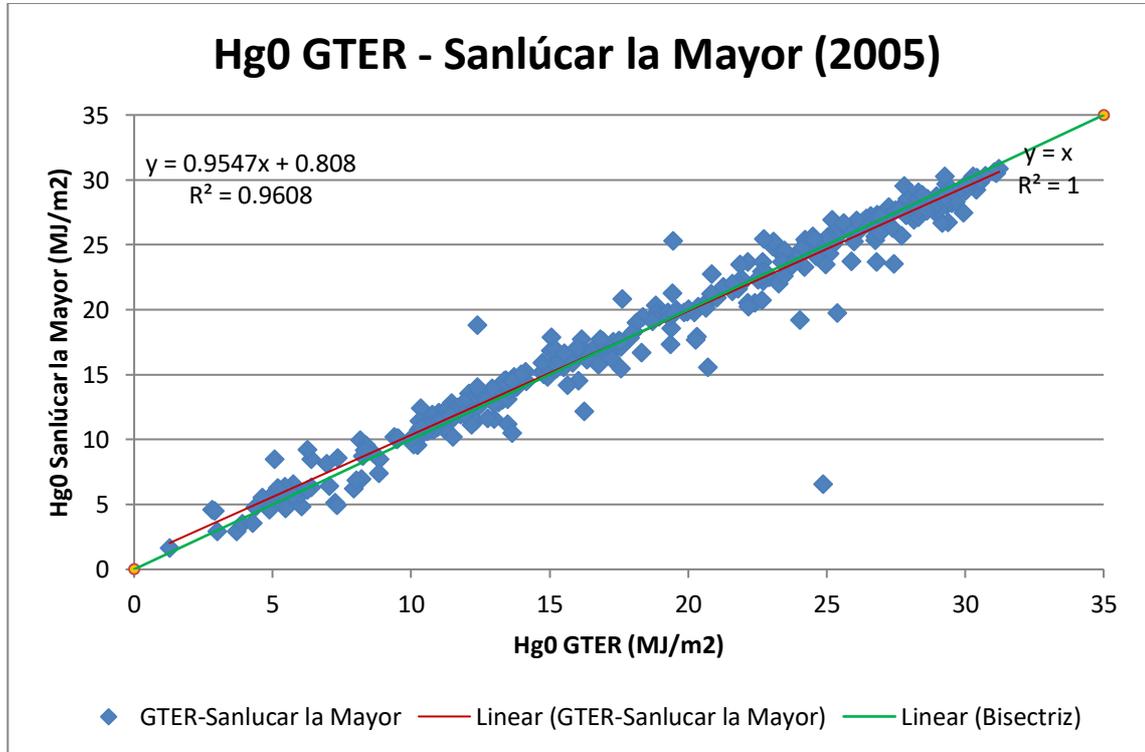


Figura A.I.17. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2005

Las gráficas resultantes para el año 2006:

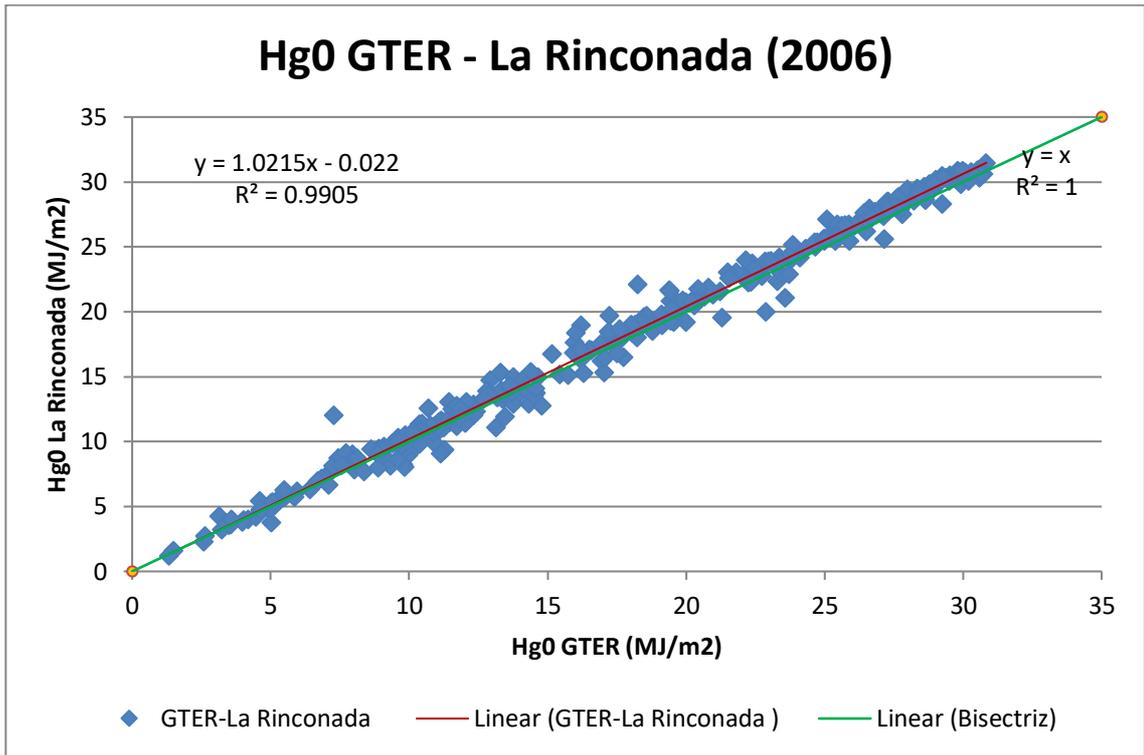


Figura A.I.18. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2006

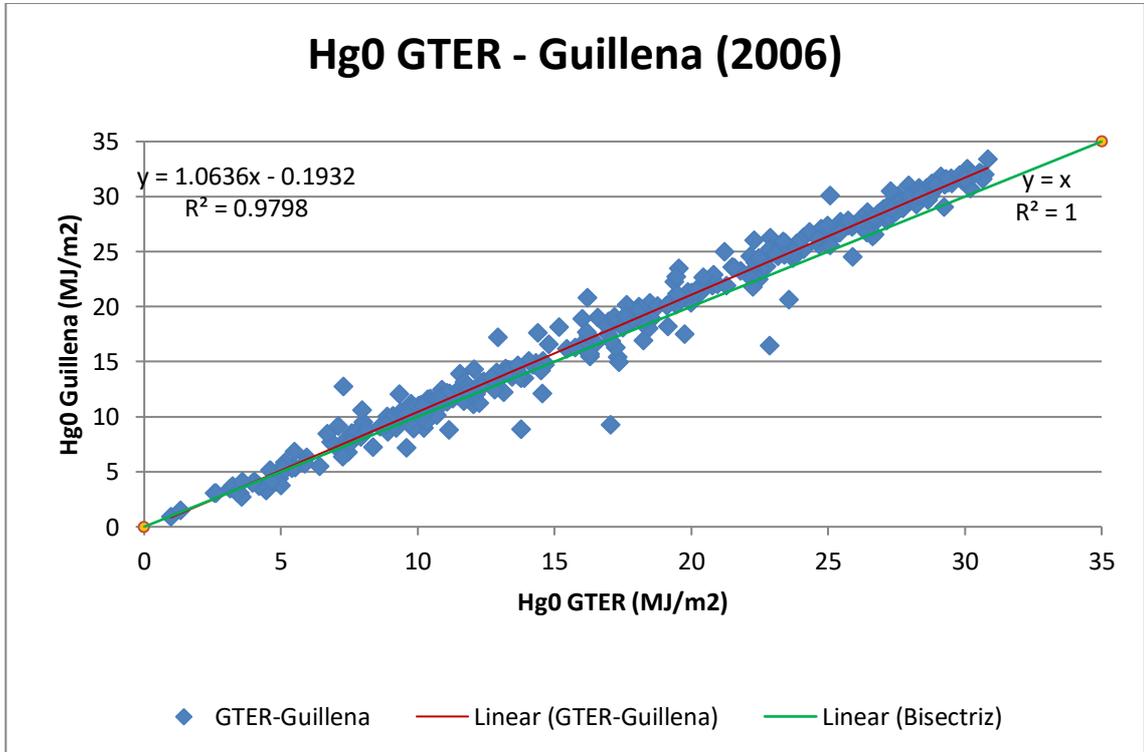


Figura A.I.19. Comparación Hg₀ GTER-Guillena, año 2006

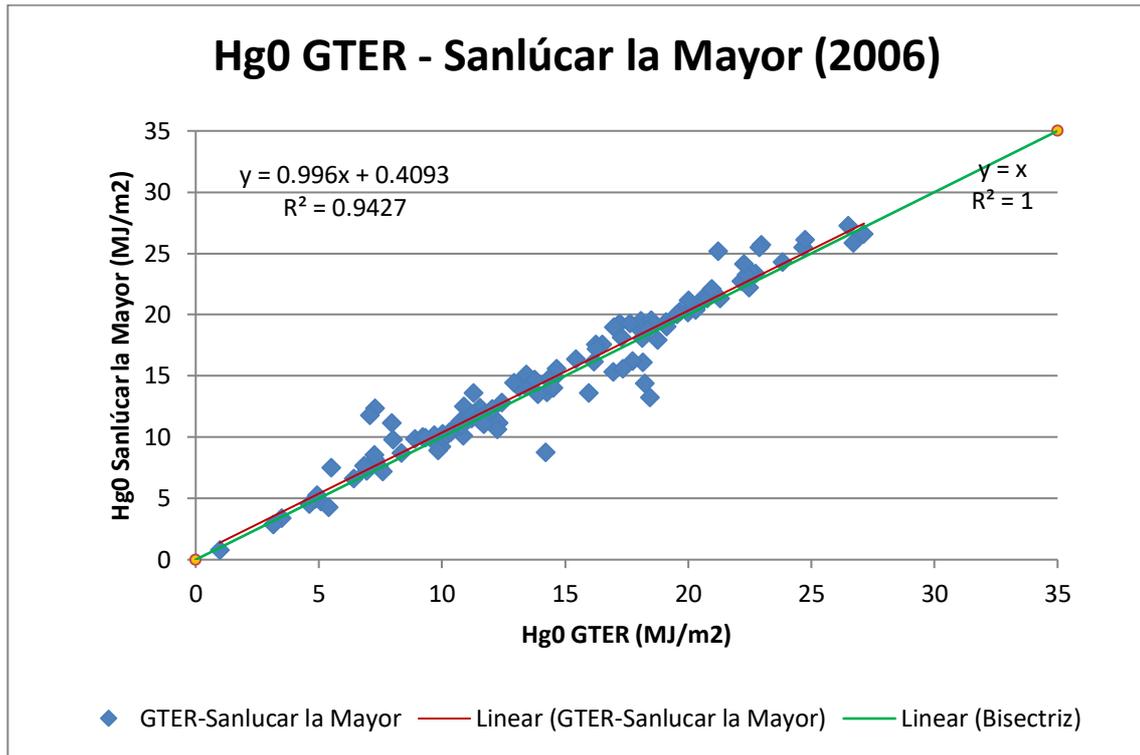


Figura A.I.20. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2006

Las gráficas resultantes para el año 2007:

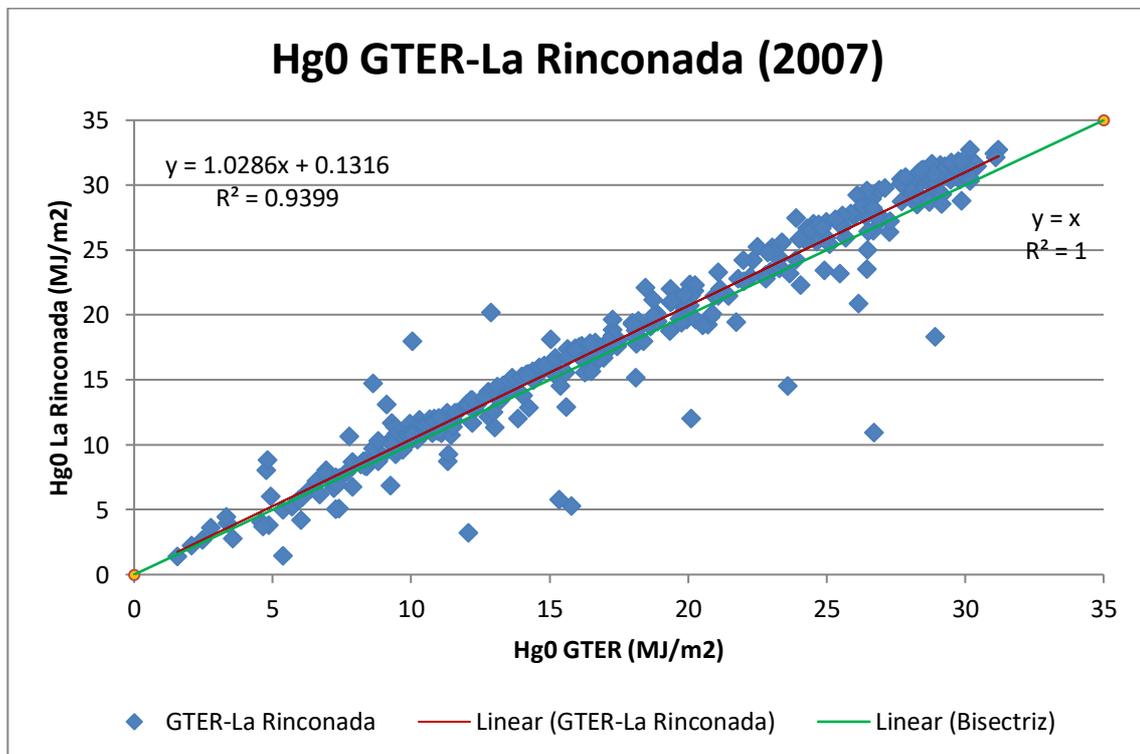


Figura A.I.21. Comparación H_g0 GTER-La Rinconada, año 2007

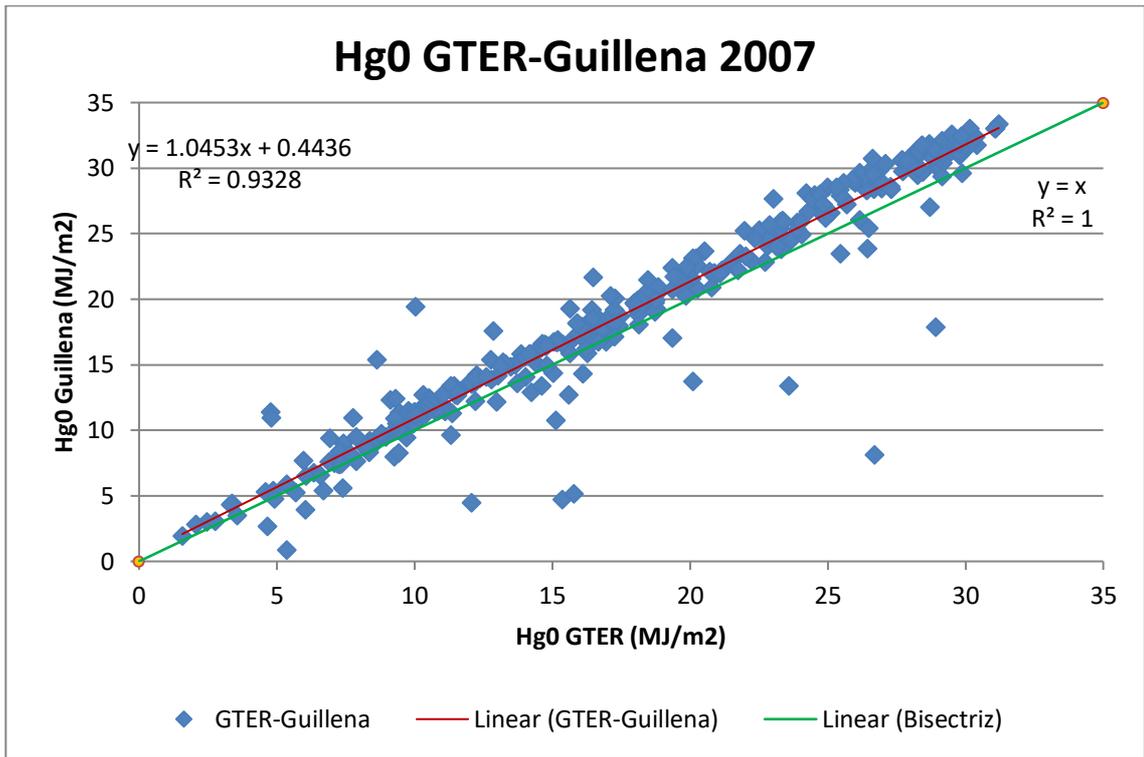


Figura A.I.22. Comparación H_g0 GTER-Guillena, año 2007

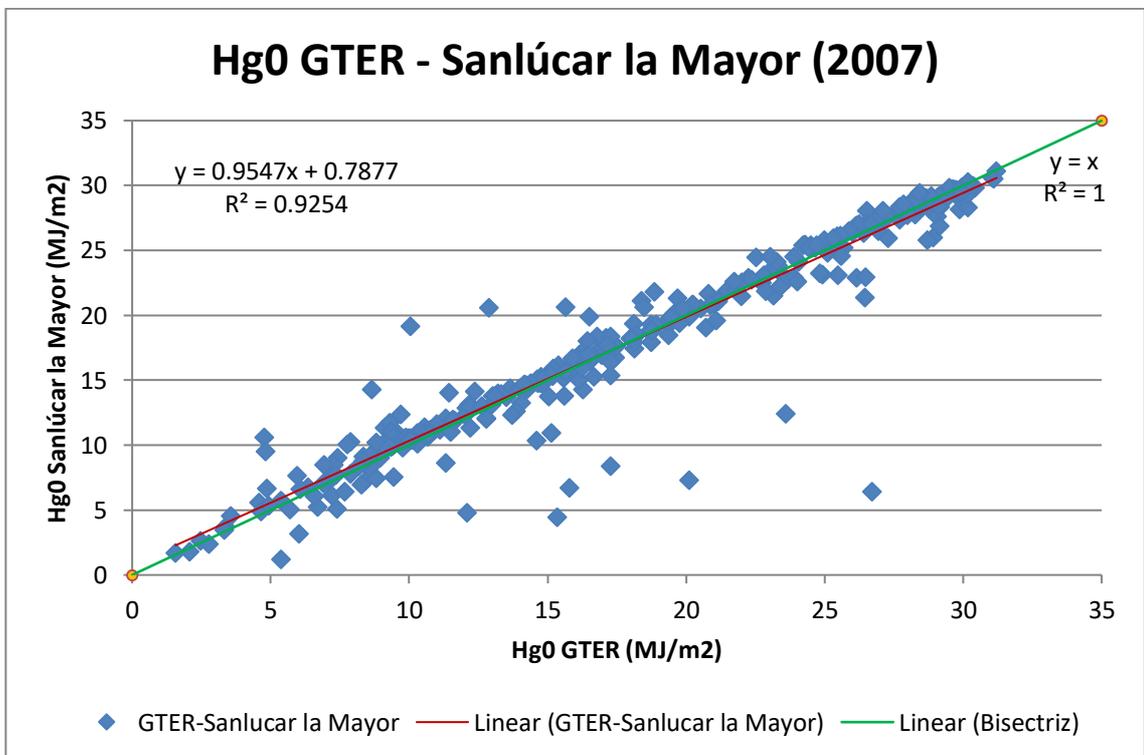


Figura A.I.23. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2007

Las gráficas resultantes para el año 2008:

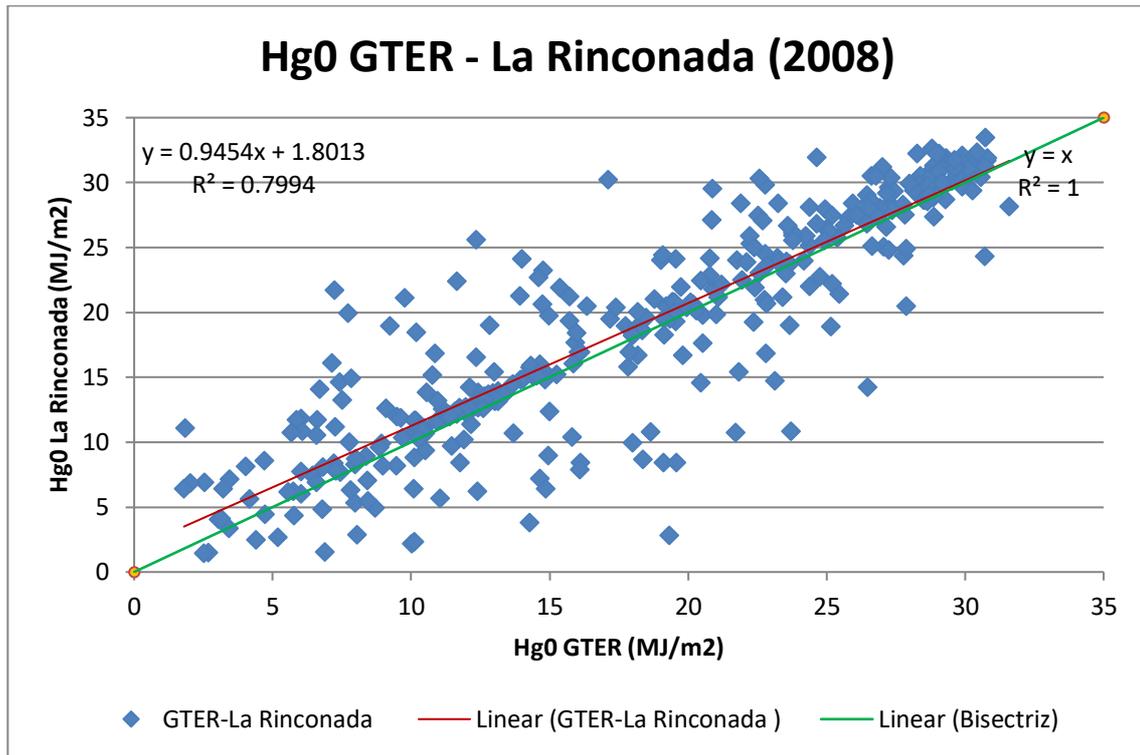


Figura A.I.24. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2008

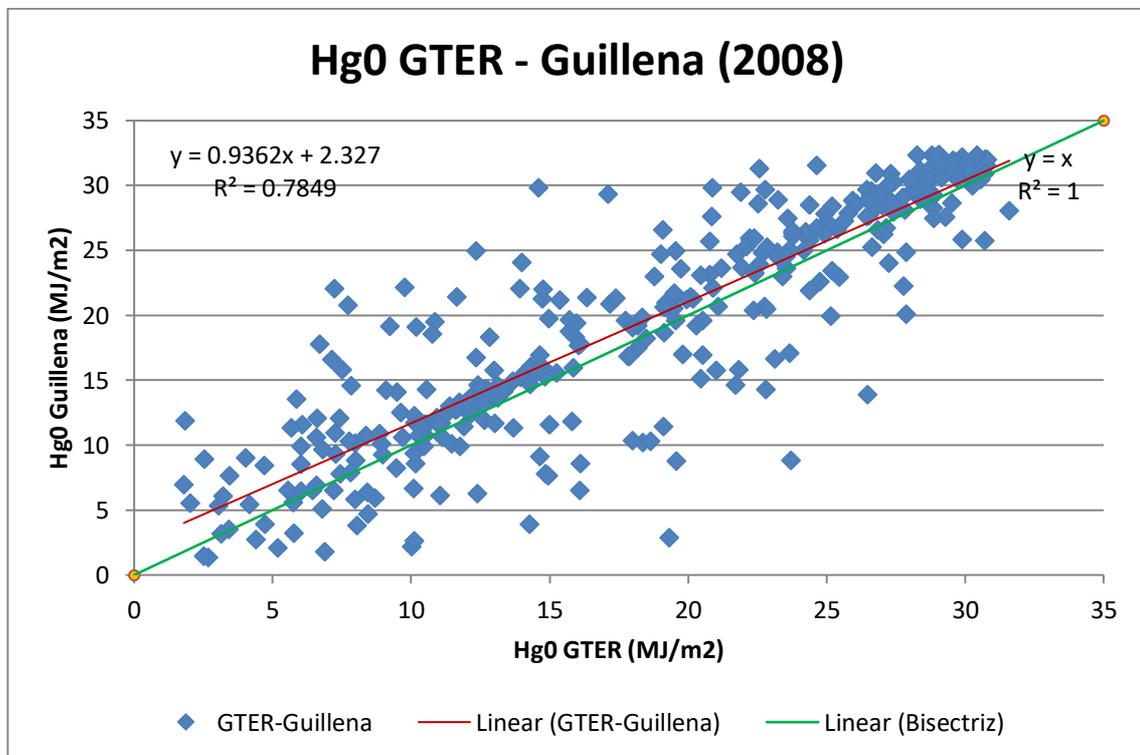


Figura A.I.25. Comparación Hg₀ GTER-Guillena, año 2008

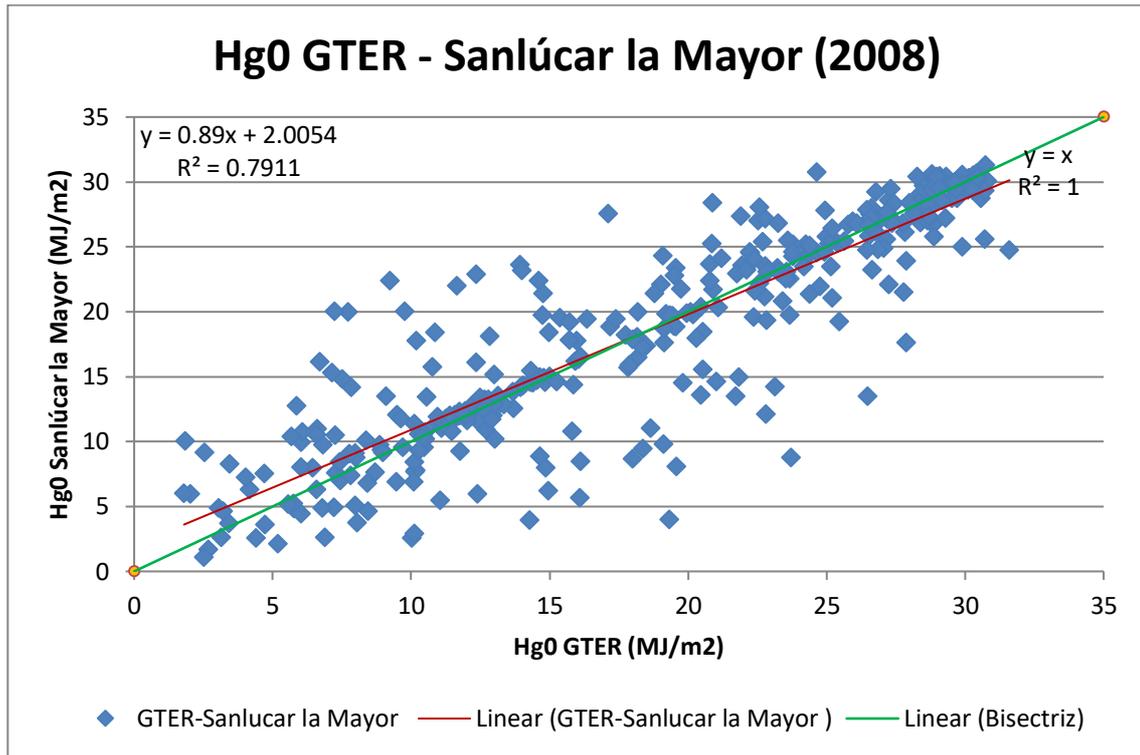


Figura A.I.26. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2008

Las gráficas resultantes para el año 2009:

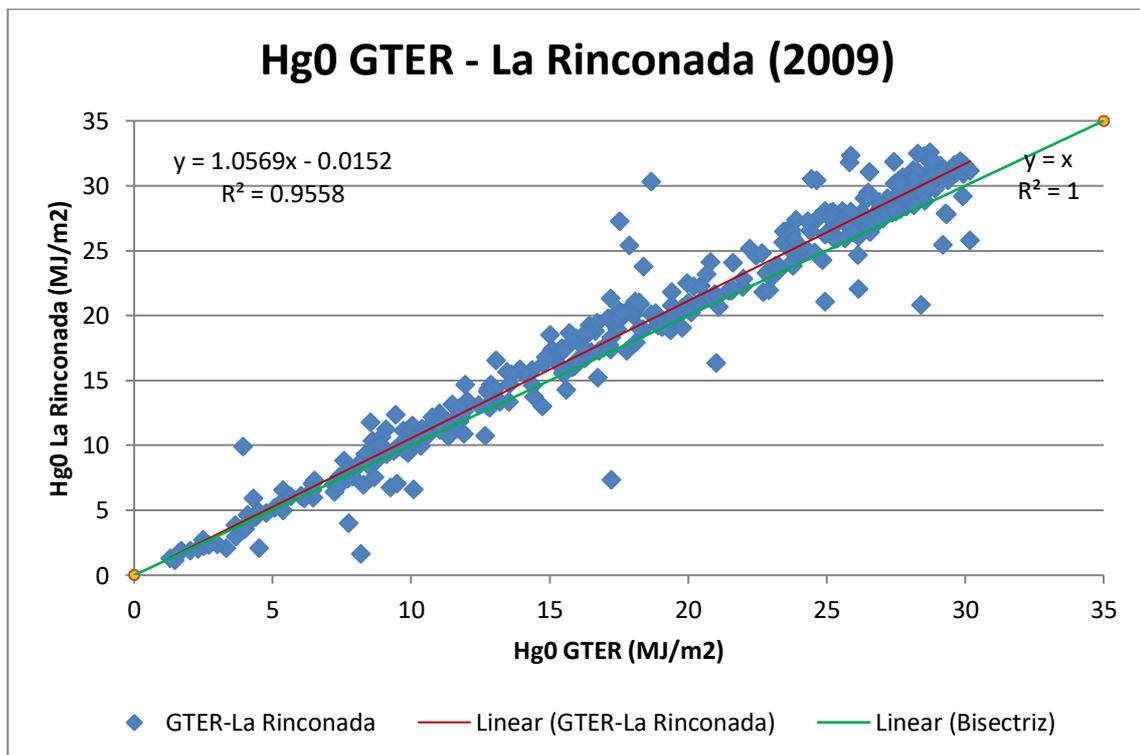


Figura A.I.27. Comparación H_g0 GTER-La Rinconada, año 2009

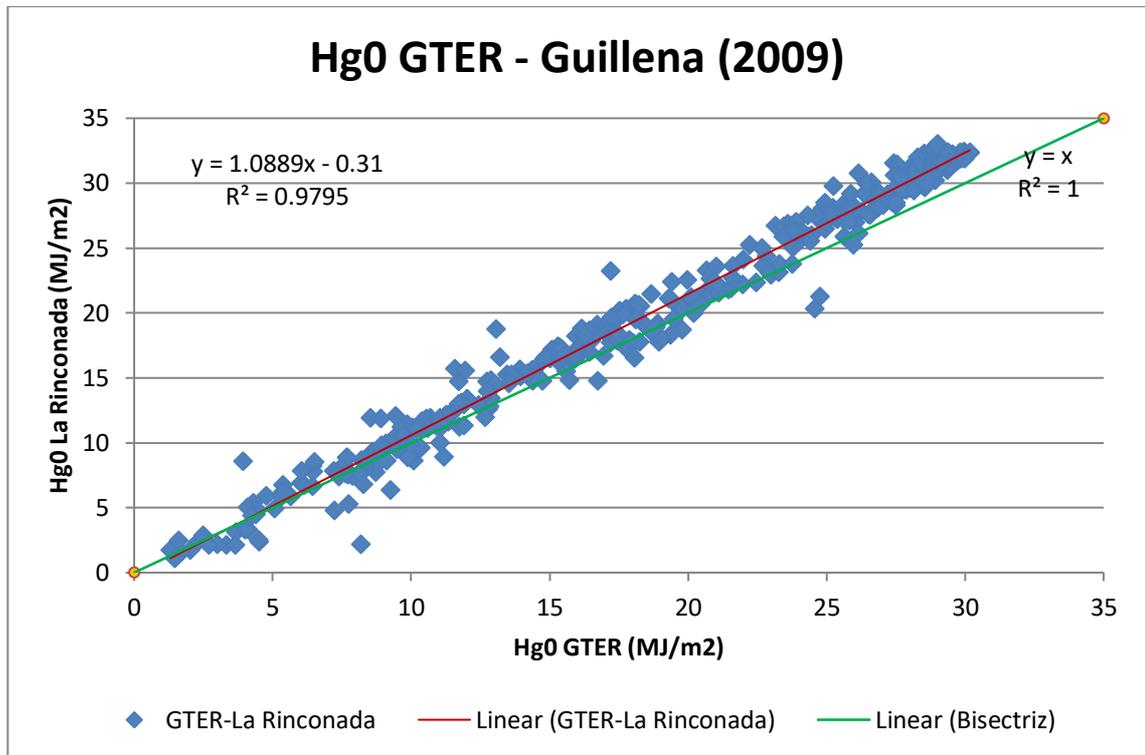


Figura A.I.28. Comparación H₀ GTER-Guillena, año 2009

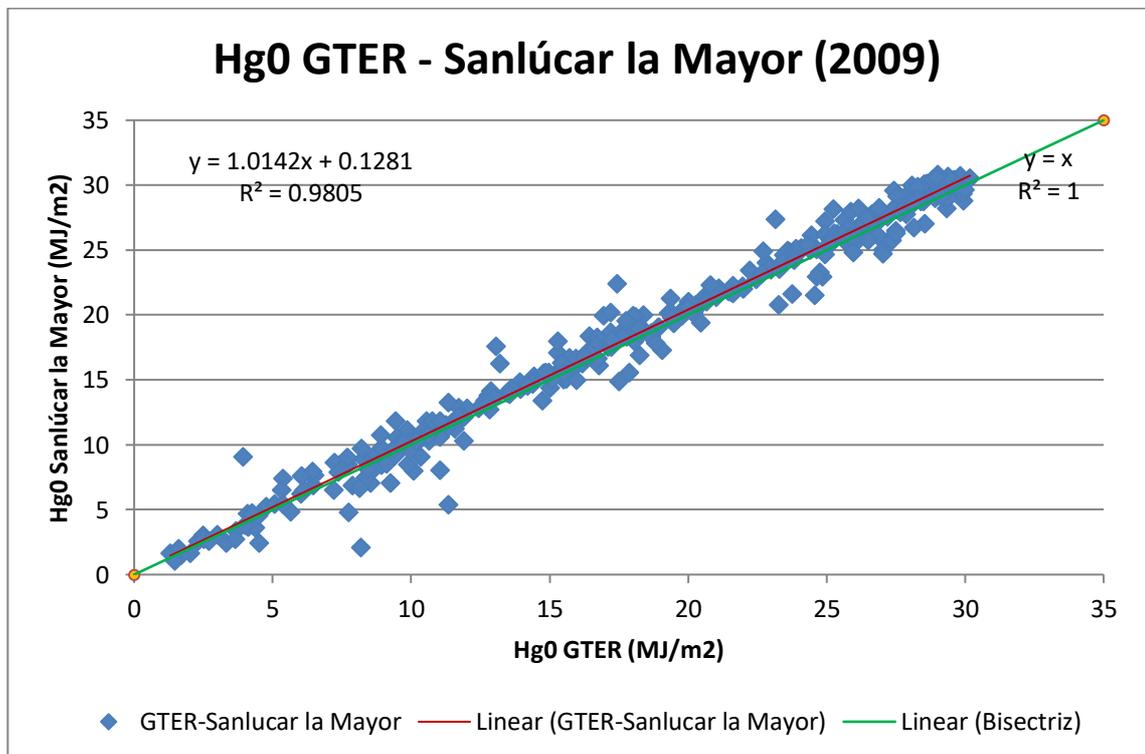


Figura A.I.29. Comparación H₀ GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2009

Las gráficas resultantes para el año 2010:

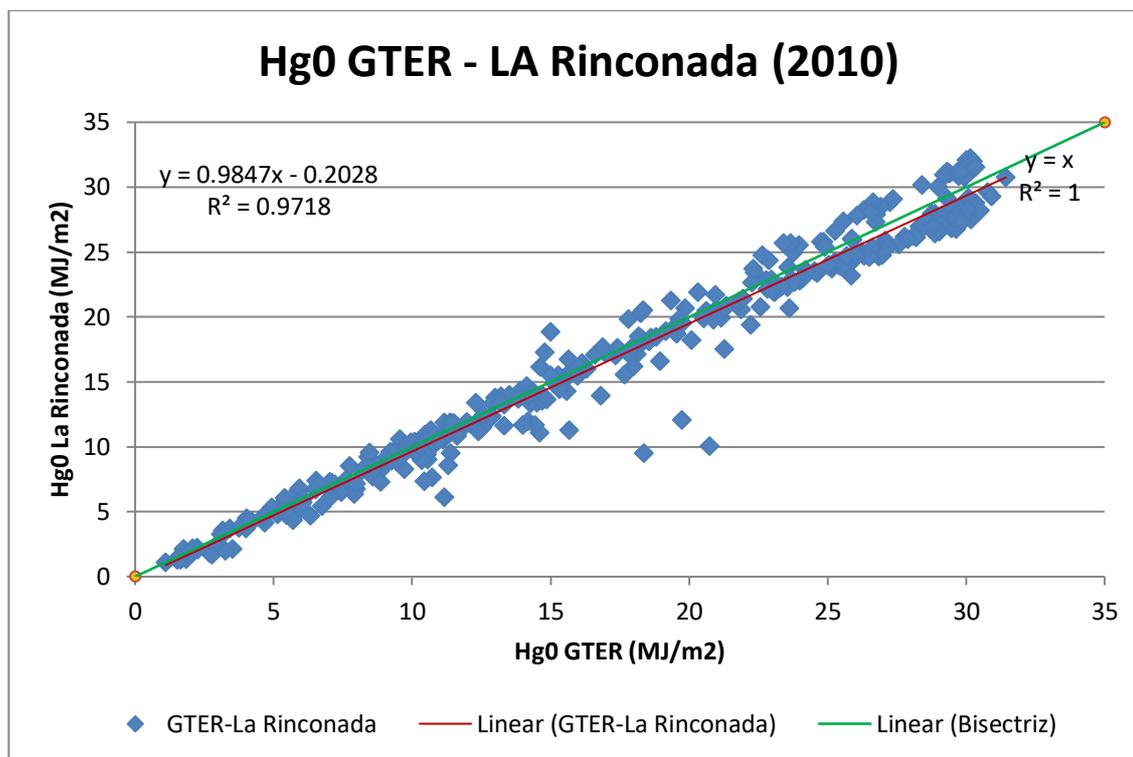


Figura A.I.30. Comparación H_g0 GTER-La Rinconada, año 2010

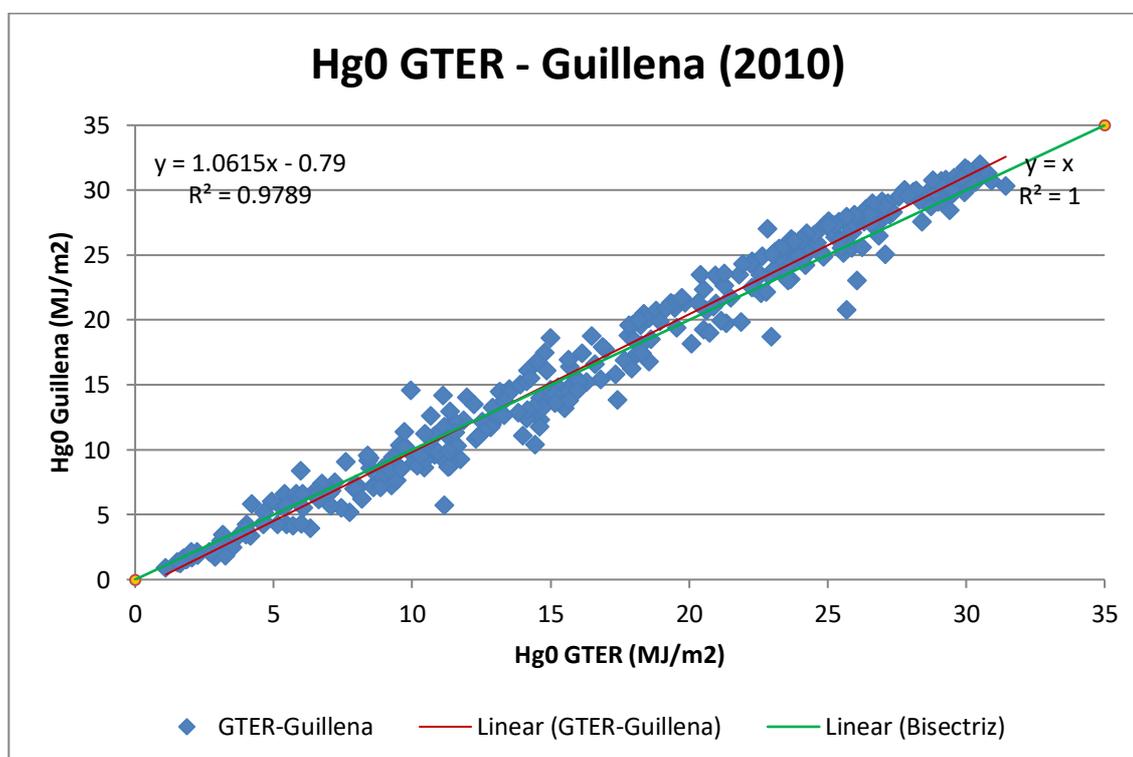


Figura A.I.31. Comparación H_g0 GTER-Guillena, año 2010

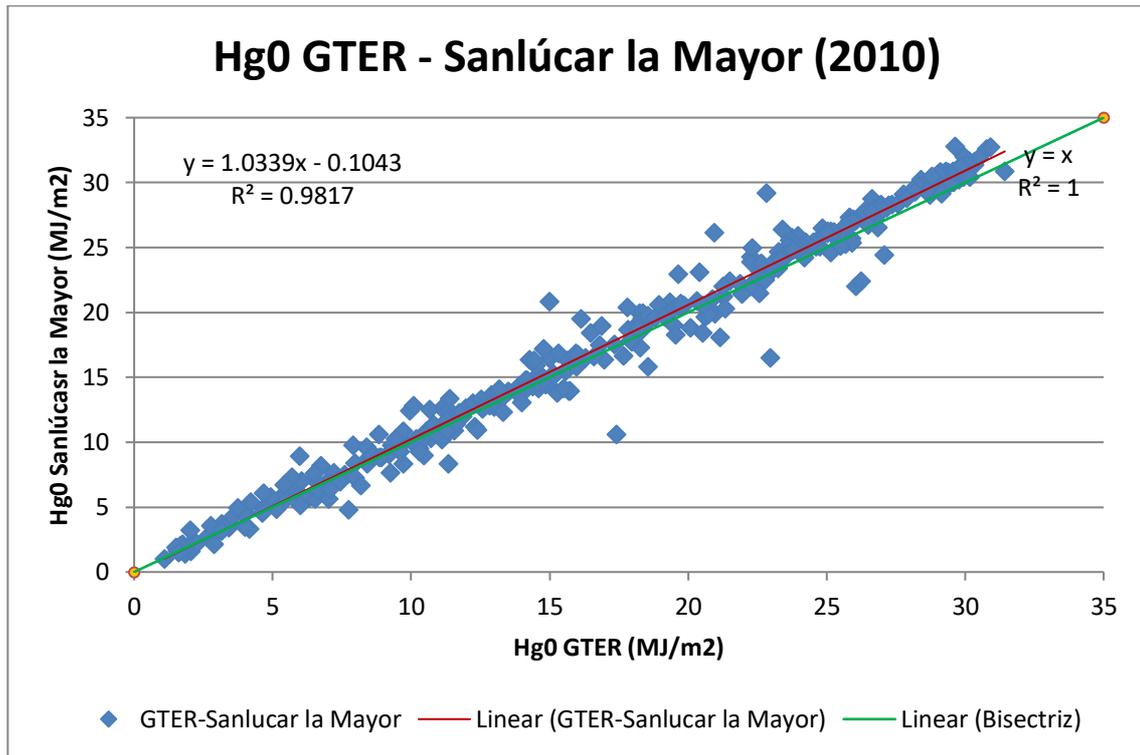


Figura A.I.32. Comparación Hg0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2010

Las gráficas resultantes para el año 2011:

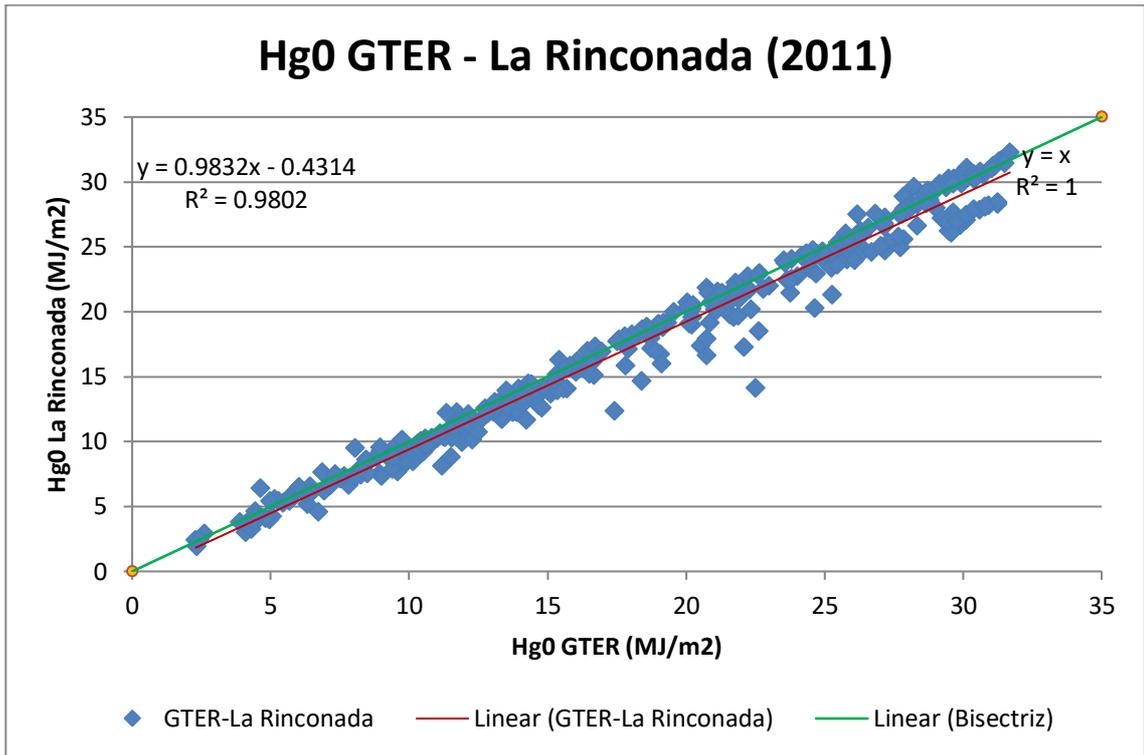


Figura A.I.33. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2011

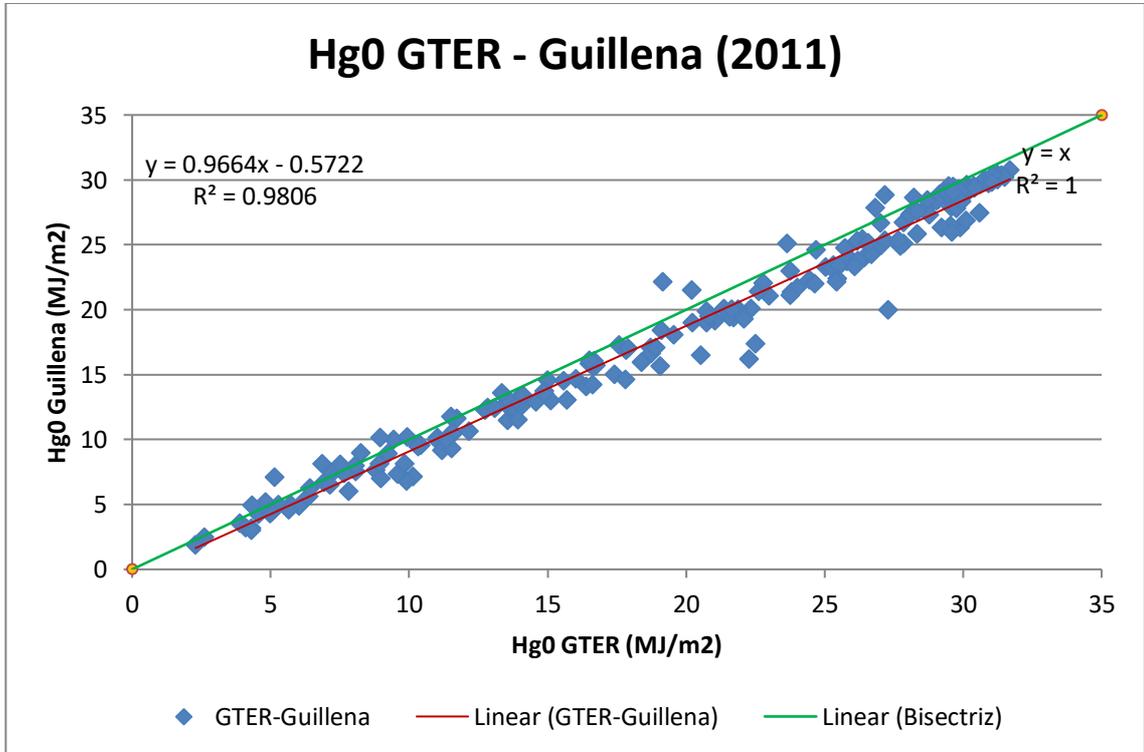


Figura A.I.34. Comparación Hg₀ GTER-Guillena, año 2011

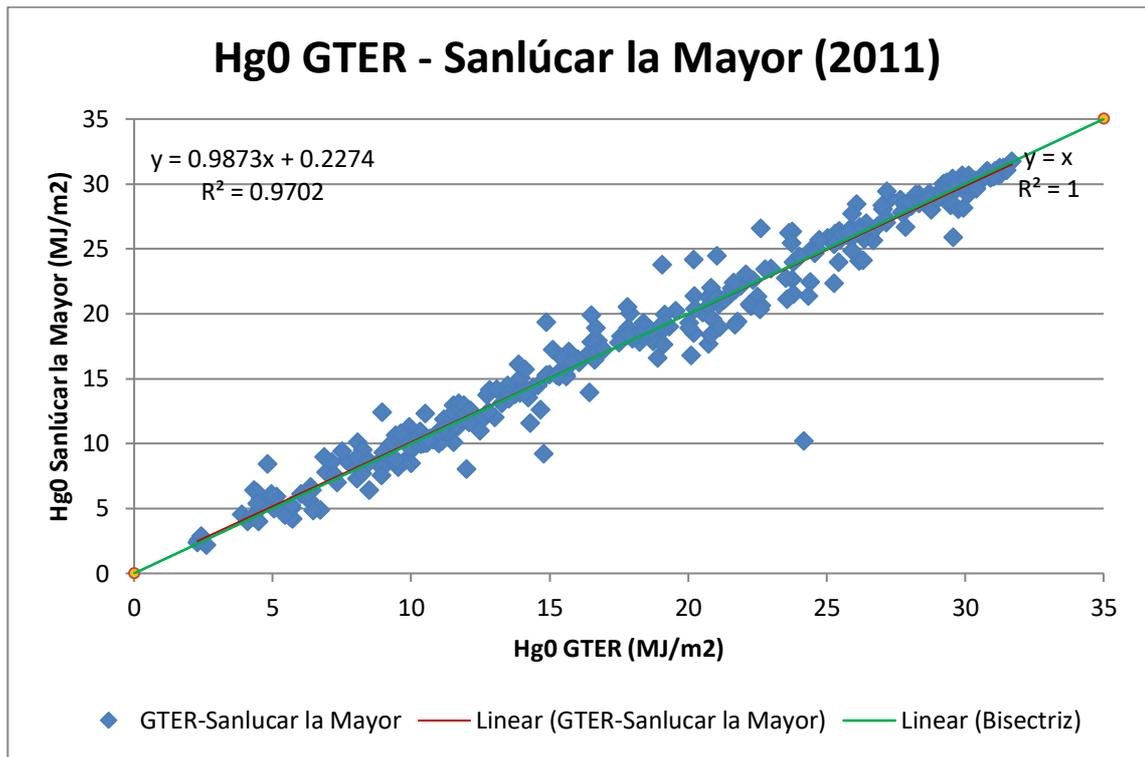


Figura A.I.35. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2011

Las gráficas resultantes para el año 2012:

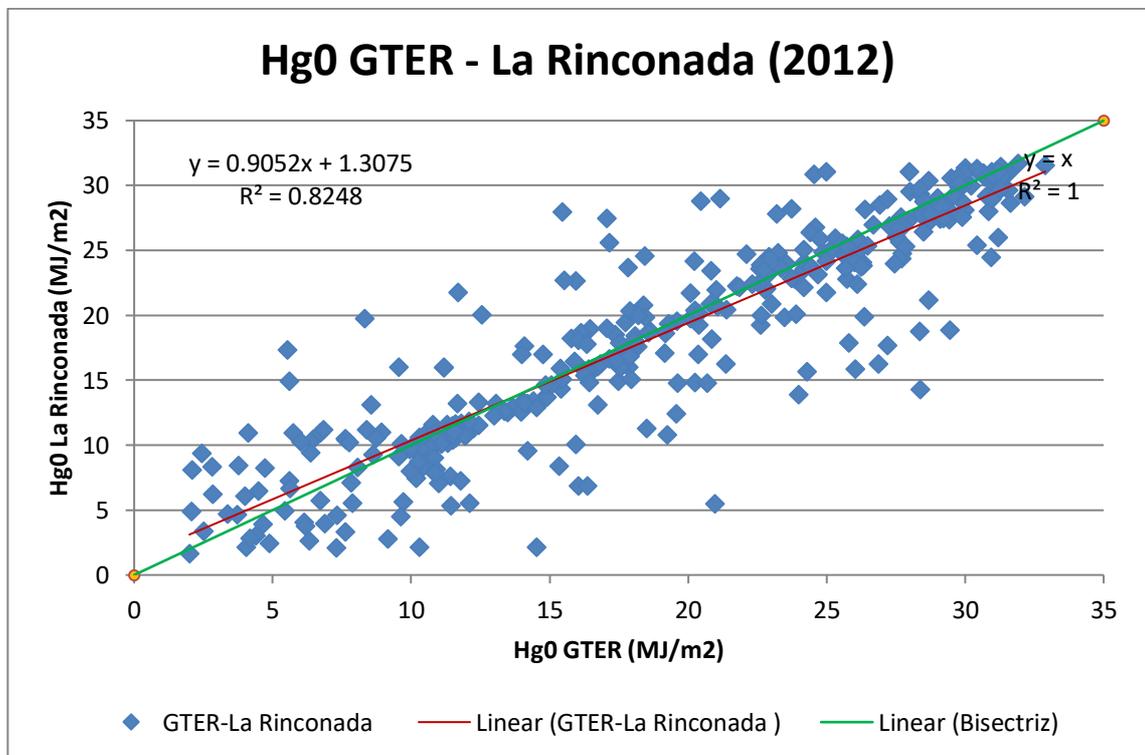


Figura A.I.36. Comparación H_g0 GTER-La Rinconada, año 2012

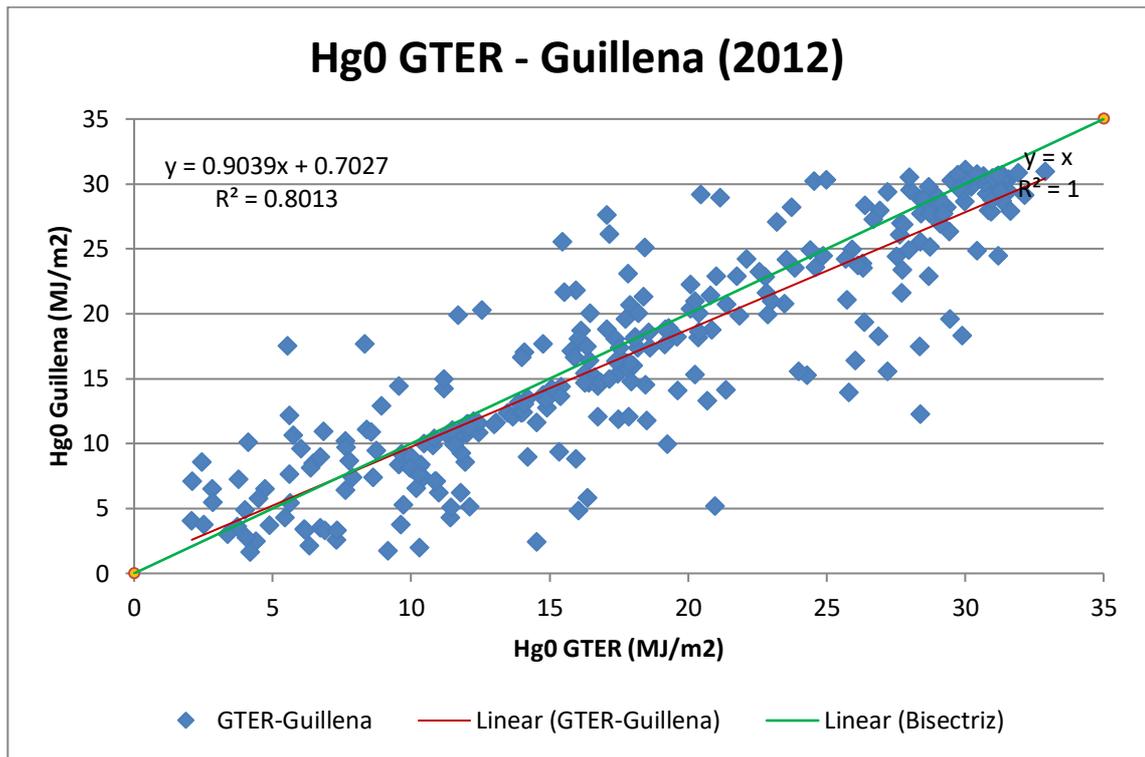


Figura A.I.37. Comparación H_g0 GTER-Guillena, año 2012

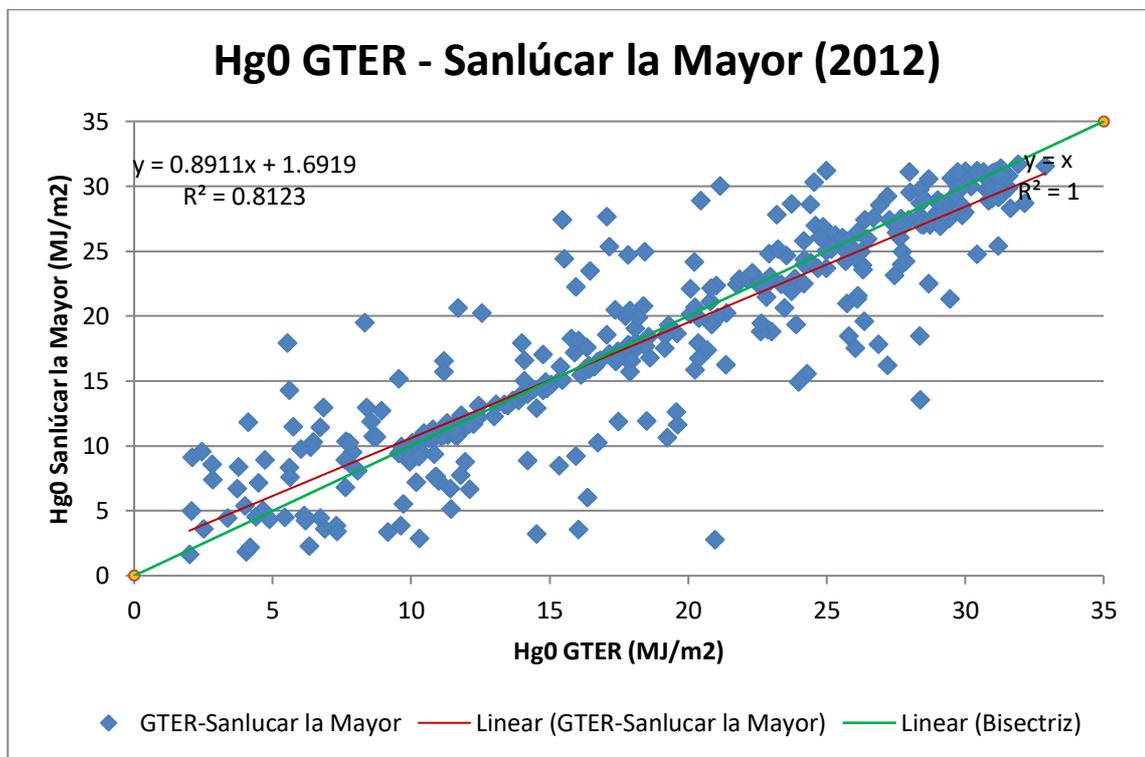


Figura A.I.38. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2012

Las gráficas resultantes para el año 2014:

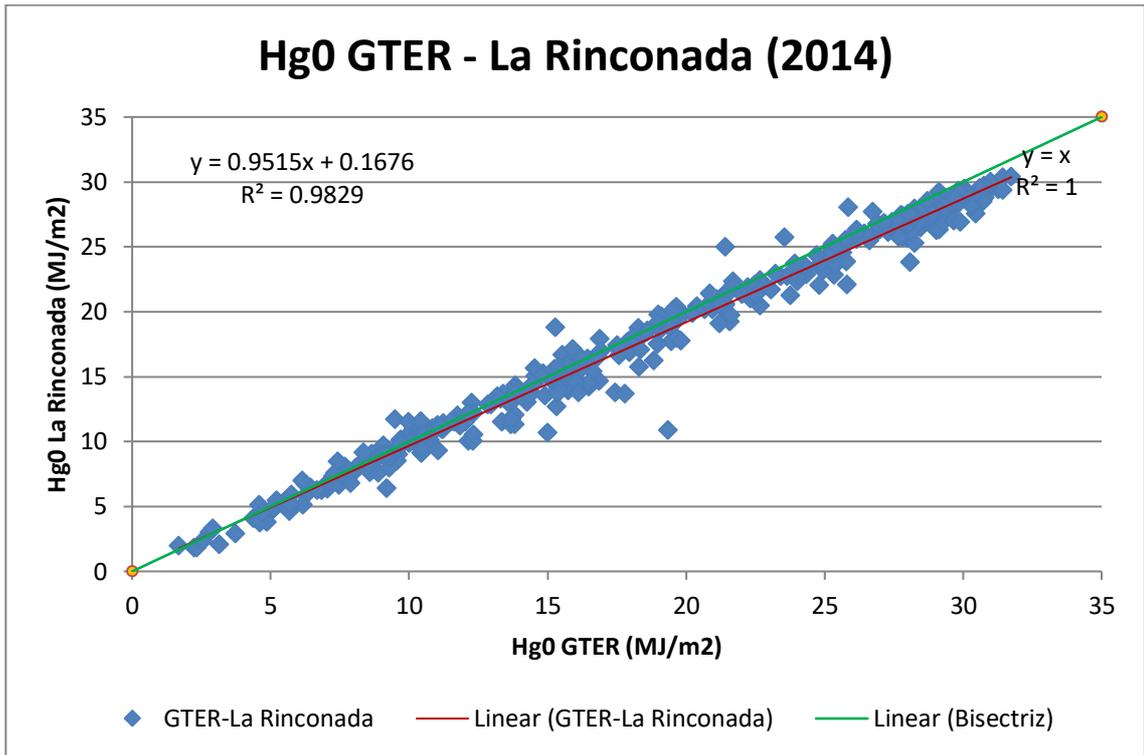


Figura A.I.39. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2014

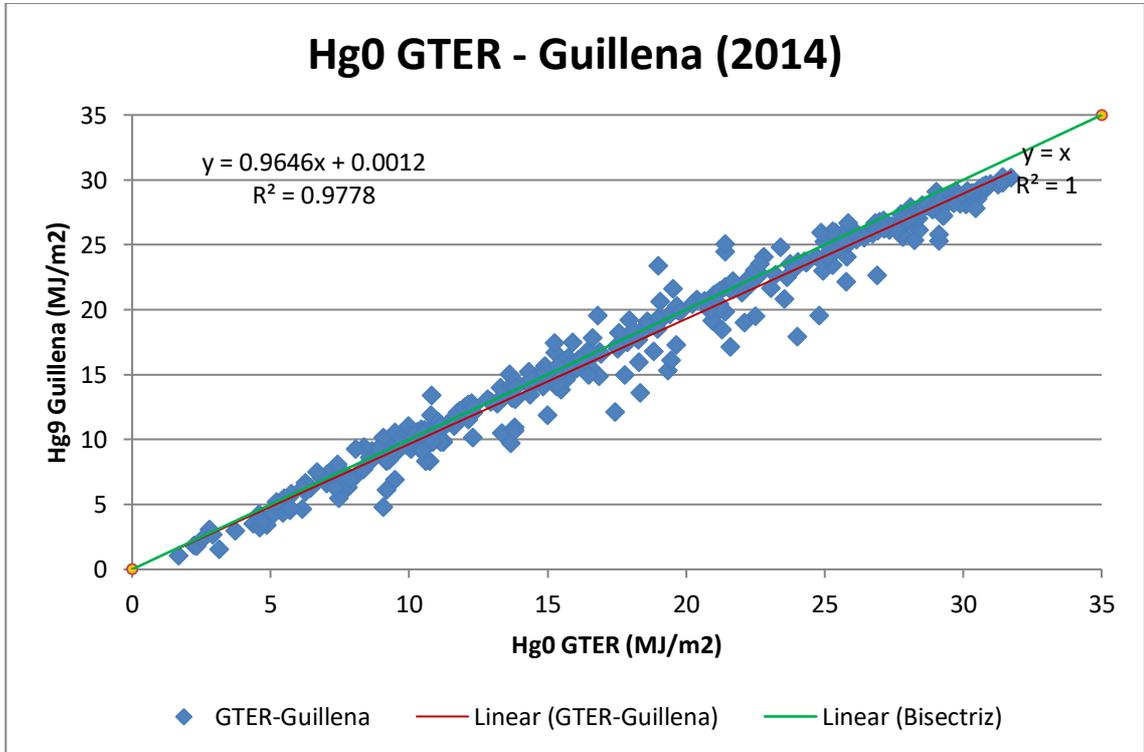


Figura A.I.40. Comparación Hg₀ GTER-Guillena, año 2014

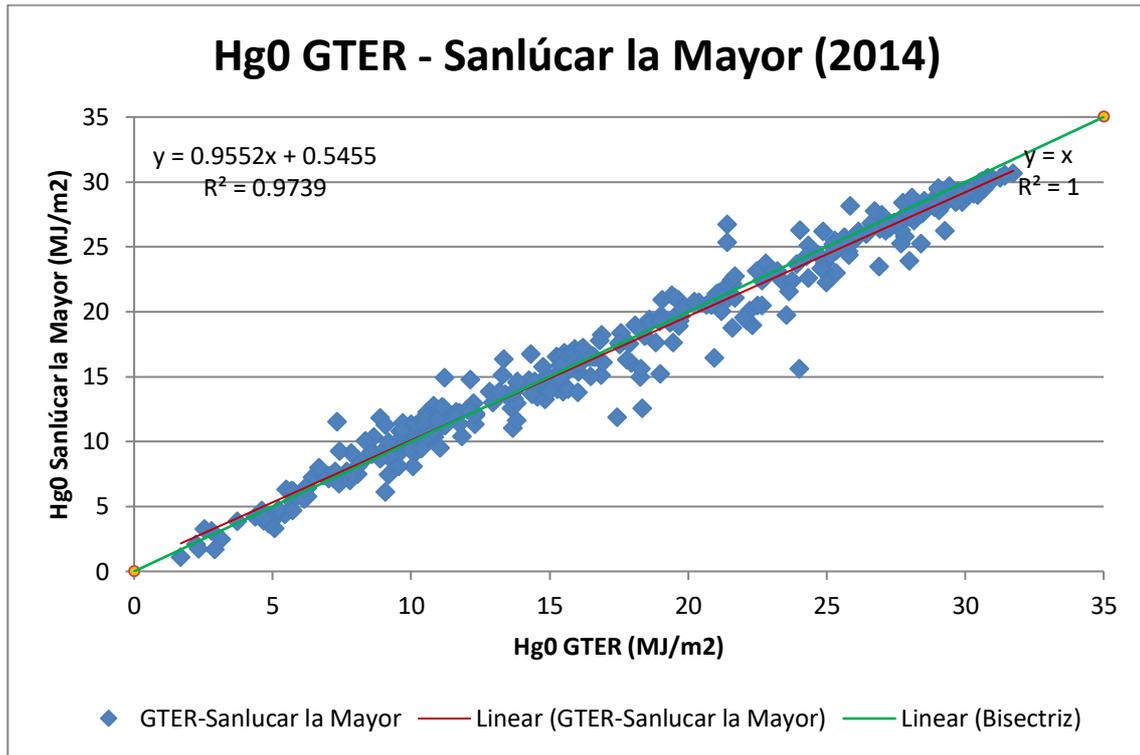


Figura A.I.41. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2014

Las gráficas resultantes para el año 2015:

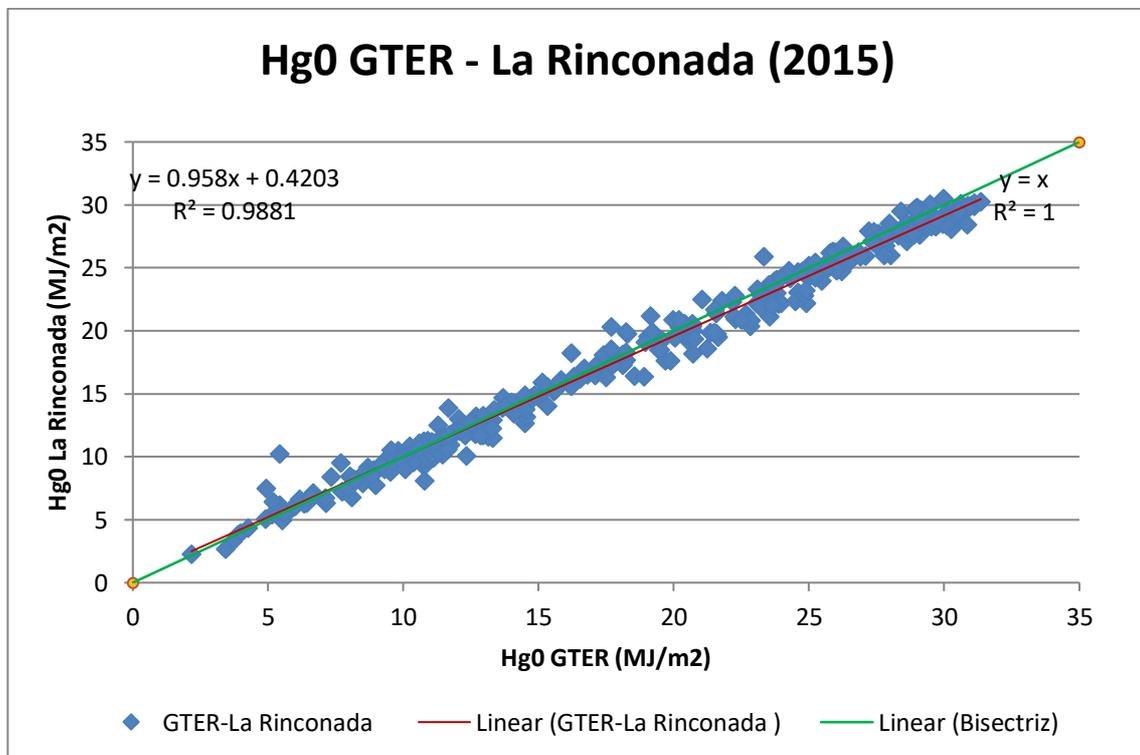


Figura A.I.42. Comparación H_g0 GTER-La Rinconada, año 2015

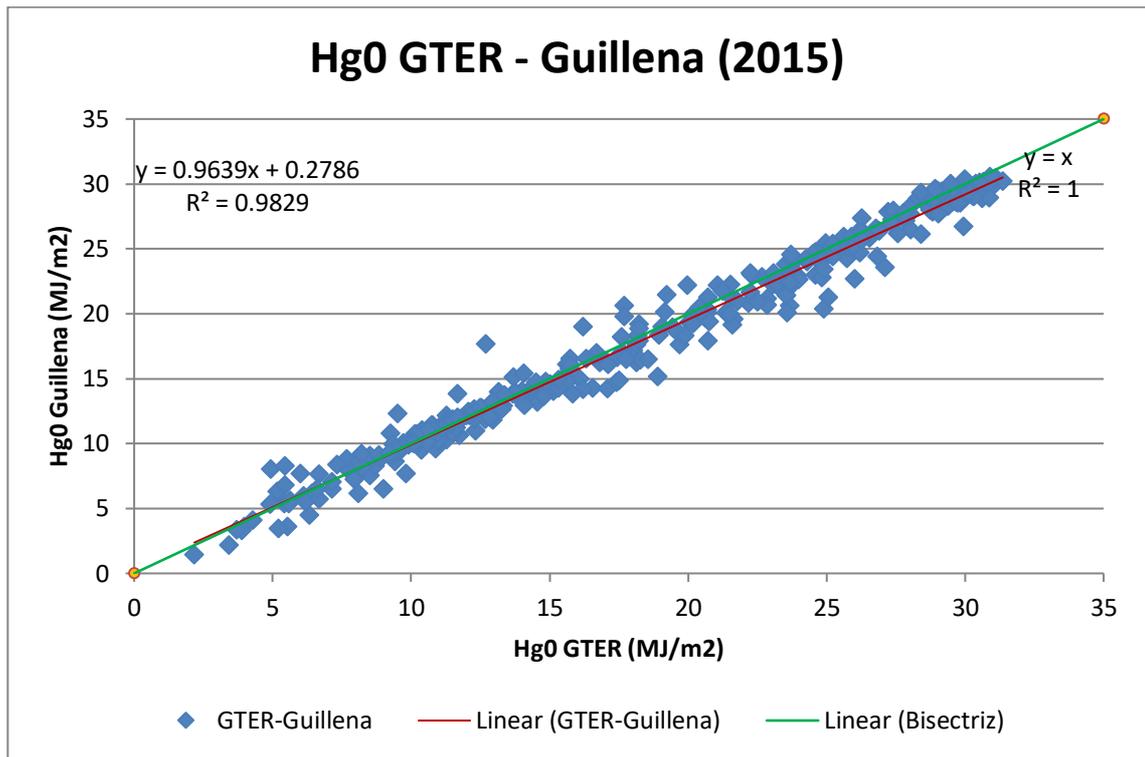


Figura A.I.43. Comparación H_g0 GTER-Guillena, año 2015

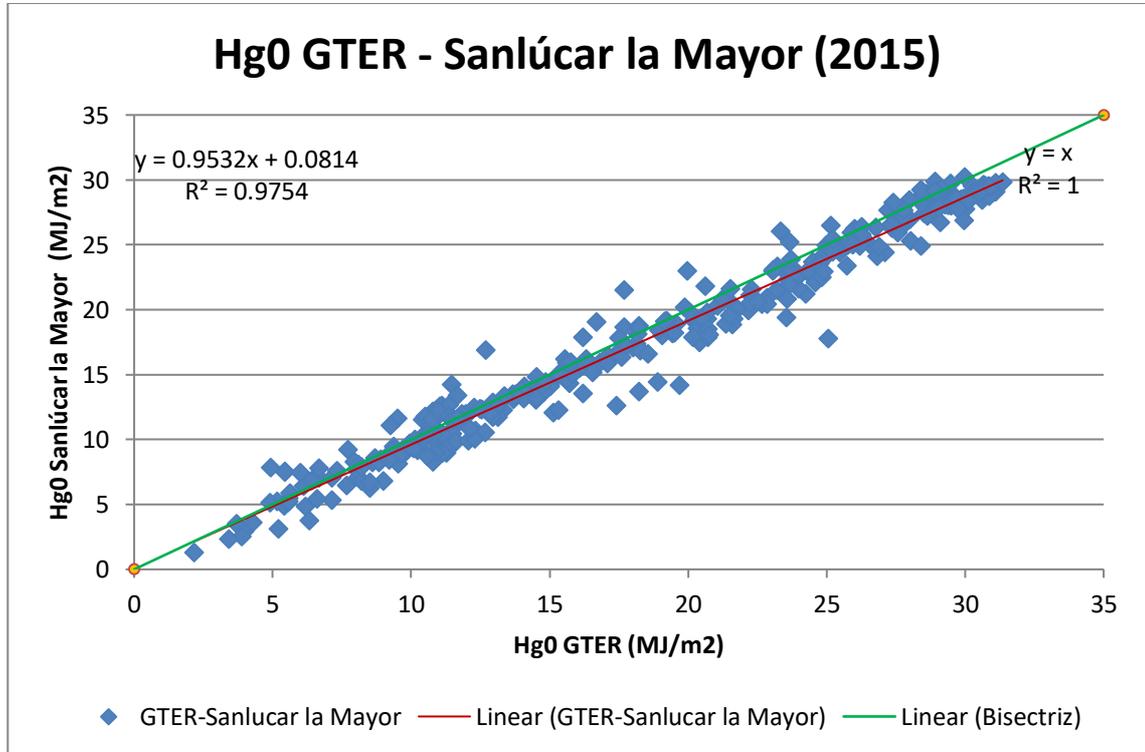


Figura A.I.44. Comparación H_g0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2015

Las gráficas resultantes para el año 2016:

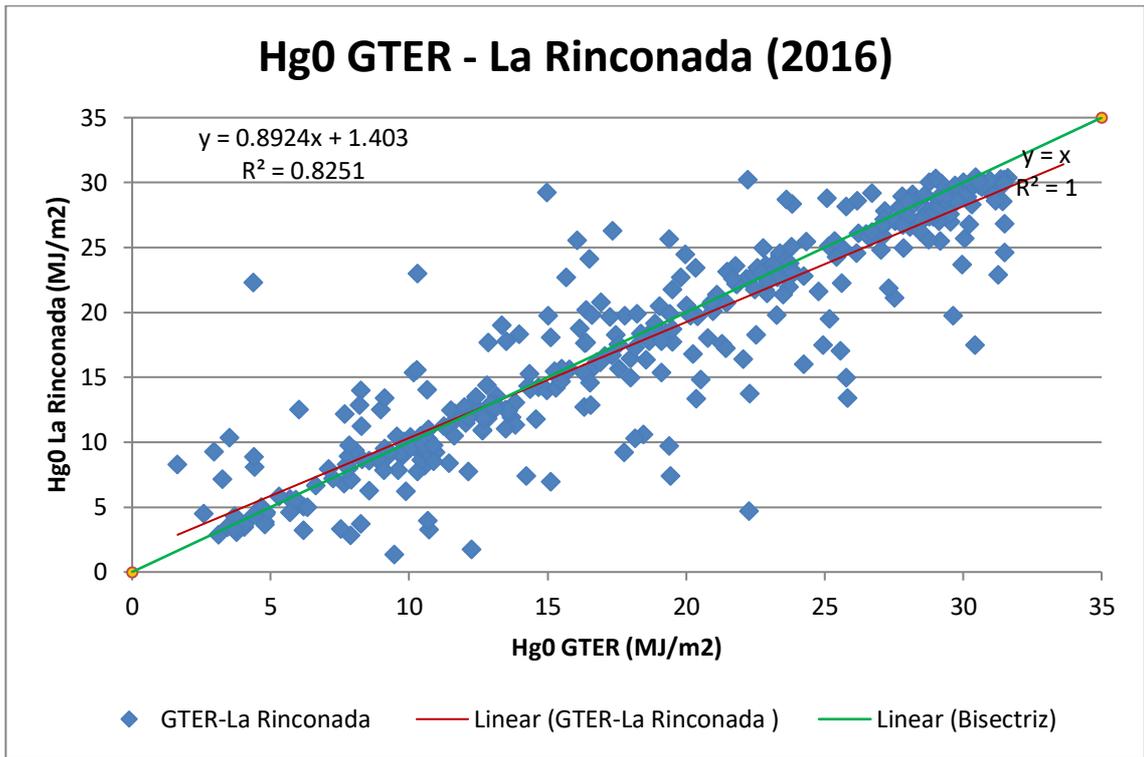


Figura A.I.45. Comparación H_g0 GTER-La Rinconada, año 2016

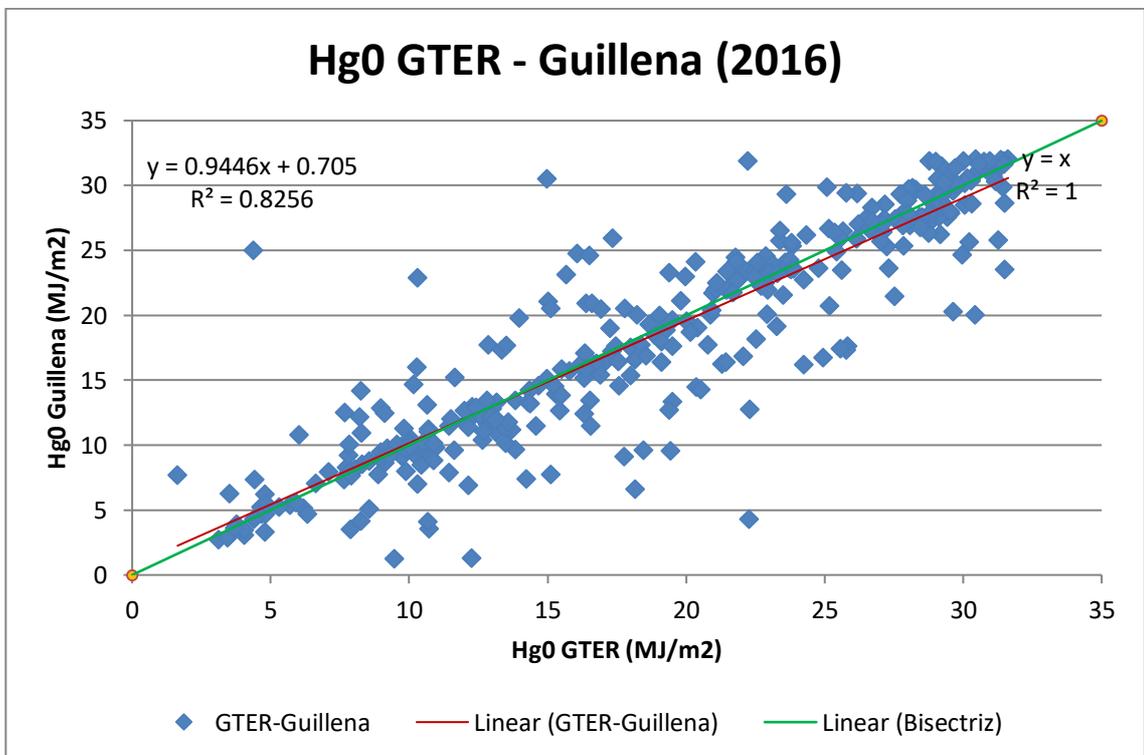


Figura A.I.46. Comparación H_g0 GTER-Guillena, año 2016

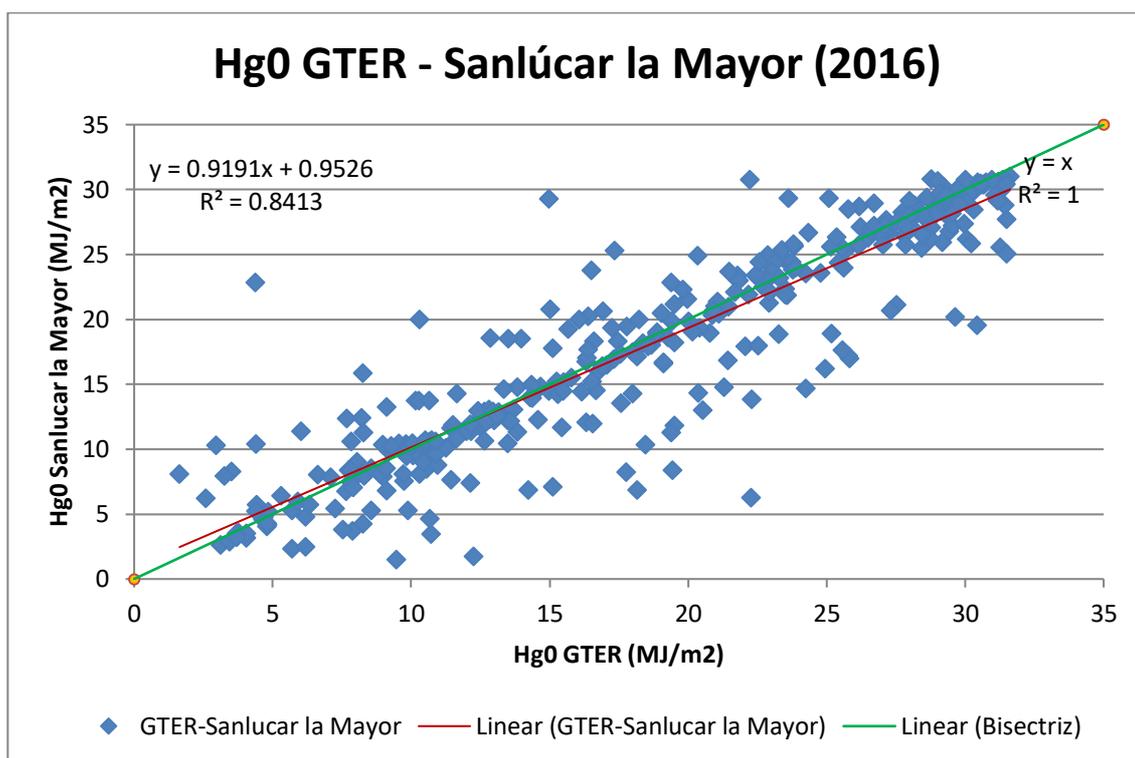


Figura A.I.47. Comparación Hg₀ GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2016

Las gráficas resultantes para el año 2017:

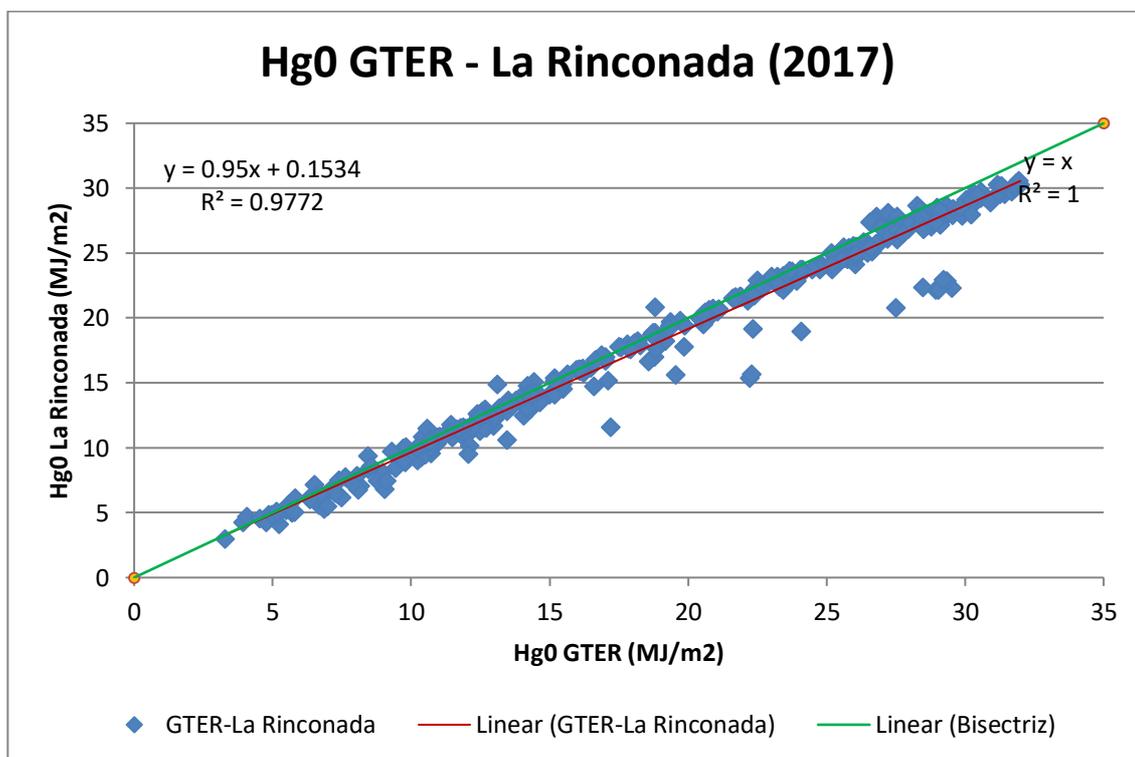


Figura A.I.48. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2017

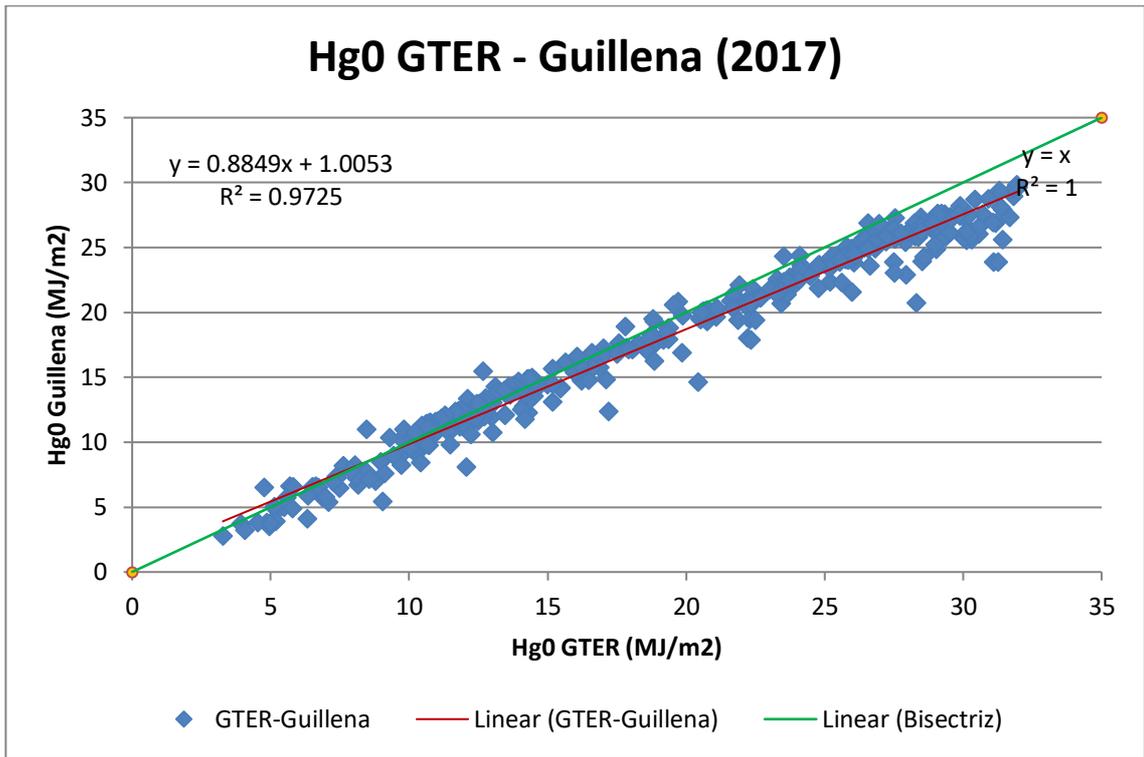


Figura A.I.49. Comparación Hg0 GTER-Guillena, año 2017

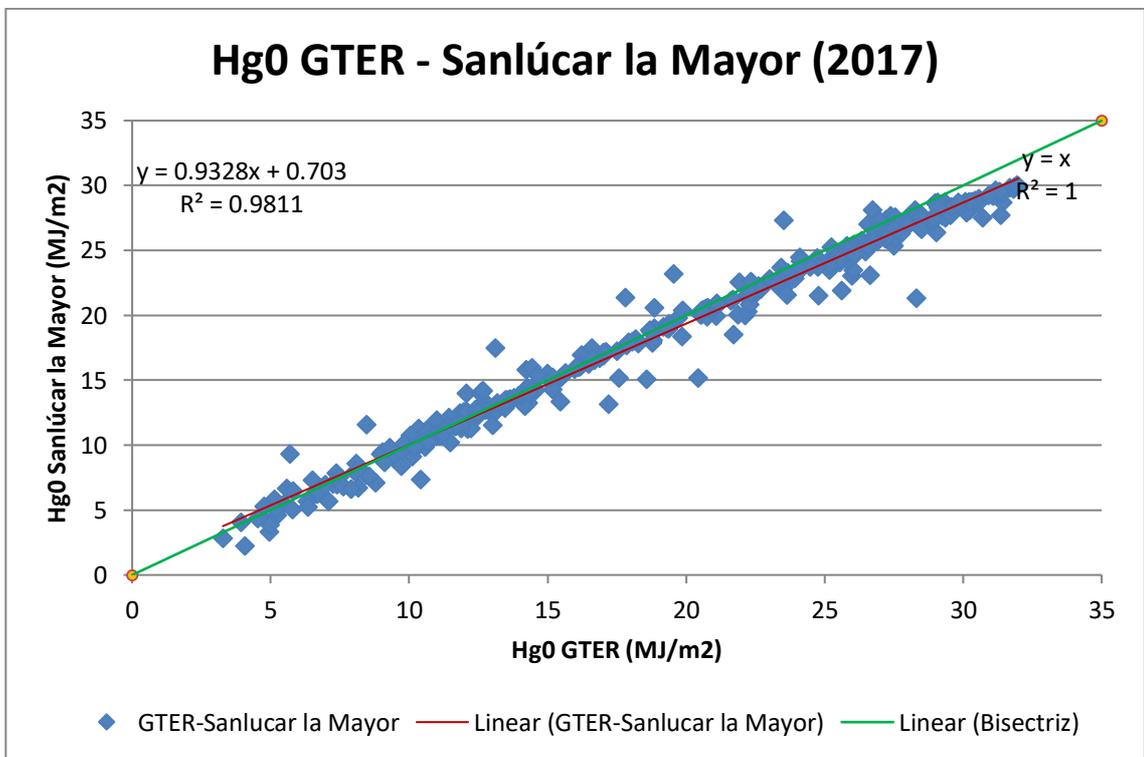


Figura A.I.50. Comparación Hg0 GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2017

Las gráficas resultantes para el año 2018:

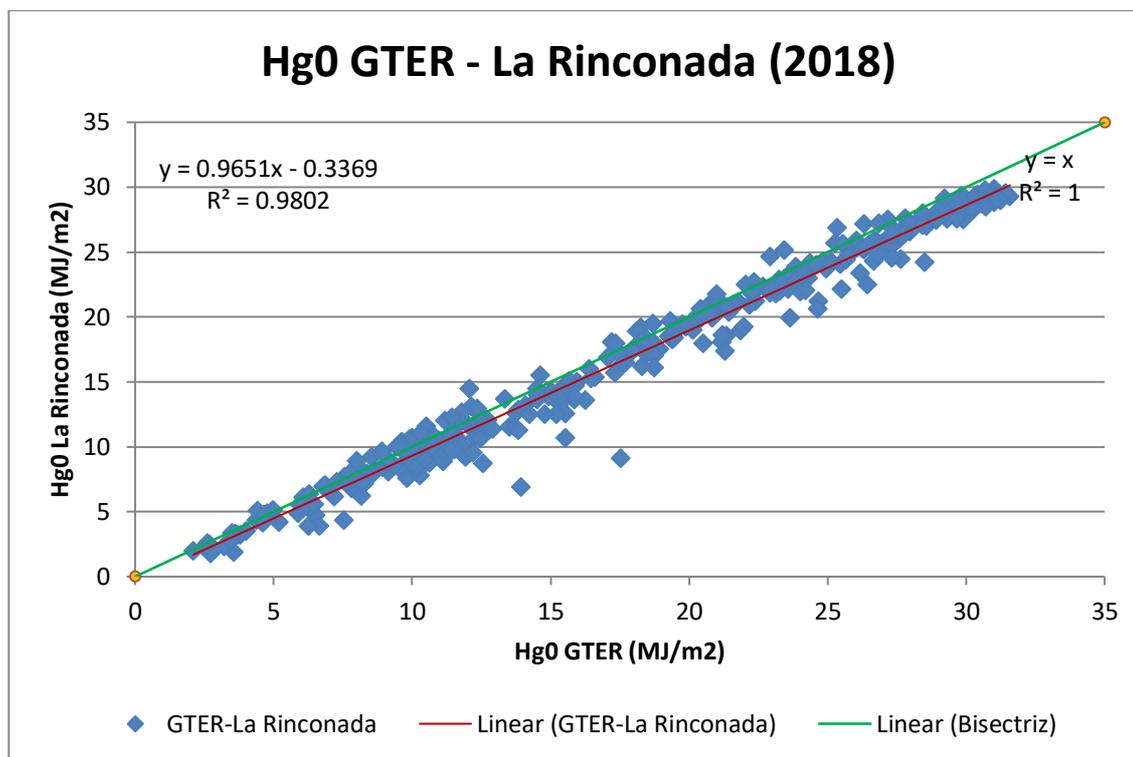


Figura A.I.51. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2018

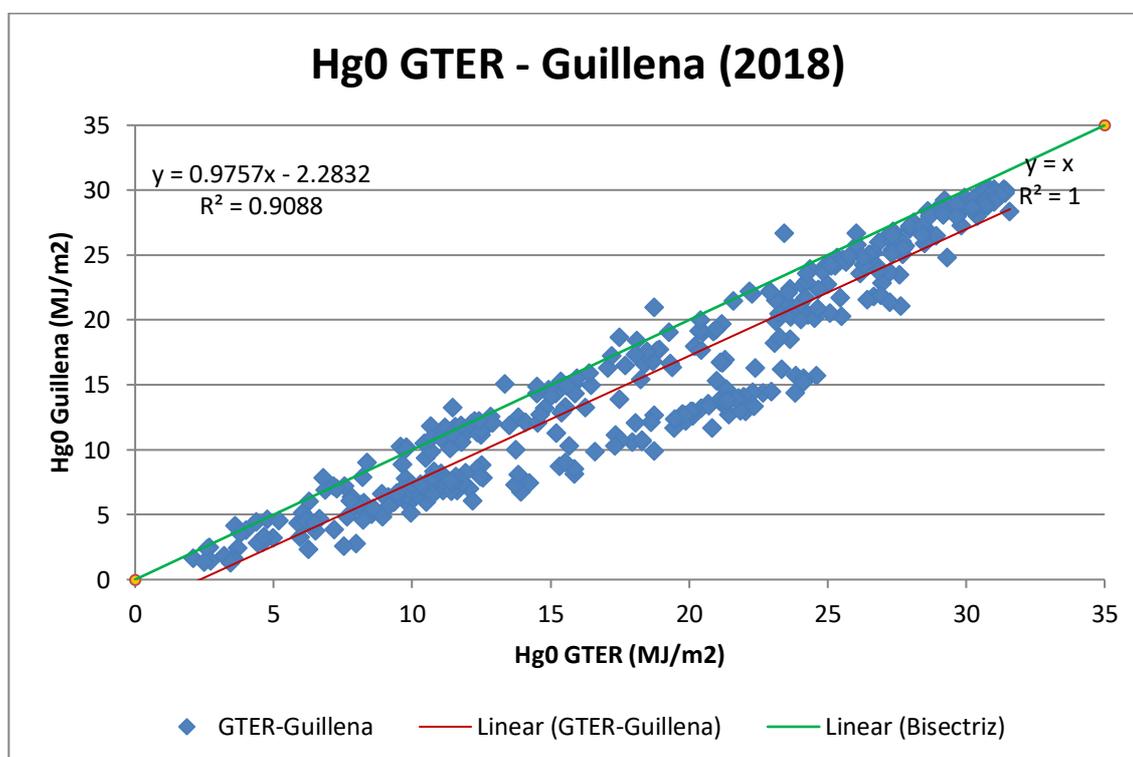


Figura A.I.52. Comparación Hg₀ GTER-Guillena, año 2018

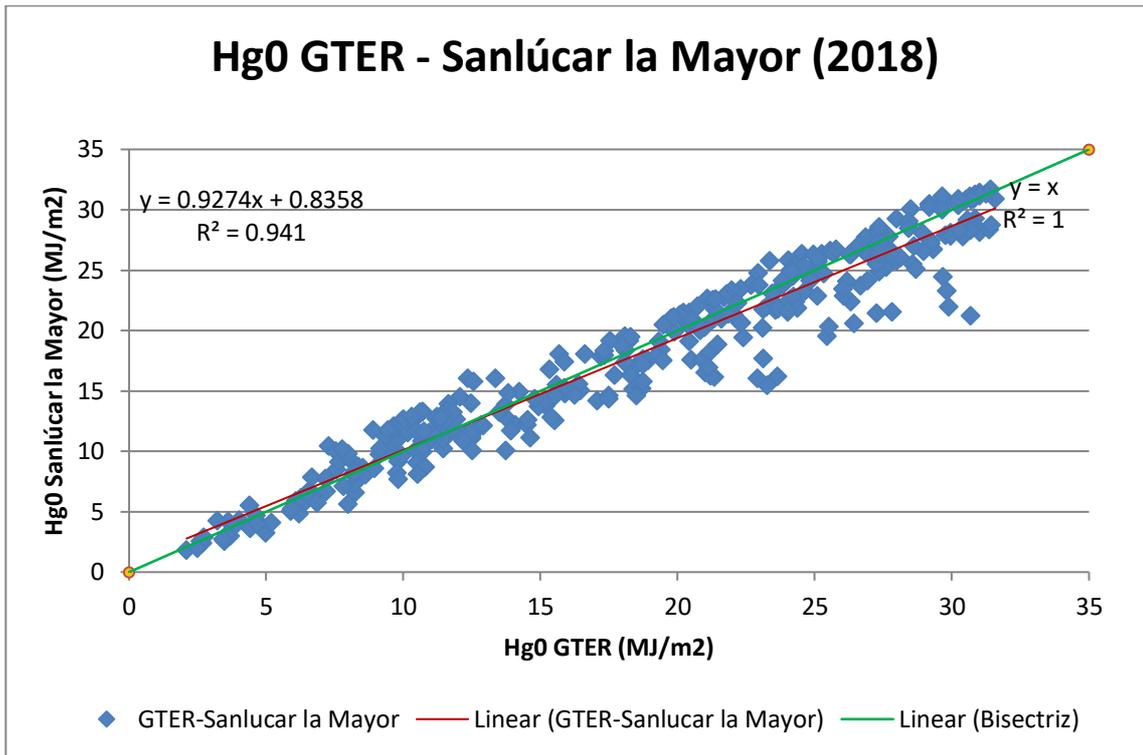


Figura A.I.53. Comparación Hg₀ GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2018

Las gráficas resultantes para el año 2019:

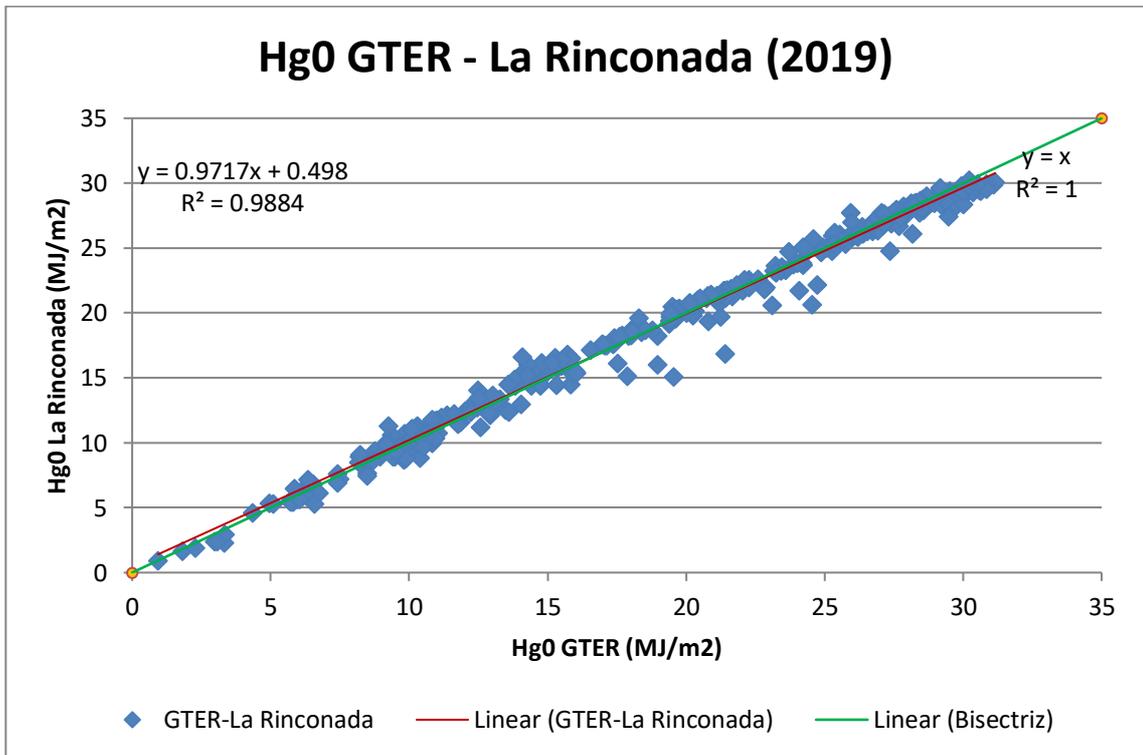


Figura A.I.54. Comparación Hg₀ GTER-La Rinconada, año 2019

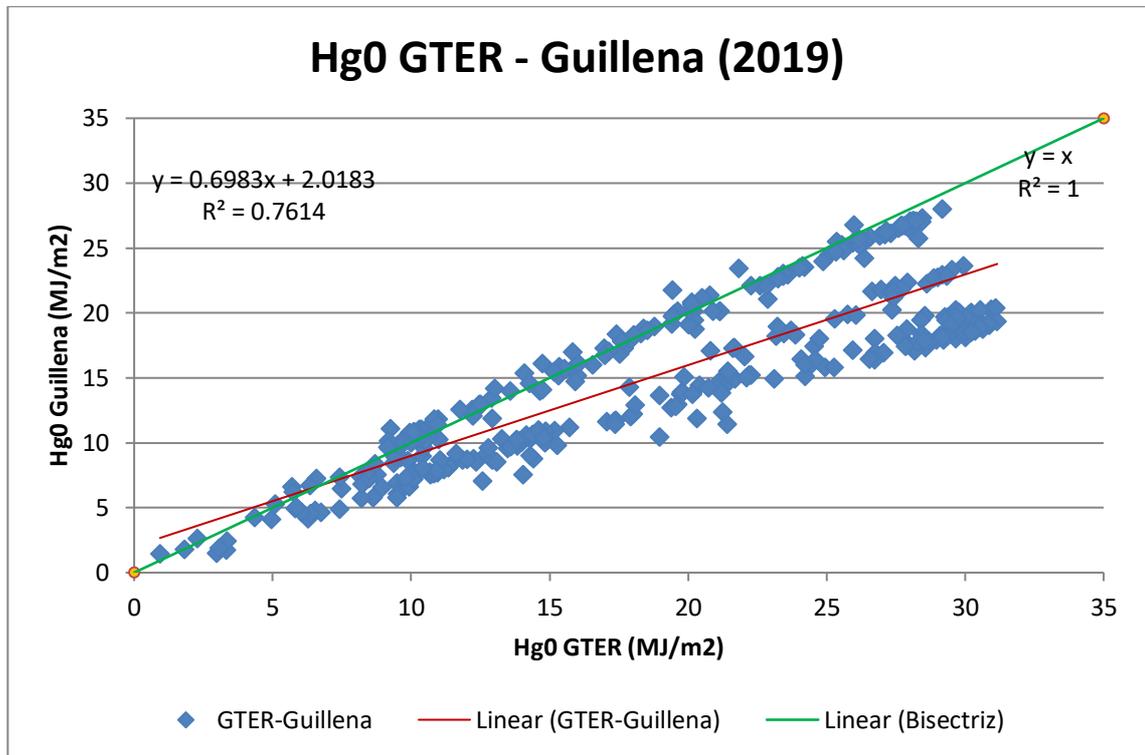


Figura A.I.55. Comparación H₀ GTER-Guillena, año 2019

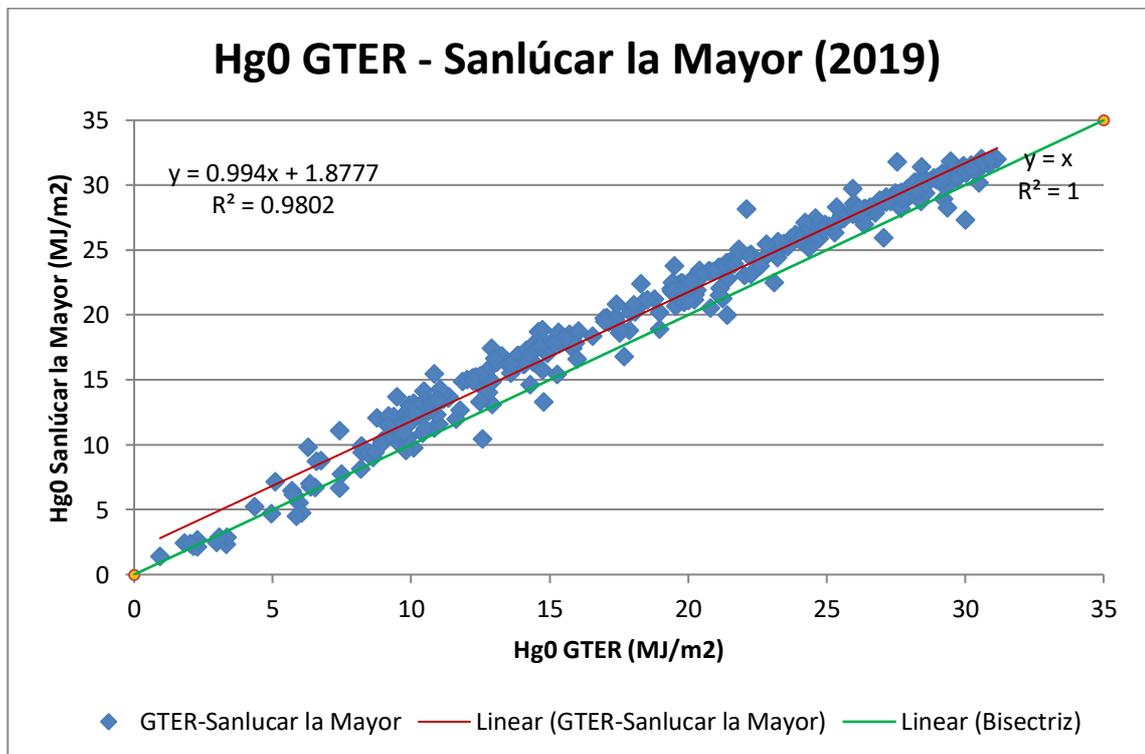


Figura A.I.56. Comparación H₀ GTER-Sanlúcar la Mayor, año 2019

Anexo II. Sustitución de días descartados

En este anexo se muestran todos los días por los que han sido sustituidos los días descartados de la estación del GTER en el periodo 2000-2019. Aparece el valor de radiación de la estación seleccionada de ese día descartado, el valor objetivo, el valor conseguido y la diferencia entre estos últimos valores.

2000 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m ²)	Valor objetivo (MJ/m ²)	Valor conseguido (MJ/m ²)	Diferencia (%)
323	318 (2017)	11,57	18,062	13,438	-25,601
330	331 (2000)	4,66	3,873	3,780	-2,401
344	344 (2001)	6,27	7,179	7,201	0,306
357	353 (2019)	2,21	0	0,935	-
363	353 (2019)	1,73	0	0,935	-

Tabla A.II.1. Días sustituidos de 2000

2001 (Guillena)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Guillena (MJ/m ²)	Valor objetivo (MJ/m ²)	Valor conseguido (MJ/m ²)	Diferencia (%)
99	99 (2005)	26,77	26,652	26,666	0,053
145	148 (2003)	29,27	29,175	29,236	0,209
156	153 (2013)	31,35	31,273	31,674	1,282
161	164 (2015)	23,86	23,715	23,676	-0,164
166	163 (2000)	31,36	31,284	31,293	0,029
212	209 (2012)	23,34	23,191	23,739	2,363
222	220 (2007)	26,37	26,248	26,248	0
237	339 (2018)	9,94	9,669	11,444	18,358
263	265 (2002)	15,35	15,128	15,137	0,059
265	264 (2002)	15,89	15,673	15,797	0,791

271	270 (2013)	8,89	8,609	8,587	-0,256
280	277 (2017)	19,00	18,811	18,733	-0,415
290	290 (2002)	13,77	13,534	13,441	-0,687
305	304 (2001)	13,85	13,615	13,679	0,470
333	334 (2009)	11,63	11,374	11,341	-0,290

Tabla A.II.2. Días sustituidos de 2001 (I)

2001 (Sanlúcar la Mayor)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Sanlúcar (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
2	3 (2011)	8,28	8,739	8,797	0,664
5	9 (2018)	1,52	1,726	2,096	21,437
22	23 (2009)	6,09	6,467	6,476	0,139
37	41 (2016)	5,06	5,398	5,302	-1,778
39	38 (2014)	10,49	11,031	11,033	0,018
40	43 (2015)	12,61	13,230	13,158	-0,544
44	42 (2001)	14,66	15,357	15,358	0,007
49	50 (2014)	15,82	16,560	16,559	-0,006
58	58 (2016)	13,15	13,790	13,847	0,413
81	82 (2019)	20,35	21,259	21,202	-0,268
92	95 (2002)	11,57	12,151	12,020	-1,078

Tabla A.II.3. Días sustituidos de 2001 (II)

2002 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
12	10 (2008)	8,36	8,454	8,454	-0,828
25	28 (2000)	11,88	11,892	11,817	-0,631

34	34 (2009)	5,84	5,993	6,021	0,467
37	38 (2014)	10,91	10,944	11,033	0,813
52	53 (2000)	16,52	16,423	16,409	-0,085
54	55 (2019)	17,22	17,106	17,077	-0,170
97	100 (2013)	8,86	8,942	8,412	-5,927
107	106 (2001)	23,18	22,927	23,118	0,833
108	105 (2014)	24,31	24,030	24,346	1,315
111	110 (2013)	26,57	26,237	26,218	-0,072
138	137 (2012)	30,81	30,378	30,425	0,155
140	137 (2005)	30,38	29,958	29,945	-0,043
175	177 (2008)	31,26	30,817	30,787	-0,097
194	197 (2000)	29,24	28,845	28,860	0,052
319	321 (2013)	11,65	11,667	11,678	0,094
322	320 (2017)	8,07	8,171	8,168	-0,037
346	348 (2012)	7,15	7,272	7,332	0,825

Tabla A.II.4. Días sustituidos de 2002

2003 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
7	6 (2011)	4,16	4,259	4,313	1,268
20	18 (2001)	4,41	4,509	4,522	0,288
25	25 (2015)	13,04	13,139	13,134	-0,038
86	87 (2014)	2,76	2,859	2,550	-10,808
187	185 (2007)	29,69	29,789	29,768	-0,070
191	193 (2000)	29,76	29,859	29,837	-0,074
195	192 (2011)	29,42	29,519	29,486	-0,112
204	204 (2012)	29,33	29,429	29,440	0,037

206	205 (2012)	28,41	28,509	28,509	0
213	212 (2011)	25,82	25,919	25,927	0,0031
221	218 (2008)	26,69	26,789	26,850	0,228
233	235 (2012)	25,47	25,569	25,573	0,016
253	251 (2010)	23,89	23,989	23,989	0,021
266	263 (2011)	21,08	21,179	21,139	-0,175
272	274 (2014)	15,93	16,029	16,238	1,304
274	271 (2002)	14,26	14,359	14,367	0,056
313	316 (2007)	8,63	8,729	8,640	-1,020
318	317 (2016)	11,34	11,439	11,445	0,052
325	323 (2018)	7,45	7,549	7,535	-0,185
341	344 (2001)	6,92	7,019	7,201	2,593
357	354 (2013)	10,83	10,929	10,801	-1,171

Tabla A.II.5. Días sustituidos de 2003

2004 (Guillena)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Guillena (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
7	12 (2010)	4,24	1,829	1,835	0,328
11	14 (2004)	10,9	9,180	9,333	1,667
21	23 (2013)	12,84	11,321	11,325	0,035
27	24 (2001)	4,59	2,215	2,240	1,129
87	87 (2014)	5,15	2,833	2,550	-9,989
91	94 (2001)	19,48	18,650	18,605	-0,241
93	95 (2010)	21,08	20,416	20,410	-0,029
109	111 (2011)	11,44	9,776	9,918	1,453
112	109 (2009)	23,69	23,297	23,263	-0,146
129	131 (2015)	29,2	29,379	29,358	-0,071
131	130 (2009)	22,96	22,491	22,462	-0,129

143	143 (2014)	23,88	23,507	23,544	0,157
144	142 (2013)	27,58	27,591	27,570	-0,076
151	149 (2001)	30,98	31,343	31,433	0,287
171	174 (2011)	31,69	32,127	31,689	-1,363
178	181 (2014)	31,17	31,553	31,434	-0,377
211	210 (2001)	26,13	25,990	25,968	-0,085
257	258 (2013)	22,20	21,652	21,642	-0,046
263	261 (2017)	22,72	22,226	22,312	0,387
289	292 (2003)	12,59	11,045	10,845	-1,811
299	353 (2019)	2,70	0,140	0,935	-
303	304 (2019)	10,89	9,169	9,267	1,069

Tabla A.II.6. Días sustituidos de 2004

2005 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
89	88 (2016)	21,82	21,853	21,790	-0,288
91	86 (2017)	13,29	13,184	13,018	-1,259
106	106 (2018)	26,54	26,649	26,666	0,064
168	166 (2003)	28,36	28,499	28,518	0,067
172	171 (2012)	24,38	24,454	24,542	0,360
176	175 (2007)	29,64	29,800	29,817	0,057
182	180 (2003)	30,58	30,755	30,758	0,010
184	185 (2019)	27,28	27,401	27,059	-1,248
198	199 (2014)	18,78	18,763	19,415	3,475
230	228 (2012)	24,70	24,779	24,770	-0,036
263	260 (2016)	22,85	22,899	22,721	-0,777
271	268 (2010)	20,47	20,481	20,531	0,244
272	273 (2016)	20,08	20,084	20,016	-0,339

279	278 (2000)	19,23	19,221	19,228	0,036
------------	------------	-------	--------	--------	-------

Tabla A.II.7. Días sustituidos de 2005

2006 (Sanlúcar la Mayor)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Sanlúcar (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
74	76 (2004)	17,90	17,561	17,556	-0,028
78	81 (2016)	10,43	10,061	10,160	0,984
80	82 (2015)	9,95	9,579	9,519	-0,626

Tabla A.II.8. Días sustituidos de 2006 (I)

2006 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
342	340 (2017)	10,17	9,982	9,982	0
350	348 (2018)	10,27	10,080	10,091	0,109
364	361 (2006)	9,97	9,786	9,688	-1,001

Tabla A.II.9. Días sustituidos de 2006 (II)

2007 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
32	32 (2017)	9,17	8,793	8,988	2,218
37	34 (2001)	10,83	10,408	10,151	-2,469
44	44 (2011)	6,69	6,380	6,426	0,721
49	49 (2018)	16,42	15,845	15,888	0,271
51	54 (2004)	3,80	3,569	3,603	0,953
60	58 (2003)	17,33	16,731	16,850	0,711
63	63 (2019)	11,70	11,254	11,053	-1,786
79	79 (2019)	23,08	22,324	22,277	-0,211

102	99 (2015)	10,76	10,339	10,799	4,440
114	111 (2019)	22,02	21,293	21,247	-0,216
117	114 (2014)	23,46	22,694	22,661	-0,0145
122	119 (2011)	9,29	8,910	8,924	0,157
160	159 (2009)	17,96	17,343	17,228	-0,663
176	176 (2013)	31,32	30,339	30,379	0,132
177	179 (2014)	32,17	31,166	31,262	0,308
222	220 (2010)	11,89	11,439	14,512	26,864
254	257 (2019)	17,46	16,857	15,837	-1,370
281	279 (2000)	17,08	16,487	16,604	0,710
298	298 (2014)	15,94	15,378	15,371	-0,046
307	305 (2013)	15,19	14,649	14,614	-0,239
345	346 (2017)	11,51	11,069	11,014	-0,497
348	349 (2011)	10,46	10,048	10,059	0,109
353	350 (2012)	3,61	3,384	3,378	-0,177

Tabla A.II.10. Días sustituidos de 2007

2008 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
19	17 (2004)	12,44	11,258	11,259	0,009
24	21 (2018)	12,12	10,920	10,950	0,275
65	68 (2007)	20,65	19,946	19,959	0,065
71	68 (2016)	19,97	19,226	19,121	-0,546
149	148 (2014)	22,86	22,285	22,110	-0,785
158	158 (2019)	30,66	30,539	30,600	0,200
175	172 (2013)	27,39	27,078	27,031	-0,174
186	188 (2011)	31,89	31,840	31,496	-1,080

192	191 (2011)	31,19	31,099	31,073	-0,084
203	202 (2014)	30,33	30,189	30,149	-0,132
205	208 (2000)	28,55	28,306	28,285	-0,074
221	219 (2012)	29,94	29,777	29,213	-1,894
230	230 (2013)	28,42	28,168	28,111	-0,202
239	236 (2010)	26,26	25,883	25,978	0,367
258	258 (2012)	23,90	23,385	23,354	-0,133
344	353 (2019)	1,57	0	0,935	-

Tabla A.II.11. Días sustituidos de 2008

2009 (Sanlúcar la Mayor)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Sanlúcar (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
2	3 (2010)	2,43	2,270	2,249	-0,925
63	64 (2011)	8,21	7,970	8,056	1,079
75	72 (2015)	20,00	19,598	19,577	-0,107
78	75 (2019)	21,59	21,166	21,378	1,002
97	95 (2008)	24,86	24,390	24,384	-0,025
107	106 (2000)	12,04	11,748	11,659	-0,758
124	127 (2007)	28,89	28,365	28,447	0,289
140	141 (2005)	28,13	27,615	27,660	0,163
144	146 (2008)	23,31	22,862	22,779	-0,363
145	144 (2014)	27,22	26,718	26,732	0,052
148	151 (2015)	29,10	28,572	28,626	0,189
161	158 (2007)	29,36	28,828	28,782	-0,160
176	176 (2004)	29,43	28,897	28,908	0,038
179	179 (2017)	26,16	25,673	25,628	-0,175
183	185 (2007)	30,38	29,834	29,768	-0,221

321	322 (2012)	7,93	7,694	7,632	-0,806
325	324 (2018)	7,48	7,250	7,190	-0,828
346	348 (2016)	9,66	9,400	9,461	0,649

Tabla A.II.12. Días sustituidos de 2009

2010 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
13	18 (2015)	1,96	2,197	2,173	-1,092
37	38 (2013)	14,70	15,144	15,132	-0,079
43	40 (2014)	1,86	2,096	2,330	11,164
52	50 (2016)	9,01	9,362	9,100	-2,799
72	73 (2016)	20,70	21,242	21,290	0,226
76	77 (2015)	9,52	9,880	10,241	3,654
118	115 (2004)	28,23	28,894	28,840	-0,187
126	128 (2015)	24,75	25,358	24,907	-1,276
129	127 (2009)	25,57	26,191	26,029	-0,619
132	133 (2010)	22,83	23,407	23,405	-0,009
153	156 (2014)	23,83	24,423	24,938	2,109
159	157 (2005)	28,05	28,711	28,774	0,219
170	171 (2011)	28,8	29,474	29,477	0,010
177	178 (2007)	28,36	29,026	29,049	0,079
205	207 (2000)	24,85	25,459	25,448	-0,043
210	213 (2002)	24,74	25,348	25,385	0,146
225	222 (2012)	24,60	25,205	25,205	0
244	246 (2017)	21,92	22,482	22,396	-0,383
257	258 (2001)	20,64	21,181	21,126	-0,260
285	287 (2019)	14,28	14,717	14,752	0,238

288	287 (2019)	14,42	14,860	14,752	-0,727
303	298 (2012)	1,86	2,096	2,081	-0,716
304	304 (2002)	11,46	11,852	11,741	-0,937
316	315 (2010)	12,46	12,868	12,840	-0,218
319	316 (2003)	11,62	12,014	11,919	-0,791
323	323 (2019)	9,53	9,890	9,878	-0,121
351	349 (2000)	6,04	6,343	6,368	0,394

Tabla A.II.13. Días sustituidos de 2010 (I)

2010 (Sanlúcar la Mayor)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Sanlúcar (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
100	100 (2009)	23,38	22,734	22,707	-0,119

Tabla A.II.14. Días sustituidos de 2010 (II)

2011 (Sanlúcar la Mayor)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Sanlúcar (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
19	19 (2015)	10,91	10,824	10,777	-0,434
51	53 (2014)	17,21	17,207	17,053	1,877
62	61 (2011)	16,41	16,396	16,402	0,037
95	93 (2012)	8,95	8,838	8,408	-4,865
106	106 (2019)	25,93	26,042	26,054	0,046
127	128 (2004)	21,27	21,320	21,336	0,051
151	148 (2010)	25,86	25,971	26,065	0,362
153	154 (2015)	30,45	30,621	30,609	-0,039
163	166 (2005)	30,25	30,418	30,411	-0,023
178	175 (2011)	29,91	30,074	30,133	0,196

186	189 (2003)	29,99	30,155	30,153	-0,007
203	201 (2013)	27,99	28,129	28,129	0
224	225 (2001)	24,10	24,187	24,247	0,248
244	245 (2015)	5,59	5,434	9,363	72,304
256	259 (2011)	20,59	20,631	20,739	0,523
262	264 (2010)	18,87	18,889	18,819	-0,371
268	269 (2017)	21,03	21,077	21,100	0,109
273	272 (2017)	18,82	18,838	18,805	-0,175
280	280 (2012)	17,07	17,065	17,075	0,059
288	288 (2004)	17,23	17,227	17,222	-0,029
296	293 (2001)	12,58	12,516	12,435	-0,647
297	295 (2019)	12,96	12,901	12,904	0,023
308	305 (2015)	7,29	7,156	7,335	2,501
343	342 (2015)	6,15	6,001	5,998	-0,050
347	346 (2010)	4,81	4,643	4,642	-0,022

Tabla A.II.15. Días sustituidos de 2011

2012 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
92	91 (2012)	10,60	10,269	10,314	0,438
128	131 (2007)	27,39	28,821	28,711	-0,382
132	135 (2015)	28,33	29,860	29,858	-0,007
151	151 (2014)	27,58	29,031	29,123	0,316
163	162 (2000)	30,71	32,490	31,532	-2,949
164	168 (2001)	31,74	33,628	31,601	-6,028
233	134 (2010)	24,19	25,285	25,266	-0,075
242	240 (2014)	24,19	25,285	25,252	-0,131
247	248 (2012)	23,66	24,699	24,692	-0,028

269	272 (2000)	10,83	10,523	10,607	-0,798
295	295 (2005)	6,88	6,158	6,052	-1,721
301	302 (2001)	10,98	10,688	10,851	1,525
305	307 (2000)	8,35	7,778	7,797	0,244
321	323 (2015)	11,64	11,418	11,463	0,394
351	350 (2001)	4,72	3,771	3,832	1,618

Tabla A.II.16. Días sustituidos de 2012

2013 (Sanlúcar la Mayor)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Sanlúcar (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
9	11 (2002)	9,80	9,791	9,723	-0,695
16	14 (2016)	4,83	4,801	4,810	0,187
58	57 (2009)	14,37	14,380	14,392	0,083
69	70 (2002)	15,59	15,604	15,698	0,602
108	110 (2002)	26,35	26,408	26,489	0,307
178	175 (2015)	30,18	30,253	30,260	0,023
181	180 (2015)	30,36	30,434	30,414	-0,066
191	193 (2013)	29,34	29,410	29,431	0,071
266	264 (2011)	20,78	20,815	20,806	-0,043
288	287 (2014)	17,74	17,763	17,779	0,090
296	294 (2003)	9,85	9,841	9,916	0,762
307	310 (2018)	11,92	11,920	11,936	0,134
313	315 (2001)	13,32	13,325	13,341	0,120

Tabla A.II.17. Días sustituidos de 2013

2014 (Guillena)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Guillena (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
26	27 (2002)	12,89	13,370	13,345	-0,187

34	32 (2017)	8,64	8,962	8,988	0,290
35	36 (2009)	4,10	4,252	4,099	-3,598
37	36 (2001)	5,58	5,787	5,888	1,745
46	47 (2011)	7,18	7,447	7,135	-4,190
74	77 (2009)	21,43	22,229	21,970	-1,165
83	84 (2002)	19,26	19,978	19,965	-0,065
88	86 (2013)	15,31	15,881	15,575	-1,927
125	126 (2014)	28,72	29,791	29,740	-0,171
149	146 (2003)	29,39	30,487	30,472	-0,049
161	161 (2015)	25,93	26,897	26,827	-0,260
162	162 (2016)	27,73	28,785	28,776	-0,031
178	177 (2014)	29,52	30,621	30,608	-0,043
189	189 (2013)	29,57	30,673	30,673	0
195	195 (2007)	28,16	29,211	29,154	-0,195
206	204 (2000)	27,69	28,723	28,685	-0,132
222	219 (2011)	27,04	28,049	28,069	0,071
259	262 (2014)	13,45	13,951	13,666	-2,043
331	331 (2000)	3,58	3,713	3,780	1,804

Tabla A.II.18. Días sustituidos de 2014

2015 (Guillena)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Guillena (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
7	6 (2014)	10,71	10,833	10,834	0,009
36	34 (2018)	14,55	14,820	14,931	0,749
47	48 (2002)	5,38	5,298	5,369	1,340
79	77 (2003)	6,30	6,253	6,088	-2,639
81	82 (2010)	14,18	14,436	14,618	1,261
110	113 (2008)	25,81	26,513	26,522	0,034

133	134 (2010)	24,25	24,893	24,842	-0,205
138	135 (2004)	24,67	25,329	25,409	0,316
146	149 (2003)	26,73	27,468	27,618	0,546
147	150 (2000)	29,19	30,023	30,043	0,067
178	176 (2015)	29,85	30,708	30,720	0,039
188	189 (2015)	28,60	29,410	29,379	-0,105
231	234 (2001)	24,42	25,070	25,085	0,060
236	234 (2011)	20,61	21,113	21,121	0,038
253	255 (2017)	23,10	23,699	23,673	-0,110
280	281 (2017)	17,67	18,060	18,058	-0,011
286	285 (2005)	5,69	5,620	5,748	2,278
309	312 (2011)	11,92	12,089	12,002	-0,720
312	311 (2016)	14,02	14,270	14,295	0,175
325	322 (2010)	11,03	11,165	11,161	-0,036
335	337 (2000)	9,93	10,023	10,006	-0,170
354	357 (2002)	5,49	5,412	5,417	0,092
364	360 (2017)	6,49	6,451	6,345	-1,645

Tabla A.II.19. Días sustituidos de 2015

2016 (Guillena)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Guillena (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
18	20 (2017)	8,67	8,438	8,174	-3,129
19	20 (2017)	8,54	8,300	8,174	-1,316
43	41 (2010)	3,36	2,813	3,175	12,869
46	43 (2000)	15,24	15,397	15,503	0,688
48	49 (2018)	15,73	15,916	15,888	-0,180
67	64 (2008)	14,5	14,613	14,734	0,828
75	74 (2009)	12,46	12,452	12,877	3,413

119	117 (2018)	24,12	24,804	24,677	-0,512
167	170 (2005)	25,81	26,594	26,760	0,624
186	186 (2001)	29,37	30,365	30,350	-0,049
201	198 (2019)	20,32	20,779	20,313	-2,243
231	228 (2008)	27,05	27,908	27,885	-0,082
232	229 (2001)	26,69	27,526	27,497	-0,105
295	292 (2012)	6,95	6,615	6,464	-2,283
316	313 (2002)	11,78	11,732	11,617	-0,980
347	349 (2006)	9,69	9,518	9,517	-0,011

Tabla A.II.20. Días sustituidos de 2016

2017 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m ²)	Valor objetivo (MJ/m ²)	Valor conseguido (MJ/m ²)	Diferencia (%)
41	41 (2015)	6,75	6,944	6,673	-3,903
85	87 (2005)	13,08	13,607	13,651	0,323
117	119 (2012)	16,98	17,712	17,859	0,830
127	128 (2008)	22,84	23,881	23,794	-0,364
133	130 (2009)	21,64	22,618	22,462	-0,690
212	210 (2019)	27,02	28,281	28,245	-0,127
224	227 (2011)	26,48	27,713	27,717	0,014
235	234 (2010)	24,14	25,249	25,266	0,067
241	238 (2005)	19,94	20,828	20,864	0,173
253	252 (2011)	23,72	24,807	24,331	-1,919
293	295 (2014)	14,90	15,523	15,509	-0,090
318	316 (2017)	13,27	13,807	13,661	-1,057

Tabla A.II.21. Días sustituidos de 2017

2018 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
13	15 (2009)	3,51	3,985	4,122	3,438
55	54 (2014)	16,90	17,861	17,878	0,095
60	63 (2019)	10,63	11,364	11,053	-2,737
66	64 (2008)	14,00	14,856	14,734	-0,821
69	69 (2000)	11,37	12,131	12,098	-0,272
94	97 (2000)	22,88	24,058	24,083	0,104
95	96 (2016)	22,23	23,384	23,384	0,047
101	100 (2019)	23,38	24,576	24,540	-0,146
118	117 (2018)	23,39	24,587	24,677	0,366
149	148 (2005)	21,87	23,011	23,095	0,365
170	171 (2015)	29,23	30,638	30,632	-0,020
239	238 (2017)	12,29	13,084	12,391	-5,300
245	246 (2016)	22,36	23,519	23,508	-0,046
257	257 (2019)	15,09	15,985	15,837	-0,926
263	261 (2017)	20,91	22,017	22,312	1,340
285	287 (2017)	11,59	12,359	12,621	2,120
314	311 (2018)	5,55	6,099	6,263	2,689
321	322 (2012)	7,18	7,789	7,632	-2,016

Tabla A.II.22. Días sustituidos de 2018

2019 (La Rinconada)

Día Juliano	Día sustituido	Valor La Rinconada (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
77	75 (2019)	21,12	21,238	21,378	0,659
91	93 (2012)	8,84	8,591	8,408	-2,130
107	108 (2005)	12,22	12,072	12,193	1,002
177	174 (2008)	28,62	28,962	28,869	-0,321

207	208 (2010)	26,70	26,985	26,980	-0,017
213	210 (2019)	27,95	28,272	28,245	-0,096
233	234 (2010)	25,00	25,234	25,266	0,127
242	242 (2007)	23,82	24,019	24,024	0,021
262	263 (2003)	20,00	20,084	20,059	-0,124
266	268 (2010)	20,42	20,517	20,531	0,068
278	277 (2019)	18,34	18,375	18,397	0,120
283	284 (2009)	17,49	17,499	17,480	-0,109
284	284 (2018)	11,44	11,269	11,315	0,408
285	287 (2001)	15,54	15,491	15,610	0,768
288	290 (2013)	14,44	14,358	14,326	-0,223
300	297 (2010)	15,20	15,141	15,144	0,020
303	306 (2014)	10,27	10,064	9,985	-0,785
307	306 (2003)	11,45	11,279	11,307	0,248
319	317 (2019)	10,04	9,827	9,743	-0,855
362	363 (2014)	11,11	10,929	10,940	0,101

Tabla A.II.23. Días sustituidos de 2019 (I)

2019 (Sanlúcar la Mayor)

Día Juliano	Día sustituido	Valor Sanlúcar (MJ/m²)	Valor objetivo (MJ/m²)	Valor conseguido (MJ/m²)	Diferencia (%)
354	353 (2019)	2,18	0,305	0,935	-

Tabla A.II.24. Días sustituidos de 2019 (II)

Los casos donde se ha conseguido reducir la diferencia de error del 5% ampliando el rango de búsqueda a cinco días anteriores y posteriores al día analizado son los marcados en rosa y aquellos donde no se ha conseguido la reducción son los marcados en verde. Aquellos casos señalados en azul y rojo son los días que no cumplen ninguna de las condiciones descritas y hay que tratarlos como casos especiales aplicándoles unas condiciones adicionales.

