Caracterización de la irradiancia solar difusa sobre superficies verticales

Characterisation of Solar Diffuse Irradiance on Vertical Surfaces

Miguel de Simón Martín



UNIVERSIDAD
DE BURGOS

Tesis Doctoral con Mención Internacional

2015

Universidad de Burgos

Escuela Politécnica Superior de Burgos



TESIS DOCTORAL

Caracterización de la irradiancia solar difusa sobre superficies verticales

Characterisation of Solar Diffuse Irradiance on Vertical Surfaces

Miguel de Simón Martín

Directoras:

Dra. Montserrat Díez Mediavilla

Dra. Cristina Alonso Tristán

Octubre de 2015

Programa de Doctorado en Investigación en Ingeniería



Caracterización de la irradiancia solar difusa sobre superficies verticales

Memoria de Tesis Doctoral presentada para optar al título de **Doctor por la Universidad de Burgos** por **Miguel de Simón Martín**, siendo la directora de la misma la **Dra. Montserrat Díez Mediavilla** y co-directora la **Dra. Cristina Alonso Tristán**.

V^{o}B^{o} de las Directoras:





Dra. Montserrat Díez Mediavilla.

Dra. Cristina Alonso Tristán.

Burgos, a 15 de octubre de 2015.



«DOCTORADO EN INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA»
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE BURGOS

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL
2015

TÍTULO:

Caracterización de la irradiancia solar difusa sobre superficies verticales.

AUTOR:

Miguel de Simón Martín.

DIRECTORAS:

Dra. Montserrat Díez Mediavilla.
Dra. Cristina Alonso Tristán.

RESUMEN:

El objetivo fundamental de la presente Tesis es la caracterización de la irradiancia solar difusa sobre superficies no horizontales, profundizando en su medida y modelización. El estudio se centra en las superficies verticales, orientadas según las direcciones cardinales: Norte, Sur, Este y Oeste. Los resultados obtenidos son de aplicación directa en múltiples campos de la Ingeniería Energética, como la identificación de superficies potenciales para el aprovechamiento del recurso solar, la mejora de la eficiencia energética en edificios, el desarrollo de sistemas de generación distribuidos con fuentes renovables, análisis de la iluminación natural en interiores, estudios de cargas térmicas, etc.

En la Tesis se ha realizado una exhaustiva revisión de los modelos de transposición de irradiancia difusa y reflejada. Esta revisión incluye desde los modelos clásicos más sencillos, isótropos y anisótropos de superposición, hasta los modelos más complejos basados en la integración de la expresión del gradiente de radiancia en función de los ángulos cenital y acimutal. También se han incluido modelos no paramétricos, es decir construidos a partir de la información extraída de un conjunto de datos de entrenamiento, que pueden operar como aproximadores universales.

Para evaluar los modelos revisados, se ha diseñado y llevado a cabo una rigurosa campaña de medidas para la obtención de los datos experimentales. Las observaciones han sido obtenidas mediante el dispositivo MK6, un prototipo de estación radiométrica multidireccional desarrollado en esta Tesis. El sistema concebido permite la medida directa de irradiancia difusa y reflejada, sobre planos con diferentes inclinaciones (entre 60 y 90º respecto a la vertical), simultáneamente en cuatro direcciones ortogonales. Al constar de un único elemento de sombreamiento (anillo lobular), común a todos los sensores orientados del equipo, presenta múltiples ventajas respecto a los sistemas convencionales, destacando una reducción significativa de los costes. Además, se ha realizado el cálculo del factor de corrección total óptimo que permite corregir las medidas tomadas. No se ha encontrado en la bibliografía ninguna otra expresión, tanto del factor de corrección geométrico como del factor de corrección total, generalizada para cualquier inclinación y orientación de los sensores.

Mediante el dispositivo MK6, se ha procedido a la identificación de los cielos observados en Burgos (42.351ºN, −3.688ºE) según el Estándar CIE 2004. Además, utilizando esta clasificación, se han obtenido los intervalos tomados por los índices de claridad clásicos para cielos despejados, intermedios y cubiertos, característicos del emplazamiento de estudio. Esta clasificación es fundamental para mejorar la modelización de la radiación solar. Por otro lado, la irradiancia de albedo ha sido caracterizada tomando el modelo más preciso de entre los 4 modelos más utilizados en la bibliografía.

Finalmente, los modelos de transposición recogidos en la revisión, han sido estudiados para las medidas tomadas de irradiancia diez minutal sobre planos verticales orientados según las direcciones cardinales y tres tipos diferentes de cielos: despejados, intermedios y cubiertos. El método de evaluación seguido se ha llevado a cabo de forma cualitativa y cuantitativa. En el análisis cualitativo se han analizado los Diagramas de Taylor correspondientes y una versión de los Diagramas de Ineichen modificada para analizar un elevado número de modelos. Por otro lado, el estudio cuantitativo incorpora, a parte de los índices estadísticos clásicos, un nuevo índice propuesto por el autor, denominado $\mu_{1-\alpha}$. Este índice pretende evitar ciertas deficiencias encontradas en algunos estadísticos convencionales. Los resultados obtenidos han sido contrastados con los estudios más relevantes publicados hasta la fecha.

PALABRAS CLAVE:

Irradiancia solar difusa y reflejada, instrumentación, modelización de sistemas, estadística.

TITLE:

Characterisation of Solar Diffuse Irradiance on Vertical Surfaces.

ABSTRACT:

This proposed research work attemps to characterise the solar diffuse irradiance on non-horizontal surfaces, its measurement and transposition modellization. The study is focused on vertical surfaces pointing the cardinal directions: North, South, East and West, for the installation of solar energy facilities. Obtained results are of interest for many different fields related with Energy Engineering, such as the determination of potential surfaces for the installation of solar energy generators, the improvement of energetic efficiency of buildings, the introduction of renewable energy sources in smart distributed power grids, the study of the indoor illuminance needs or the calculation of radiation heat loads, among many others.

First, an exhaustive review of diffuse and reflected irradiance transposition models have been done. The review includes a wide array of models ranging from the simplest classical ones: isotropic and superposition of anisotropic parts ones, to the most complex models: those based on the integration of the radiance gradiation functions for the zenith and azimuth angles. Furthermore, non-parametric models have been also analysed. Some of these models can work as universal aproximators simply by extracting information from a training dataset.

In order to evaluate and compare the selected models, a rigorous measurement campaign has been carried out. Observations have been obtained by the MK6 device, a designed multidirectional radiometric station prototype. This system allows the simultaneous measurement of diffuse and reflected irradiance on 4 planes with different inclination angles (between 60 and 90 degrees with the zenith) pointing the cardinal directions. Its main characteristic and advantage is that it has only one shadowing band (a lobular ring) for the four sensors in the device, which makes it really competitive to other commercial devices because it reduces significantly the equipment costs. Moreover, the optimal correction factor for the measurements taken has been provided. The expression of an isotropic or anisotropic correction factor for the shadowband on sensors not installed on an horizontal surface or pointing the equatorial direction, could not be found in existing bibliography. Thus, the generalized expression for the geometrical correction and the modified versions of five anisotropic correction models for diffuse irradiance sensors pointing in any given direction or tilted at any given angle have been developed.

Thanks to the MK6 measurements, we have identified skies in Burgos (42.351°N, −3.688°E) from september 2014 to april 2015 according to the CIE 2004 Standard classification. Furthermore, a study comparing 9 classical clear indexes with the CIE Standards has been carried out. Three intervals for those indexes have been defined classifiying skies into overcast, intermediate and clear. This classification is mandatory for optimising the solar irradiance modelling. On the other hand, albedo's irradiance has been characterised according to the most precise model out of the 4 most shown in the bibliography.

Finally, the described transposition models have been studied for 10-minutes inteval difuse irradiance values on North, South, East and West pointing to surfaces, and the three types of sky conditions analysed before. The applied evaluation method has a qualitative and a quantitative part. The quantitative analysis includes Taylor Diagrams and a modified version of the Ineichen Diagrams for a comparison of a large amount of models. The qualitative part comprises the results analysis of several statistical estimators, including a new one proposed by the author, which has been called $\mu_{1-\alpha}$. This new estimator overcomes some of the weaknesses of the traditional ones and help researchers to state better conclusions. All obtained results have been discussed with regards to the most relevant studies conducted so far.

KEYWORDS:

Solar diffuse and reflected irradiance, measurement, modelling, statistics.

Agradecimientos

Quiero mostrar mi reconocimiento a las diferentes personas que han colaborado para que este trabajo llegue a buen puerto, incluyendo los que han intervenido en los más pequeños detalles o los que han querido compartir conmigo su experiencia. Son bastantes las personas que han puesto su grano de arena en esta construcción, a veces inadvertidamente, y en otras ocasiones asistiéndome de forma directa. A todos ellos les debo hasta dónde he llegado y de todos ellos es este trabajo.

En primer lugar quiero expresar mi agradecimiento a mis directoras, la **Dra. Montserrat Díez Mediavilla** y la **Dra. Cristina Alonso Tristán**, por su confianza depositada en mí y facilitarme los medios para la elaboración de esta Tesis. Igualmente quisiera agradecer a mis compañeros del **grupo de investigación SWIFT**, y en concreto a **David González**, la ayuda prestada en la realización de la componente experimental.

Por otro lado, parte del mérito de este trabajo ha sido gracias al apoyo y guía de mis maestros y amigos, los profesores **Araceli** y **Rafael**, de la Universidad de León, que han tenido la amabilidad de ayudarme cuando lo he necesitado y revisar este texto.

Deseo mencionar de forma especial a **mis padres**, que me han apoyado incondicionalmente y me han enseñado a no abandonar nunca, incluso en los momentos de mayor dificultad. Igualmente, no habría podido acabar con éxito sin el apoyo de mis mejores amigos: **Jorge**, **Sergio** (un artista con las ilustraciones), **Daniel** y **Diego**. Gracias por entender todas las ausencias.

Quiero dar las gracias a **Sheila**, que siempre me ha escuchado, ha confiado en mí y me ha ayudado a seguir adelante, y a **Vanesa**, **Estefanía**, **Laura** y **Lidia** por animarme y darme su consejo.

También estoy muy agredecido a **Laura Robles** y a **Alef Sterk**, por brindarme la oportunidad de disfrutar de una estancia de investigación en la Universidad de Groningen (Países Bajos). Allí pude conocer a magníficos investigadores y amigos, a los que mando un afectuoso saludo. Mención destacada en este punto merecen **Vladimir** e **Ivan**, por ofrecerme su amistad incondicional y enseñarme a crecer profesional y personalmente.

Tampoco me olvido de **David Temiño**, compañero de profesión al que admiro y gran amigo, al cual agradezco especialmente el esfuerzo por las noches pasadas perfeccionando los diseños y por ayudarme en la construcción del prototipo MK6.

Por si esto fuera poco, soy afortunado de haber contado con **Gonzalo**, **Lucía**, **Joaquín** y el resto de **"locos de los viernes"** (imposible nombraros a todos), a los que agradezco los buenos momentos pasados, que espero se sigan repitiendo mucho tiempo.

Finalmente, pero no menos importante, quisiera agradecer a **todos mis compañeros** del **Área de Ingeniería Eléctrica** de la **Universidad de León**, así como a **María José**, **Jonatan** y **Julio César**, sus consejos, su predisposición a ayudarme y la confianza depositada en mí desde el primer momento. Es un honor y un placer trabajar a vuestro lado.

A todos vosotros, **GRACIAS**.

Miguel de Simón Martín.

Burgos, octubre de 2015.

A mis padres.

«La energía solar no es una energía alternativa: es la energía»
– Hermann Scheer[*] *–*

«No se puede desatar un nudo sin saber cómo está hecho»
– Aristóteles[**] *–*

Mateo 25, 14-30.

[*]Presidente del Consejo Mundial de Energías Renovables (29/04/1944-14/10/2010).
[**]Filósofo y polímata macedonio (384 A.C.-322 A.C.).

Índice general

Índice de figuras VII

Índice de tablas XIII

Nomenclatura XVII

Introducción 1
Preámbulo . . . 1
Motivación . . . 6
Antecedentes . . . 6
Objetivos . . . 7
Herramientas y métodos . . . 7
Estructura de la Tesis . . . 8
Rendimiento científico . . . 10
Uso de la nomenclatura . . . 11
Otras consideraciones . . . 12

PARTE I: MARCO TEÓRICO 13

1. Modelización de la irradiancia difusa y reflejada sobre el plano 15
1.1. Introducción . . . 15
1.2. Modelización de la irradiancia solar . . . 16
1.3. Clasificación de los modelos de transposición . . . 19
1.4. Formulación generalizada . . . 22
1.5. Modelos isótropos . . . 22
1.5.1. Modelo de Liu & Jordan . . . 22
1.5.2. Modelo de Tian et al. . . . 26
1.5.3. Modelo de Badescu . . . 26
1.5.4. Modelo de Koronakis . . . 27
1.5.5. Modelo de Olmo . . . 28

1.6. Modelos anisótropos de superposición 29
1.6.1. Modelo ASHRAE 29
1.6.2. Modelo de Díez-Mediavilla 30
1.6.3. Modelo DOE-2 32
1.6.4. Modelo de Gueymard 32
1.6.5. Modelo de Hay & Davies 35
1.6.6. Modelo de Klucher 36
1.6.7. Modelo de Ma & Iqbal 36
1.6.8. Modelo de Muneer 37
1.6.9. Modelo de Perez et al. 38
1.6.10. Modelo de Reindl 39
1.6.11. Modelo de Skartveit & Olseth 40
1.6.12. Modelo de Steven & Unsworth 41
1.6.13. Modelo de Temps & Coulson 41
1.6.14. Modelo de Willmott 42
1.7. Modelos anisótropos de gradiente de radiancia 43
1.7.1. Modelo de Brunger & Hooper 46
1.7.2. Modelo CIE 2004 (Cielo general estándar) 47
1.7.3. Modelo de Hooper & Brunger (TCCD) 49
1.7.4. Modelo de Igawa et al. 49
1.7.5. Modelo de Moon & Spencer 51
1.7.6. Modelo de Siala & Hooper 51
1.8. Modelos no paramétricos 52
1.8.1. Sistemas de inferencia borrosa 53
1.8.2. Redes neuronales artificiales 56
1.8.3. Redes neuroborrosas (ANFIS) 68
1.9. Modelos de albedo 71
1.9.1. Modelo de Iqbal (isótropo constante) 71
1.9.2. Modelo de Gueymard (isótropo con variación estacional) 72
1.9.3. Modelo de Kambezidis (anisótropo) 73
1.9.4. Modelo de Gueymard (anisótropo semifísico) 74

2. Corrección de las medidas de irradiancia difusa 77
2.1. Introducción 77
2.2. Factor de visión del cielo 78
2.3. Factor de corrección geométrico 80
2.3.1. Ángulo transversal del anillo 82
2.3.2. Límites de integración 86
2.3.3. Reglas generales para la definición de los límites 89
2.3.4. Corrección geométrica para un sensor horizontal 91
2.3.5. Corrección geométrica para un sensor inclinado 92

2.3.6. Corrección geométrica para sensores verticales 93
2.4. Factor de corrección total 97
2.4.1. Correcciones de Batlles et al. 97
2.4.2. Corrección de LeBaron et al. 98
2.4.3. Corrección de Muneer & Zhang 108
2.4.4. Corrección de Steven 111

3. Índices de claridad y clasificación de los tipos de cielo 113
3.1. Introducción 113
3.2. Índices de claridad 114
3.2.1. Fracción difusa 114
3.2.2. Fracción directa 114
3.2.3. Función de claridad 115
3.2.4. Índice de claridad 116
3.2.5. Índice de claridad de Batlles et al. 117
3.2.6. Índice de claridad de Klucher 117
3.2.7. Índices de claridad y brillo de Perez et al. 117
3.2.8. Índice de nebulosidad de Perraudeau 119
3.2.9. Índice de cielo de Igawa 120
3.3. Relación entre el índice de claridad y la fracción difusa 122
3.4. Tipos de cielo: el Estándar CIE (2004) 123

PARTE II: MEDIDA DE LA IRRADIANCIA 129

4. Campaña de medidas y gestión de los datos 131
4.1. Introducción 131
4.2. Micro-red radiométrica SWIFT 131
4.2.1. Estación SWIFT0001 132
4.3. Campaña de medidas 137
4.3.1. Sistema de adquisición de datos 138
4.3.2. Registro de medidas 140
4.4. Criterios de calidad de los datos 141
4.5. Incertidumbre de la medida de irradiancia solar 144
4.6. Organización y gestión de datos 151
4.6.1. Modelos de datos y metadatos 151
4.6.2. Normalización y desnormalización 151
4.6.3. Metadatos de calidad 153
4.6.4. Modelo Entidad-Relación 154
4.6.5. Modelo Relacional 157
4.6.6. Preprocesado de datos 157
4.7. Datos empleados en los estudios realizados 159

5. Medida y modelización del albedo 161
5.1. Introducción . . . 161
5.2. Modelo de Iqbal (isótropo constante) . . . 161
5.3. Modelo de Gueymard (isótropo estacional) . . . 165
5.4. Modelo de Kambezidis (anisótropo) . . . 168
5.5. Modelo de Gueymard (anisótropo semifísico) . . . 168
5.6. Conclusiones y elección del modelo óptimo . . . 172

6. Prototipo MK6 para la medida de irradiancia multidireccional 175
6.1. Introducción . . . 175
6.2. Bases de diseño y restricciones . . . 176
6.2.1. Análisis geométrico del anillo de sombra para un piranómetro . . . 177
6.2.2. Sombreamiento de múltiples piranómetros simultáneamente . . . 180
6.3. Primeros prototipos . . . 184
6.4. Prototipo MK6 . . . 191
6.5. Sensibilidad geométrica . . . 199
6.5.1. Variaciones en el plano meridional del dispositivo . . . 199
6.5.2. Variaciones en el plano ecuatorial del dispositivo . . . 202
6.6. Posicionamiento del anillo . . . 202
6.7. Software de simulación y optimización del diseño . . . 205
6.8. Dispositivos auxiliares . . . 211
6.9. Calibración y mantenimiento . . . 213

7. Factor de corrección óptimo para el equipo MK6 215
7.1. Introducción . . . 215
7.2. Procedimiento de cálculo y validación . . . 215
7.3. Análisis de los modelos de corrección . . . 216
7.3.1. Modelo de corrección geométrico o isótropo . . . 217
7.3.2. Modelo de corrección Batlles A . . . 218
7.3.3. Modelo de corrección Batlles B . . . 218
7.3.4. Modelo de corrección LeBaron . . . 219
7.3.5. Modelo de corrección Muneer & Zhang . . . 219
7.3.6. Modelo de corrección Steven . . . 220
7.4. Conclusiones y elección del modelo de corrección . . . 251

PARTE III: ESTUDIOS REALIZADOS 255

8. Identificación y caracterización de los tipos de cielo en Burgos 257
8.1. Introducción . . . 257
8.2. Análisis de los índices k_t y k_d . . . 258
8.2.1. Función de distribución de densidad . . . 258

8.2.2. Análisis en función de la distribución fraccional del tiempo 260
8.2.3. Análisis en función de la masa óptica relativa de aire 261
8.2.4. Relación entre el índice de claridad y la fracción difusa 263
8.3. Frecuencia de los cielos Estándar CIE 263
8.4. Índices de claridad respecto al Estándar CIE 279

9. Estudio analítico de los modelos de transposición 289
9.1. Introducción 289
9.2. Descripción del procedimiento de análisis 290
9.2.1. Análisis cuantitativo de los modelos 291
9.2.2. Análisis cualitativo de los modelos 295
9.2.3. Agregación de clasificaciones 298
9.3. Resultados 300
9.4. Discusión de resultados 326

10. Conclusiones y aportes 339
10.1. Conclusiones 339
10.1.1. Conclusiones generales 339
10.1.2. Conclusiones particulares 340
10.2. Objetivos cumplidos y aportes de la Tesis 342
10.3. Futuras líneas de investigación 344

ANEXOS 345

A. Definiciones y fundamentos 347
A.1. Introducción 347
A.2. Definiciones 347
A.3. Geometría solar 351
A.3.1. Coordenadas ecuatoriales u horarias 353
A.3.2. Coordenadas horizontales 357
A.3.3. Transformación de coordenadas 359
A.3.4. Distancia angular entre dos puntos de la bóveda celeste 360

B. Medida de la irradiancia difusa 363
B.1. Introducción 363
B.2. Dispositivos de sombreamiento convencionales 364
B.2.1. Anillo de sombra de Drummond 365
B.2.2. Banda rotativa 365
B.2.3. Disco o bola de sombra con seguidor 368
B.3. Otros dispositivos 368
B.4. Medida de la distribución espacial de la radiancia 370

B.4.1. Escáner de cielo . . . 371
B.4.2. Sensor estático . . . 371
B.4.3. Cámara de cielo . . . 372
B.5. Fuentes de error . . . 374
B.6. Calibración de piranómetros de irradiancia difusa . . . 375
B.7. Estaciones en tierra y medidas por satélite . . . 377
B.8. Redes radiométricas y bases de datos de irradiancia . . . 377

C. Implementación de los modelos de transposición 381
C.1. Introducción . . . 381
C.2. Demostración del modelo de Liu & Jordan . . . 381
C.3. Coeficientes F_{ij} óptimos locales del modelo de Perez et al. para Burgos . . . 385
C.4. Configuración del modelo MLP . . . 390
C.5. Configuración del modelo RBF . . . 394
C.6. Configuración del modelo GRNN . . . 395
C.7. Configuración del modelo ANFIS . . . 395

D. Técnicas estadísticas 399
D.1. Introducción . . . 399
D.2. Validación cruzada . . . 399
D.3. Análisis de los residuos . . . 400
D.4. Cálculo de incertidumbres de medida . . . 402
D.5. Índices estadísticos . . . 405

REFERENCIAS 409

SUMMARY 435

SOBRE EL AUTOR/ ABOUT THE AUTHOR 471

Índice de figuras

1. Sistemas BIPV instalados en el mundo 3
2. Evolución de los sistemas BIPV por países 3
3. Diagrama de cálculo del potencial solar en entornos urbanos 5

1.1. Esquema relacional de variables solares 16
1.2. Clasificación de los modelos de transposición 21
1.3. Modelo de Liu & Jordan 23
1.4. Integración de la radiancia del cielo 24
1.5. Modelo de Tian et al 26
1.6. Comparación entre los modelos de Liu & Jordan y Badescu 27
1.7. Ajuste del coeficiente C de Threlkeld 31
1.8. Ángulo con el plano de estudio de la irradiancia reflejada 35
1.9. Modelo borroso 54
1.10. Modelo de neurona con entrada única 57
1.11. Modelo de neurona con múltiples entradas 58
1.12. Red neuronal monocapa 59
1.13. Red neuronal multicapa 59
1.14. Red neuronal Perceptrón multicapa 65
1.15. Esquema de red neuronal con función de base radial 66
1.16. Red neuronal de regresión generalizada 67
1.17. Esquema de sistema ANFIS 69
1.18. Patrones de reflectancia según el modelo semifísico de Gueymard 75

2.1. Ejemplos de toma y análisis de proyecciones estereográficas 79
2.2. Vista en planta de un anillo de sombra genérico 81
2.3. Esquemas del ángulo transversal del anillo de sombra observado 83
2.4. Esquema geométrico del perfil en I 83
2.5. Esquema geométrico del perfil en U 84
2.6. Cociente entre las fracciones sombreadas perfil en I respecto del perfil en U 85
2.7. Ejemplo de límites de integración para un plano vertical cualquiera 90
2.8. Factor de corrección geométrico para un sensor horizontal 92
2.9. Factor de corrección geométrico para un sensor vertical hacia el Norte . . . 94

2.10. Factor de corrección geométrico para un sensor vertical hacia el Sur 95
2.11. Factor de corrección geométrico para un sensor vertical hacia el Este/Oeste 96

3.1. Clasificación de cielos simplificada según Igawa 121
3.2. Funciones gradiente de radiancia según el estándar CIE 125
3.3. Funciones indicatrices según el estándar CIE 125
3.4. Tipos de cielo CIE estándar 127

4.1. Micro-red SWIFT 133
4.2. Estudio de obstáculos de la estación SWIFT0001 134
4.3. Estación de medidas radiométricas SWIFT0001 136
4.4. Elementos del sistema adoptado para la medida 138
4.5. Esquemas e indicación de puertos de los datalogger empleados 139
4.6. Diagrama Entidad-Relación de la base de datos 156
4.7. Diagrama de esquema de la base de datos 158

5.1. Serie temporal de medidas de irradiancia de albedo 162
5.2. Cálculo de la reflectancia mediante el modelo de Iqbal 163
5.3. Correlación de las medidas con el modelo de Iqbal 163
5.4. Análisis de los residuos del modelo de Iqbal 164
5.5. Valores de reflectancia estacional empleando coeficientes de Gueymard . . . 165
5.6. Cálculo de la reflectancia mediante el modelo isótropo estacional 166
5.7. Correlación de las medidas con el modelo de Gueymard (isótropo estacional) 166
5.8. Análisis de los residuos del modelo de Gueymard (isótropo estacional) . . . 167
5.9. Cálculo de la reflectancia mediante el modelo de Kambezidis 169
5.10. Correlación de las medidas con el modelo de Kambezidis 169
5.11. Análisis de los residuos del modelo de Kambezidis 170
5.12. Dependencia de la reflectancia aparente con el ángulo cenital 171
5.13. Serie temporal de la reflectancia según el modelo de Gueymard (semifísico) 171
5.14. Cálculo de la reflectancia mediante el modelo de Gueymard (semifísico) . . 173
5.15. Correlación de las medidas con el modelo de Gueymard (semifísico) 173
5.16. Análisis de los residuos del modelo de Gueymard (semifísico) 174

6.1. Geometría del movimiento aparente del Sol 177
6.2. Sombreamiento del piranómetro 180
6.3. Posiciones de los piranómetros y referencias constructivas 182
6.4. Anillo lobular con indicación de referencias 183
6.5. Relación entre los centros y el radio de los lóbulos del anillo 184
6.6. Prototipo de estación de medida MK1 186
6.7. Detalles constructivos del prototipo MK1 187
6.8. Prototipo de estación de medida MK5 188
6.9. Diferentes perspectivas del prototipo MK5 189

6.10. Submontaje del anillo de sombra en el prototipo MK5 190
6.11. Prototipo de estación de medida MK6 192
6.12. Estructura soporte del prototipo MK6 194
6.13. Placas soporte de los piranómetros 195
6.14. Montaje de las placas soporte de los piranómetros 196
6.15. Placas laterales del prototipo MK6 198
6.16. Diferentes perspectivas del prototipo MK6 200
6.17. Relaciones geométricas para el posicionamiento del anillo 201
6.18. Esquema del juego entre dos posiciones 204
6.19. Posicionamiento del anillo de sombra 206
6.20. Menú principal de la herramienta de diseño y simulación del equipo MK6 . 207
6.21. Ejemplo de simulación de una configuración 208
6.22. Definición de parámetros de configuración del equipo MK6 209
6.23. Ventana de ayuda y relación de esquemas 209
6.24. Opciones de visualización de la simulación del comportamiento del anillo . . 212
6.25. Escudo contra irradiancia reflejada para el equipo MK6 213
6.26. Medidas de referencia para la verificación de la posición del anillo 214

7.1. Valores con corrección geométrica para el sensor Norte 221
7.2. Estudio de los residuos de la corrección geométrica para el sensor Norte . . 222
7.3. Valores con corrección geométrica para el sensor Sur 223
7.4. Valores con corrección geométrica para el sensor Este 224
7.5. Valores con corrección geométrica para el sensor Oeste 225
7.6. Valores con corrección Batlles A para el sensor Norte 226
7.7. Estudio de los residuos de la corrección Batlles A para el sensor Norte . . . 227
7.8. Valores con corrección Batlles A para el sensor Sur 228
7.9. Valores con corrección Batlles A para el sensor Este 229
7.10. Valores con corrección Batlles A para el sensor Oeste 230
7.11. Valores con corrección Batlles B para el sensor Norte 231
7.12. Estudio de los residuos de la corrección Batlles B para el sensor Norte . . . 232
7.13. Valores con corrección Batlles B para el sensor Sur 233
7.14. Valores con corrección geométrica para el sensor Este 234
7.15. Valores con corrección Batlles B para el sensor Oeste 235
7.16. Valores con corrección LeBaron para el sensor Norte 236
7.17. Estudio de los residuos de la corrección LeBaron para el sensor Norte . . . 237
7.18. Valores con corrección LeBaron para el sensor Sur 238
7.19. Valores con corrección LeBaron para el sensor Este 239
7.20. Valores con corrección LeBaron para el sensor Oeste 240
7.21. Valores con corrección Muneer & Zhang para el sensor Norte 241
7.22. Estudio de los residuos de la corrección Muneer & Zhang sensor Norte . . . 242
7.23. Valores con corrección Muneer & Zhang para el sensor Sur 243

7.24. Valores con corrección Muneer & Zhang para el sensor Este 244
7.25. Valores con corrección Muneer & Zhang para el sensor Oeste 245
7.26. Valores con corrección Steven para el sensor Norte 246
7.27. Estudio de los residuos de la corrección Steven para el sensor Norte 247
7.28. Valores con corrección Steven para el sensor Sur 248
7.29. Valores con corrección Steven para el sensor Este 249
7.30. Valores con corrección Steven para el sensor Oeste 250

8.1. Funciones de distribución de densidad de k_t y k_d 259
8.2. Funciones de distribución de densidad de $k_d(\gamma_p)$ 259
8.3. k_t y k_d en función de la distribución fraccional del tiempo 260
8.4. $k_d(\gamma_p)$ en función de la distribución fraccional del tiempo 261
8.5. Distribución en función de la masa óptica relativa de aire 262
8.6. Modelo de Boland et al. para la relación $k_d = f(k_t)$ 264
8.7. Modelo de Erbs et al. para la relación $k_d = f(k_t)$ 264
8.8. Modelo de Muneer & Saluja para la relación $k_d = f(k_t)$ 265
8.9. Modelo de Orgill & Hollands para la relación $k_d = f(k_t)$ 265
8.10. Modelo de Reindl et al. para la relación $k_d = f(k_t)$ 266
8.11. Frecuencia de los cielos Estándar CIE (proc. A) 267
8.12. Diferencias en la clasificación del Estándar CIE (proc. A) 268
8.13. Diferencias en la clasificación del Estándar CIE por orientaciones (proc. A) 269
8.14. Grupos en función del cociente de irradiancias verticales 273
8.15. Estándares CIE en función de la proporción de irradiancia difusa vertical . 274
8.16. Frecuencia de los cielos Estándar CIE (proc. B) 276
8.17. Diferencias en la clasificación del Estándar CIE (proc. B) 277
8.18. Diferencias en la clasificación del Estándar CIE por orientaciones (proc. B) 278
8.19. Distribución de la fracción difusa para cada Estándar CIE 283
8.20. Distribución de la fracción directa para cada Estándar CIE 283
8.21. Distribución de la función de claridad para cada Estándar CIE 284
8.22. Distribución del índice de claridad para cada Estándar CIE 284
8.23. Distribución del índice k_{tt} de Batlles et al. para cada Estándar CIE 285
8.24. Distribución del índice k_k de Batlles et al. para cada Estándar CIE 285
8.25. Distribución del índice de claridad de Klucher para cada Estándar CIE . . . 286
8.26. Distribución del índice de claridad de Perez (1987) para cada Estándar CIE 286
8.27. Distribución del índice de claridad de Perez (1990) para cada Estándar CIE 287
8.28. Distribución del índice de brillo de Perez et al. para cada Estándar CIE . . 287
8.29. Distribución del índice de nebulosidad para cada Estándar CIE 288
8.30. Distribución del índice de cielo de Igawa para cada Estándar CIE 288

9.1. Relaciones geométricas del diagrama de Taylor 297
9.2. Ejemplo de diagrama de Taylor 298
9.3. Diagrama de Taylor modelos de transposición (Norte) 302

9.4. Diagrama modificado de Ineichen (Norte) . . . 302
9.5. Análisis en función del índice de claridad k_t (Norte) . . . 304
9.6. Análisis en función de la fracción difusa (Norte) . . . 305
9.7. Análisis en función del índice de cielo Si (Norte) . . . 306
9.8. Diagrama de Taylor modelos de transposición (Sur) . . . 307
9.9. Diagrama modificado de Ineichen (Sur) . . . 307
9.10. Análisis en función del índice de claridad k_t (Sur) . . . 309
9.11. Análisis en función de la fracción difusa (Sur) . . . 310
9.12. Análisis en función del índice de cielo Si (Sur) . . . 311
9.13. Diagrama de Taylor modelos de transposición (Este) . . . 312
9.14. Diagrama modificado de Ineichen (Este) . . . 312
9.15. Análisis en función del índice de claridad k_t (Este) . . . 314
9.16. Análisis en función de la fracción difusa (Este) . . . 315
9.17. Análisis en función del índice de cielo Si (Este) . . . 316
9.18. Diagrama de Taylor modelos de transposición (Oeste) . . . 317
9.19. Diagrama modificado de Ineichen (Oeste) . . . 317
9.20. Análisis en función del índice de claridad k_t (Oeste) . . . 319
9.21. Análisis en función de la fracción difusa (Oeste) . . . 320
9.22. Análisis en función del índice de cielo Si (Oeste) . . . 321

A.1. Comparación entre las definiciones de masa óptica relativa de aire . . . 352
A.2. Coordenadas horarias . . . 354
A.3. Declinación del Sol a lo largo del año . . . 355
A.4. Corrección por ecuación de tiempo a lo largo del año . . . 357
A.5. Coordenadas horizontales . . . 358
A.6. Ángulo formado por una superficie y la posición del Sol . . . 361
A.7. Comparación entre las expresiones utilizadas para el cálculo de θ_{sp} . . . 362

B.1. Anillos de sombra de Drummond . . . 366
B.2. Elementos de un anillo de Drummond . . . 367
B.3. Banda rotativa . . . 369
B.4. Disco solar con seguidor . . . 369
B.5. Dispositivo Delta-T . . . 371
B.6. Escáner de cielo . . . 372
B.7. Sensor estático Solar Igel . . . 373
B.8. Cámara de cielo EKO SRF All-Sky Camera . . . 373

C.1. Ángulos considerados para la integración de la radiancia . . . 382
C.2. Modelo con coeficientes genéricos respecto óptimos locales (Norte) . . . 388
C.3. Modelo con coeficientes genéricos respecto óptimos locales (Sur) . . . 388
C.4. Modelo con coeficientes genéricos respecto óptimos locales (Este) . . . 389
C.5. Modelo con coeficientes genéricos respecto óptimos locales (Oeste) . . . 389

C.6. Evaluación del error en el entrenamiento de la red ANFIS 396

Índice de tablas

1.1. Coeficientes del modelo de Perez et al. (irrad.) 39
1.2. Coeficientes del modelo de Brunger & Hooper 48
1.3. Coeficientes de anisotropía normalizados modelo de Hooper & Brunger . . . 50
1.4. Comparativa entre los sistemas de inferencia Mamdani y Takagi-Sugeno . . 55
1.5. Algoritmos de entrenamiento de propagación hacia atrás 62
1.6. Utilización de redes neuronales en la modelización de energía solar 64
1.7. Reflectancias aparentes comunes 72
1.8. Coeficientes a_i modelo de reflectancias isótropa estacional 73
1.9. Coeficientes a y b del modelo de reflectancia anisótropo 74
1.10. Coeficientes del modelo de Gueymard 75

2.1. Reglas generalizadas para el cálculo de los límites de integración 90
2.2. Límites de integración para sensores verticales 91
2.3. Parámetros del modelo de corrección de Batlles et al. A 97
2.4. Parámetros del modelo de corrección de Batlles et al. B 99
2.5. Intervalos de los parámetros del modelo de corrección de LeBaron 99
2.6. Factores de corrección propuestos por LeBaron 100
2.7. Factores de corrección del modelo de LeBaron sensor Norte 101
2.8. Factores de corrección del modelo de LeBaron sensor Sur 103
2.9. Factores de corrección del modelo de LeBaron sensor Este 105
2.10. Factores de corrección del modelo de LeBaron sensor Oeste 106
2.11. Límites de integración denominador de S (Muneer & Zhang) 109
2.12. Límites de integración numerador de S (Muneer & Zhang) 111
2.13. Parámetros del modelo de corrección de Steven 112

3.1. Clasificación de cielos según el valor de fracción difusa 114
3.2. Clasificación de cielos según el valor de fracción directa 115
3.3. Clasificación de cielos según el valor de la función de claridad 116
3.4. Clasificación de cielos según el valor del índice de claridad 116
3.5. Clasificación de cielos según el valor del índice de claridad de Perez et al. . 118
3.6. Claridad del cielo según el valor del índice de brillo de Perez et al. 119

3.7. Clasificación de cielos según el valor del índice de Perraudeau 119
3.8. Tipos de cielo según el modelo de Igawa et al. 121
3.9. Coeficientes del modelo CIE Cielo General Estándar 124

4.1. Relación de instrumentos de medida SWIFT0001 135
4.2. Clasificación de los piranómetros según la OMM/ISO. 137
4.3. Códigos de calidad de las variables medidas 141
4.4. Coeficientes de sensibilidad medidas de irradiancia 145
4.5. Fuentes de error e incertidumbres estándar de la tensión de salida 146
4.6. Fuentes de error e incertidumbres estándar de la constante del sensor 147
4.7. Fuentes de error e incertidumbres estándar de la medida 148
4.8. Informe de estado del SGBD (15 de julio de 2015) 152

5.1. Resultados modelos de reflectancia 174

6.1. Relación de cambios entre versiones del prototipo MK 191
6.2. Calendario de cambios de posición MK6 para el año 2015 205

7.1. Ajuste de los modelos de corrección de la medida de irradiancia difusa . . . 251

8.1. Agrupación de Estándares CIE 272
8.2. Relación entre los índices de claridad y la clasificación de cielos 281
8.3. Relación entre los índices de claridad y los Estándares CIE 282

9.1. Relación de modelos analizados 292
9.2. Valores críticos de z en función del nivel de significación α 300
9.3. Evaluación de modelos para la orientación Norte 303
9.4. Evaluación de modelos para la orientación Sur 308
9.5. Evaluación de modelos para la orientación Este 313
9.6. Evaluación de modelos para la orientación Oeste 318
9.7. Clasificación global de los modelos de acuerdo al MBD 322
9.8. Clasificación global de los modelos de acuerdo al RMSD 323
9.9. Clasificación global de los modelos de acuerdo al R^2 324
9.10. Clasificación global de los modelos de acuerdo al índice $\mu_{0.99}$ 325

B.1. Estaciones radiométricas de la AEMET en Castilla y León. 378

C.1. Coef. optim. para el modelo de Perez et al. plano vertical Norte 386
C.2. Coef. optim. para el modelo de Perez et al. plano vertical Sur 386
C.3. Coef. optim. para el modelo de Perez et al. plano vertical Este 387
C.4. Coef. optim. para el modelo de Perez et al. plano vertical Oeste 387
C.5. Selección de parámetros de entrada en el modelo MLP 391
C.6. Configuración adoptada del modelo MLP 391
C.7. Análisis de Monte Carlo del modelo MLP (Norte) 392

C.8. Análisis de Monte Carlo del modelo MLP (Sur) 392
C.9. Análisis de Monte Carlo del modelo MLP (Este) 392
C.10. Análisis de Monte Carlo del modelo MLP (Oeste) 393
C.11. Clasificación de modelos MLP para cualquier orientación en base a MBD . 393
C.12. Clasifcación de modelos MLP para cualquier orientación en base a RMSD . 393
C.13. Clasificación de modelos MLP para cualquier orientación en base a $\mu_{0.99}$ . . 394
C.14. Configuración adoptada del modelo RBF 394
C.15. Configuración adoptada del modelo GRNN 395
C.16. Selección de parámetros de entrada en el modelo ANFIS 396
C.17. Configuración adoptada del modelo ANFIS 397

Nomenclatura

Letras griegas

α	Nivel de significación estadística.	[-]
Δ	Luminosidad o brillo celeste de Perez.	[-]
δ	Declinación.	[º]
δ'_s	Declinación aparente del Sol.	[rad]
δ_s	Declinación del Sol.	[º]
η	Eficacia luminosa.	[-]
γ	Ángulo acimutal o acimut.	[º]
γ'	Ángulo acimutal medido sobre una superficie no horizontal.	[rad]
γ_p	Ángulo acimutal de la superficie de estudio.	[rad]
γ_r	Ángulo acimutal de un punto del anillo de sombra.	[rad]
γ_s	Ángulo acimut de la posición del Sol.	[rad]
λ	Longitud de onda.	[nm]
λ_0	Longitud de referencia horaria (huso horario).	[ºE]
λ_1	Cabeceo o pitch.	[rad]
λ_2	Guiñada o yaw.	[rad]
λ_3	Alabeo o roll.	[-]
λ_g	Longitud geográfica.	[ºE]
$\mu_{1-\alpha}$	Estadístico de evaluación μ para el nivel de significación α.	[varios]
Ω	Ángulo sólido de propagación del flujo radiante.	[sr]

ω	Ángulo horario.	[º]
ω_s	Ángulo horario solar.	[º]
ω_{sd}	Ángulo horario de la semi-duración del día.	[rad]
ϕ	Flujo radiante.	[W]
ϕ'_g	Latitud geográfica equivalente.	[ºN]
ϕ_g	Latitud geográfica.	[ºN]
ϕ_v	Flujo luminoso.	[cd·sr=lm]
Π_0	Plano horizontal.	[-]
Π_p	Plano del sensor/piranómetro.	[-]
Π_r	Plano del anillo de sombra.	[-]
ψ	Ratio entre el ancho y el radio del anillo de sombra.	[-]
ρ	Reflectancia aparente de una superficie.	[-]
ρ_b	Reflectancia por irradiancia directa.	[-]
ρ_d	Reflectancia por irradiancia difusa.	[-]
ρ_n	Reflectancia isótropa por irradiancia directa normal a una superficie.	[-]
σ_{XY}	Covarianza de las variables X e Y.	[-]
θ	Ángulo cenital o cenit.	[º]
θ'	Ángulo cenital relativo a la perpendicular de un plano no horizontal.	[rad]
θ'_{zr}	Ángulo de inclinación real del anillo de sombra.	[rad]
θ'_{zs}	Ángulo cenital de una superficie reflectante.	[rad]
θ_{rp}	Ángulo de incidencia de la irradiancia reflejada y la superficie de estudio.	[rad]
θ_{sp}	Ángulo de incidencia de la radiación solar sobre una superficie.	[rad]
θ_{zp}	Ángulo cenital de la superficie de estudio.	[rad]
θ_{zr}	Ángulo de inclinación del anillo de sombra.	[rad]
θ_{zs}	Ángulo cenital del Sol.	[º]
ε	Índice de claridad de Perez.	[-]
ε_0	Excentricidad de la órbita terrestre.	[-]

ϱ	Densidad.	[kg·m^{-3}]
ξ	Ángulo mínimo entre dos puntos de la bóveda celeste.	[rad]
ξ_c	Ancho de la región circunsolar.	[rad]
ξ_s	Ángulo entre la posición del Sol y un punto cualquiera de la bóveda celeste.	[rad]
ξ_p	Ángulo entre un punto de la bóveda celeste y la normal a una superficie.	[rad]

Caracteres latinos

ΔH_{λ_g}	Corrección por longitud geográfica.	[h]
ΔH_{adel}	Corrección por adelanto horario.	[h]
ΔH_{et}	Corrección por ecuación de tiempo.	[h]
$\hat{y}$	Valor estimado por un modelo.	[varios]
$\mathcal{A}$	Conjunto borroso.	[-]
$\overline{X}_i$	Valor medio de la variable X_i.	[varios]
a	Resultado o respuesta de una neurona.	[-]
a'_y	Distancia a_y real construida.	[m]
a'_z	Distancia a_z real construida.	[m]
A_i	Índice i-ésimo de anisotropía de Reindl.	[-]
A_S	Coeficiente de anisotropía de Steven.	[-]
a_y	Distancia en el eje y entre el piranómetro y la referencia de posición.	[m]
a_z	Distancia en el eje z entre el piranómetro y la referencia de posición.	[m]
B	Irradiancia directa.	[W·m^{-2}]
b	Sesgo de una neurona.	[-]
b_1	Índice de distribución para el cuadrante donde está el Sol.	[-]
b_2	Índice de distribución para el cuadrante opuesto al Sol.	[-]
b_i	Índice de distribución de radiancia.	[-]
B_{ext}	Irradiancia solar extra-atmosférica.	[W·m^{-2}]
B_{sc}	Constante solar.	[W·m^{-2}]
C	Coeficiente empírico del modelo ASHRAE.	[-]

c_i	Coeficiente de sensibilidad de la variable X_i.	[-]
C_N	Número de claridad modelo ASHRAE.	[-]
Ces	Fracción de nubosidad estándar.	[-]
Cle	Índice de no nubosidad.	[-]
D	Irradiancia difusa.	[W·m^{-2}]
d	Índice de acuerdo o distancia de Willmott.	[-]
D_c	Medida de irradiancia difusa corregida.	[W·m^{-2}]
D_v	Luminancia.	[cd·m^{-2}]
d_v	Iluminancia.	[lx]
D_a	Irradiancia difusa sobre el anillo de sombra.	[W·m^{-2}]
D_{ref}	Irradiancia difusa de referencia.	[W·m^{-2}]
D_{uc}	Medida de irradiancia difusa sin corregir.	[W·m^{-2}]
E	Radiación.	[J]
e	Irradiación.	[J·m^{-2}]
e_a	Espesor de la banda del anillo de sombra.	[m]
e_x	Distancia entre piranómetros en el eje x.	[m]
e_y	Distancia entre piranómetros en el eje y.	[m]
e_z	Distancia entre piranómetros en el eje z.	[m]
F	Función de claridad del cielo.	[-]
F_1	Función de modulación de la irradiancia circunsolar de Perez et al.	[-]
F_2	Función de modulación de la irradiancia de horizonte de Perez et al.	[-]
f_b	Factor de sombreado de irradiancia directa.	[-]
f_c	Factor de corrección total.	[-]
F_D	Función de modulación de Díez-Mediavilla.	[-]
F_H	Función de modulación de Hay.	[-]
F_K	Función de modulación de Klucher.	[-]
F_M	Función de modulación de Muneer.	[-]

F_R	Función de modulación de Reindl.	[-]
F_S	Función de modulación de Skartveit & Olseth.	[-]
F_W	Función de modulación de Willmott.	[-]
f_{ab}	Coeficiente de anisotropía de la reflectancia hacia atrás.	[-]
f_{af}	Coeficiente de anisotropía de la reflectancia hacia delante.	[-]
f_{cg}	Factor de corrección geométrico o isótropo.	[-]
fe	Fondo de escala.	[varios]
G	Irradiancia global.	[W·m^{-2}]
g	Factor de asimetría de la función de fase de la dispersión atmosférica.	[-]
g'_a	Juego del anillo de posición.	[m]
G_{st}	Irradiancia global estándar.	[W·m^{-2}]
h'_s	Altura solar corregida.	[º]
H_0	Hipótesis nula.	[-]
H_1	Hipótesis alternativa.	[-]
H_c	Hora civil o legal.	[h]
h_s	Altura solar.	[º]
h_z	Altura sobre el nivel del mar.	[m]
I	Radiancia.	[W·m^{-2}·sr^{-1}]
i_r	Función gradiente de radiancia.	[-]
i_{gr}	Función gradiente de radiancia reflejada.	[-]
I_{gz}	Radiancia nadital.	[W·m^{-2}·sr^{-1}]
I_g	Radiancia reflejada.	[W·m^{-2}·sr^{-1}]
I_{sky}	Radiancia procedente de la bóveda celeste.	[W·m^{-2}·sr^{-1}]
I_{z0}	Radiancia cenital isótropa.	[W·m^{-2}·sr^{-1}]
I_z	Radiancia cenital.	[W·m^{-2}·sr^{-1}]
j	Número de parámetros del modelo.	[-]
k'_t	Índice de cielo despejado de Perez et al.	[-]

k_c	Coeficiente de cobertura.	[-]
L	Estadístico de evaluación para la agregación de clasificaciones.	[-]
l'_a	Posición corregida del anillo de sombra.	[m]
$l'^{max}_{a,i}$	Longitud máxima hábil para la posición i-ésima del anillo de sombra.	[m]
$l'^{min}_{a,i}$	Longitud mínima hábil para la posición i-ésima del anillo de sombra.	[m]
l_a	Posición teórica del anillo de sombra.	[m]
L_z	Luminancia cenital.	[cd·m^{-2}sr^{-1}]
m	Masa óptica relativa de aire.	[-]
m_a	Masa de aire.	[kg]
m_G	Masa óptica relativa de aire definida por Gueymard.	[-]
m_K	Masa óptica relativa de aire definida por Kasten.	[-]
N	Día del año $[1, 365]$.	[-]
n	Tamaño de la muestra.	[-]
$N^s_{1,i}$	Primer día seguro para el cambio a la posición i-ésima del anillo.	[m]
$N^s_{2,i}$	Último día seguro para el cambio a la posición i-ésima del anillo.	[m]
N_G	Coeficiente de opacidad nubosa del Modelo de Gueymard.	[-]
n_h	Huso horario.	[h]
o_i	Offset o desviación respecto a 0 de la varianza de X_i.	[varios]
o_{cal}	Offset de calibración.	[varios]
p	Parámetro de entrada en una neurona.	[-]
p_0	Presión barométrica de referencia.	[mbar]
p_z	Presión barométrica.	[mbar]
R	Irradiancia reflejada.	[W·m^{-2}]
r	Distancia real Sol-Tierra.	[m]
R'_a	Radio efectivo del anillo de sombra.	[m]
R^2	Coeficiente de determinación.	[-]
r_0	Distancia promedio Sol-Tierra.	[m]

R_a	Radio del anillo de sombra.	[m]
R_b	Ratio de irradiancia directa respecto a la horizontal.	[-]
R_d	Ratio de irradiancia difusa respecto a la horizontal.	[-]
R_m	Regla semántica.	[-]
r_n	Residuo estandarizado.	[-]
r_o	Residuo ordinario.	[varios]
R_p	Radio del piranómetro.	[m]
R_r	Ratio de irradiancia reflejada respecto a la horizontal.	[-]
R_s	Regla sintáctica.	[-]
r_t	Residuo studentizado.	[-]
$R_{a,int}$	Radio interior del anillo de sombra.	[m]
R_{d0}	Ratio de irradiancia difusa para cielos despejados.	[-]
R_{d1}	Ratio de irradiancia difusa para cielos totalmente cubiertos.	[-]
R_{dT}	Función empírica de radiancia difusa de fondo de Threlkeld.	[W·m^{-2}]
R_{ga}	Irradiancia reflejada sobre el anillo de sombra.	[W·m^{-2}]
S	Fracción de irradiancia difusa isótropa bloqueada por un anillo de sombra.	[-]
s	Desviación estándar de la muestra.	[varios]
$s'_{a,i}$	Solape de la posición $i-1$ a la posición i del anillo.	[m]
$s'^{s}_{a,i}$	Solape seguro de la posición $i-1$ a la posición i del anillo.	[m]
s_c	Proporción de irradiancia circunsolar del modelo de Steven & Unsworth.	[-]
s_i	Varianza de la variable X_i.	[varios]
s_L	Desviación estándar del estadístico de evaluación L.	[-]
s_r	Desviación típica residual.	[varios]
s_t	Longitud geométrica de una trayectoria.	[m]
s_U	Longitud del ala del perfil en U.	[m]
Si	Índice de cielo del modelo de Igawa.	[-]
T	Conjunto de términos lingüísticos.	[-]

t	Estadístico de evaluación t.	[-]
t_d	Duración del día.	[h]
T_M	Función de distribución de irradiancia de Muneer.	[-]
u_A	Incertidumbre tipo A.	[varios]
u_B	Incertidumbre tipo B.	[varios]
u_C	Incertidumbre combinada.	[varios]
u_i	Incertidumbre de la variable X_i.	[varios]
$U_{1-\alpha}$	Incertidumbre expandida.	[varios]
$u_{std,i}$	Incertidumbre estándar de la variable X_i.	[varios]
V	Ángulo transversal del ancho del anillo de sombra observado por el sensor.	[rad]
V_I	Ángulo transversal de un anillo de sombra de sección en I.	[rad]
V_U	Ángulo transversal de un anillo de sombra de sección en U.	[rad]
W'_a	Ancho virtual de un anillo de sombra de perfil en U.	[m]
W_a	Ancho de la banda del anillo de sombra.	[m]
X	Universo.	[-]
y	Valor observado o medido.	[varios]
z	Variable tipificada según una distribución normal $N(0,1)$.	[-]
MBD	Diferencia de sesgo promedio.	[varios]
RMSD	Raíz de la diferencia cuadrática promedio.	[varios]
RMSD_c	Raíz de las diferencias centradas cuadráticas medias.	[varios]
TSV	Tiempo Solar Verdadero u hora solar.	[h]

Introducción

Preámbulo

El objetivo fundamental del desarrollo científico y tecnológico es incrementar el bienestar y el confort de los seres humanos. Además, debe realizarse de forma segura, eficiente y sostenible así como en armonía con el resto de ecosistemas de nuestro planeta. Es nuestro deber garantizar las condiciones de vida adecuadas a nuestros descendientes. En este contexto, es innegable que nuestro nivel de desarrollo y calidad de vida está estrechamente relacionado con la forma en la que explotamos los recursos energéticos.

La energía solar es uno de los principales recursos energéticos identificados por expertos internacionales para poder mantener la actividad humana sobre la Tierra en el futuro. Efectivamente a día de hoy, la energía solar se ha revelado como una seria alternativa a los recursos energéticos fósiles y una forma efectiva para reducir las emisiones contaminantes. En este sentido, gobiernos del mundo entero han establecido leyes, regulaciones, líneas maestras y estrategias de apoyo a esta forma de energía que se han traducido en un rápido desarrollo del mercado de las Energías Renovables. En particular, el Gobierno español también ha trabajado en esta línea con la entrada en vigor del Código Técnico de Edificación (CTE) [Gov. Esp., 2006], que es el primer documento legislativo que obliga a la utilización de la tecnología fotovoltaica en cierto tipo de edificios (documento HE5). Nótese que el CTE transpone parcialmente la Directiva 2002/91/CE [EU Commission, 2002], relativa a la eficiencia energética de los edificios, en lo que se refiere a los requisitos mínimos que deben cumplir.

Actualmente, nuestro país posee más de 4 650 MW conectados a red en casi 60 700 instalaciones (datos de la Dirección de Energía Eléctrica CNMC de abril de 2014). Además, es líder mundial en penetración solar por habitante (75.19 W/hab.) y en cobertura de la demanda de electricidad con esta tecnología, con el 4.5 % en 2013 [UNEF, 2014]. Ya notablemente distribuida y socializada, la generación fotovoltaica ha dejado de ser marginal y será básica en muy poco tiempo. El mercado fotovoltaico español alcanzó en 2008 un

valor superior a los 16 000 millones de euros, con más de 40 empresas identificadas dedicadas a la fabricación de componentes, gran número de empresas instaladoras y más de 15 000 puestos de trabajo fijos directos y otros 25 000 eventuales en el pico de actividad [UNEF, 2014]. Destaca que más del 60 % de la capacidad instalada en la actualidad se generó en el año 2008, por las favorables condiciones del RD 661/2007 [Gov. Esp., 2007] y el RD 1578/2008 [Gov. Esp., 2008].

No obstante, el perfil de generación fotovoltaico ha cambiado drásticamente en los últimos años. La regulación que ha alterado la capacidad instalada respecto al interés inicial es el RD 1/2012 [Gov. Esp., 2012] que cierra el procedimiento de pre-asignación de retribución y suprime los incentivos económicos de nuevas instalaciones de generación de energía por medio de fuentes renovables. Este hecho provocó que la industria transformara sus objetivos de construcción de grandes plantas generadoras y se centrase en aplicaciones más sostenibles e integradas en los puntos de consumo. La meta ya no es generar tanto como sea posible en busca de la mayor retribución, sino satisfacer la mayor parte posible de la demanda interna. En la actualidad, las distintas Administraciones se encuentran preparando la normativa correspondiente para regular esta actividad [Gov. Esp., 2015], no sin cierta controversia por parte de los agentes implicados. No obstante, sin lugar a dudas, ésta es la perspectiva de futuro para el desarrollo de esta tecnología, pues una parte significativa de la energía se consume en núcleos urbanos. El desarrollo de métodos de integración de elementos solares fotovoltaicos y/o térmicos en ellos es de gran interés.

Para optimizar la gestión de la energía de un edificio, es necesario minimizar la carga demandada, garantizando el confort térmico y lumínico. Por otro lado, se debe cubrir la demanda residual utilizando fuentes energéticas eficientes y locales [EU Commission, 2010]. Un diseño adecuado para un edificio debería incluir un cuidadoso análisis de las fachadas del mismo. Diversos autores han estudiado la relación entre el diseño de éstas y su rendimiento [Bodart and De Herde, 2002, Stegou et al., 2007, Iqbal and Al-Homoud, 2007].

Además, políticas de generación distribuida, balance neto o construcción de edificios de consumo casi nulo de energía se ven apoyadas por la tecnología solar. El concepto de *"Edificios de Energía casi Nula"* (EECNs) o *"Nearly Zero Energy Buildings"* (nZEB) está siendo potenciado por las últimas políticas europeas en materia de energía, como la mencionada Directiva 2002/91/CE [EU Commission, 2002], refundida en la Directiva 2010/31/EU [EU Commission, 2010]. Como ejemplo, ésta exige que a partir de 2019 todos los edificios de nueva construcción ocupados y propiedad de entidades públicas sean EECNs, y para finales de 2020 todos los edificios de nueva construcción deberán ser de este tipo. Esta corriente arquitectónica permite que los edificios sean prácticamente independientes de la red eléctrica gracias a la integración de fuentes de energía renovable en el diseño, destacando particularmente los *"Sistemas Fotovoltaicos Integrados en la Edificación"* o en inglés, *"Building Integrated Photovoltaic systems"* (BIPVs) [Henemann, 2008].

La integración de generadores fotovoltaicos en la envolvente de los edificios ofrece un potencial inmenso. En Alemania, por ejemplo, la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios permitiría cubrir hasta el 50 % de la demanda eléctrica [Schuetze, 2013]. Otros estudios indican que el ahorro de energía podría situarse entre un 30 % y un 50 % [Strzalka et al., 2012]. En cualquier caso, su desarrollo parece imparable en los próximos años, tal y como muestran las figuras 1 y 2.

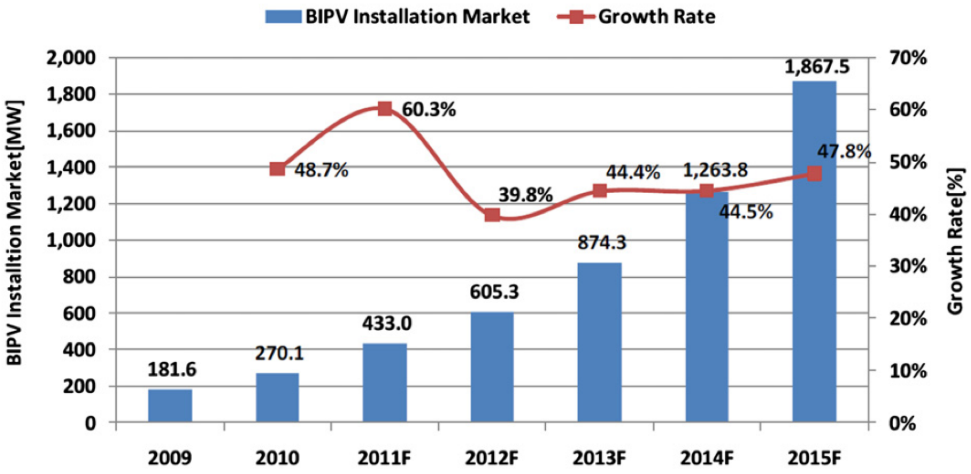


Figura 1: Sistemas BIPV instalados en el mundo. Fuente: [Azadian and Radzi, 2013].

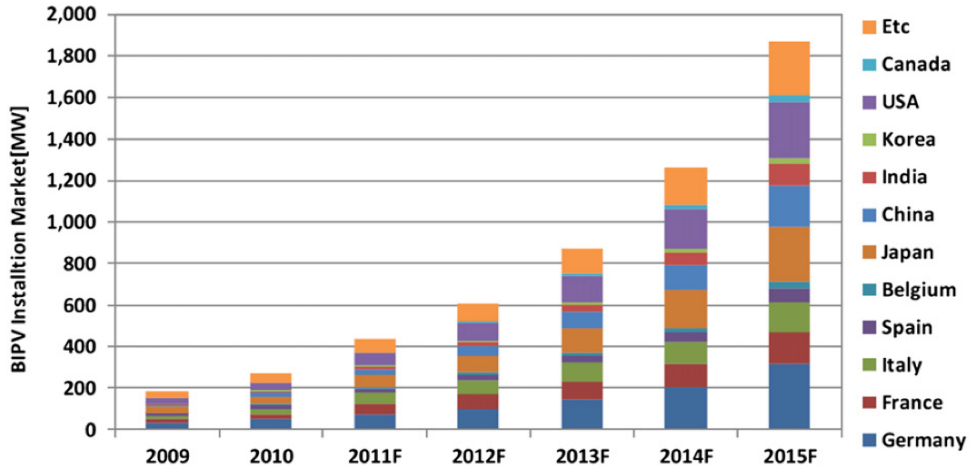


Figura 2: Evolución de los sistemas BIPV por países. Fuente: [Azadian and Radzi, 2013].

El cálculo preciso de la energía generada es un problema complejo, no sólo por su propia naturaleza, ya que la irradiancia solar y la temperatura ambiente son funciones del tiempo cuya descripción matemática dista de ser sencilla, sino también por la dificultad inherente a la adquisición de algunos datos necesarios. El problema reside en que la mayor parte de las estaciones de medida de variables radiativas únicamente recogen datos

de irradiancia global sobre superficie horizontal, siendo muy escasas aquellas que miden irradiancia difusa o directa o que realicen la medida sobre superficies inclinadas o verticales. La gran mayoría de las instalaciones solares se diseñan y dimensionan utilizando estas bases de datos, originándose discrepancias que en ocasiones pueden ser importantes [Sen, 2004, Marszal et al., 2011]. En cualquier caso, es necesario un tratamiento adecuado de los datos que permita:

- La traslación de las medidas a la localización de la aplicación.
- La estimación de la distribución espacial de las componentes de la irradiancia global a partir de los datos existentes.
- La extensión en el tiempo y predicción a futuro del potencial solar.

Destaca que la eficiencia de los módulos fotovoltaicos, considerada generalmente constante con la irradiancia incidente, es en la mayor parte de los casos, decreciente con ésta, dependiendo del perfil concreto de irradiancia-eficiencia y de la tecnología del módulo. La importancia de este hecho en un generador fotovoltaico está relacionada con las características de radiación de su emplazamiento, pudiendo ser mayor en lugares con baja irradiancia, en los cuales además se puede presentar una elevada proporción de irradiancia difusa. En latitudes altas una cantidad significativa de la producción eléctrica anual se consigue a niveles muy bajos de irradiancia.

La metodología habitual de trabajo para el diseño y dimensionamiento de instalaciones solares comienza con el estudio del potencial solar en la localización concreta, mediante medidas in situ si se dispone de ellas, o más corrientemente mediante bases de datos de irradiancia. Después se incluyen en el estudio las características de la ubicación, como la orientación e inclinación de las áreas libres de sombras y otros aspectos relativos a la aplicación concreta [Sen, 2004]. Se puede decir que la optimización del diseño de un sistema fotovoltaico está determinada por una compleja combinación de aspectos medioambientales, económicos y técnicos.

En un entorno urbano, la irradiancia solar sobre una determinada superficie depende del tiempo, la localización y de las sombras proyectadas por otros edificios, vegetaciones frondosas u otras infraestructuras. En estas condiciones, la estimación habitual del recurso solar contemplando únicamente la radiación global es insuficiente. Es necesario evaluar independientemente cada componente de la irradiancia [Chwieduk, 2009, Prada et al., 2015]. La figura 3 muestra el algoritmo de cálculo que permite estimar el potencial de generación de las fachadas de un edificio. Normalmente, el potencial solar es evaluado primeramente mediante un software de cálculo numérico y los resultados obtenidos son exportados a plataformas GIS [Freitas et al., 2015].

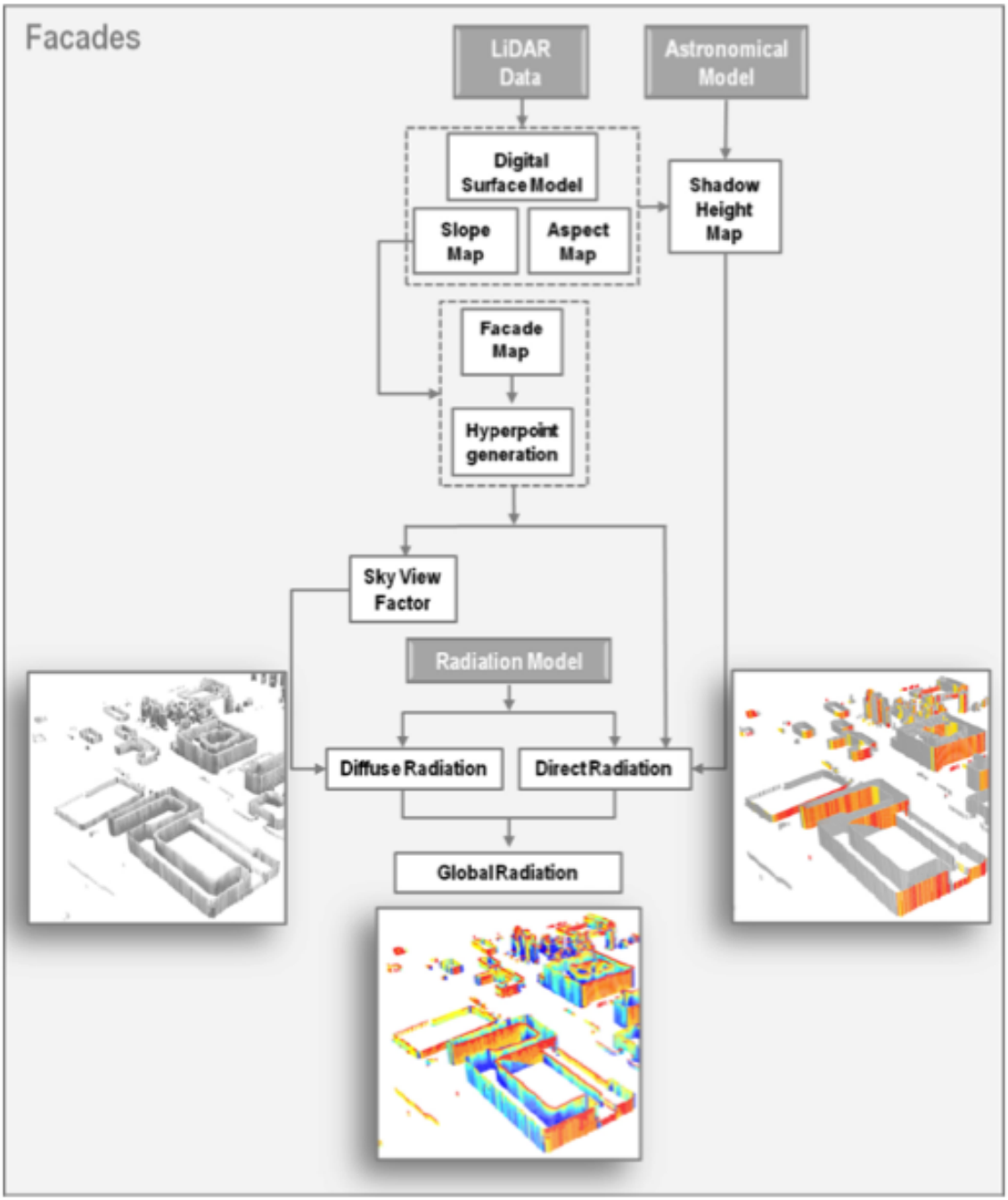


Figura 3: Diagrama de cálculo del potencial solar en entornos urbanos. Adaptado de [Redweik et al., 2013].

Motivación

Esta Tesis surge de la necesidad de profundizar en el conocimiento de la irradiancia solar y la influencia de sus distintas componentes en las prestaciones de instalaciones energéticas solares. Con ello se pretenden mejorar los criterios de diseño y dimensionamiento de estas plantas, tanto las ya existentes como futuras, incrementando su rendimiento y por tanto su rentabilidad. Éste es uno de los aspectos críticos dentro de las actuales líneas de investigación centradas en las Energías Renovables.

La medida y estimación del recurso solar sobre diferentes superficies son los aspectos clave sobre los que se desea incidir en este trabajo. En la integración de sistemas basados en el aprovechamiento de la energía solar en edificios resulta fundamental el estudio de la irradiancia sobre superficies con diversas orientaciones, dependientes de la geometría de las estructuras soporte, no siempre correspondientes con la óptima para a un horizonte libre de obstáculos. Esto implica que las estimaciones actuales contemplando únicamente la irradiancia global son insuficientes, y se precisa un análisis detallado de la distribución espacial de la radiancia.

Antecedentes

La presente Tesis Doctoral se enmarca dentro de la línea de investigación iniciada por la Dra. Dña. Montserrat Díez Mediavilla con su Tesis Doctoral titulada *"Medida y modelización de la radiación solar difusa sobre superficie inclinada"* presentada en la Universidad de Valladolid en julio de 2001 [Díez-Mediavilla, 2001], y continuada por el grupo de investigación **Solar and Wind Feasibility Technologies (SWIFT)** de la Universidad de Burgos. La línea de investigación pretende mejorar el diseño y rendimiento de sistemas basados en tecnologías solares, tanto fotovoltaica, térmica o híbrida, considerando que la modelización de la radiación solar en todas sus componentes y en superficies con distintas orientaciones e inclinaciones es fundamental para la consecución de dicho objetivo.

Por otro lado, estudios previos realizados por el autor en el campo del seguimiento solar [de Simón-Martín et al., 2014b, de Simón-Martín et al., 2014a] han mostrado el impacto significativo que posee la modelización de la irradiancia en múltiples direcciones. Así, por ejemplo, la optimización en el control de seguidores solares instalados en edificaciones, como [de Simón-Martín et al., 2010a, de Simón-Martín et al., 2010b], precisan de un adecuado estudio de la distribución espacial de la radiancia para un rendimiento óptimo.

Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis es **caracterizar la irradiancia solar difusa y reflejada sobre superficies distintas de la horizontal**, mediante el análisis de su medida y modelización. Este objetivo general se puede concretar en los siguientes objetivos particulares:

1. Analizar el Estado del Arte de los distintos modelos para estimar la irradiancia solar difusa y reflejada sobre planos inclinados con cualquier orientación.
2. Medir la irradiancia difusa en planos inclinados, especialmente los planos verticales según las direcciones cardinales.
3. Analizar la influencia de tipos de cielo en los modelos de transposición.
4. Evaluar los modelos de transposición más relevantes en diferentes orientaciones.
5. Clasificar los modelos en función de su ajuste a las observaciones realizadas.

Herramientas y métodos

En este trabajo de investigación se han aplicado las metodologías de investigación básica, investigación experimental e investigación tecnológica. El proceso de investigación seguido ha sido de tipo descriptivo y se ha aplicado el método empírico-analítico, en su variante del método de la medición [Salkind and Escalona, 1999]. Se trata de un trabajo multidisciplinar que incluye actividades de diseño industrial, análisis de datos y computación científica. Para ello se han empleado las siguientes herramientas de software para la programación de algoritmos, procesado y gestión de datos y la elaboración de planos y esquemas de diseño.

MATLAB

El software y lenguaje de programación de alto nivel MATLAB es el acrónimo de MATrix LABoratory y ha sido desarrollado por la compañía MathWorks desde 1984. Se basa en los lenguajes C y JAVA. Es un software de cálculo numérico que además posee un entorno muy amigable con el usuario y está ampliamente extendido.

MATLAB ofrece una gran variedad de funciones y algoritmos que, a modo de librerías, realizan las operaciones más comunes demandadas por los usuarios, así como de aplicaciones más complejas, también denominadas *"Toolboxes"* que permiten la resolución de problemas comunes en distintas áreas. La versión utilizada ha sido la R2013a.

PhpMyAdmin

PhpMyAdmin es un software gratuito escrito en lenguaje php que permite la administración de bases de datos desarrolladas en el lenguaje de programación MySQL a través de una interfaz web. Una de las principales ventajas de utilizar este software y el lenguaje de programación MySQL es que permiten la comunicación y consulta de datos desde MATLAB de forma sencilla y eficaz.

CATIA

CATIA es una herramienta CAD 3D que permite no sólamente modelizar cualquier producto, sino también simularlo en el contexto de su comportamiento en la vida real, lo que se denomina *"diseño en la era de la experiencia"*. CATIA se basa en la plataforma 3D-EXPERIENCE de Dassault Systèmes y permite desarrollar multitud de aplicaciones de diseño, ingeniería e ingeniería de sistemas. La versión utilizada ha sido CATIA V5R16.

Estructura de la Tesis

El documento presentado como Memoria de la Tesis se estructura en tres partes o bloques de contenidos:

- Parte I: Marco teórico.
- Parte II: Medida de la irradiancia.
- Parte III: Estudios realizados.

En la primera parte, se realiza una introducción teórica de los contenidos objeto de estudio, así como una referencia a aquellos trabajos que consituyen el Estado del Arte actual. Destaca en primer lugar, la revisión realizada de los modelos de transposición de irradiancia difusa y reflejada. A continuación se expone el desarrollo de las expresiones teóricas de los factores de corrección geométrico y totales para medidas de irradiancia difusa tomadas mediante dispositivos con anillo de sombra. Aquí los modelos clásicos para sensores horizontales o inclinados en la dirección ecuatorial son generalizados para cualquier ángulo de orientación o inclinación. Finalmente, se describen los índices de claridad más utilizados para cuantificar el estado de cobertura de los cielos, así como el Estándar CIE 2004 para clasificarlos. La **parte I** se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Modelización de la irradiancia difusa y reflejada sobre el plano.

Capítulo 2: Corrección de las medidas de irradiancia difusa.

Capítulo 3: Índices de claridad y clasificación de los tipos de cielo.

La segunda parte de la Tesis se centra en la medida de la irradiancia difusa y reflejada sobre superficies inclinadas y orientadas. La primera parte realiza una descripción de la campaña de medidas realizada, la estación radiométrica utilizada y la base de datos construida. Destaca en esta parte el cálculo pormenorizado de las incertidumbres de medida de la irradiancia solar realizado. A continuación, se expone la medida y modelización de la irradiancia de albedo en la estación radiométrica, ubicada en Burgos (42.351°N, −3.688°E). Su evaluación permitirá estimar la irradiancia reflejada en los modelos de transposición. Finalmente, se describe en detalle el prototipo MK6 para la medida de irradiancia difusa en múltiples planos inclinados y orientados, incluyendo la determinación del factor de corrección total óptimo del equipo. La **parte II** se compone de los capítulos:

Capítulo 4: Campaña de medida y gestión de los datos.

Capítulo 5: Medida y modelización del albedo.

Capítulo 6: Prototipo MK6 para la medida de irradiancia multidireccional.

Capítulo 7: Factor de corrección óptimo para el equipo MK6.

Finalmente, la Tesis concluye con una tercera parte que recoge los resultados de los estudios realizados así como las conclusiones, aportes y líneas futuras de investigación abiertas. El primer estudio consiste en la identificación y clasificación de los tipos de cielo durante el periodo de estudio (desde septiembre de 2014 hasta abril de 2015) en Burgos según el Estándar CIE 2004. Esta identificación se lleva a cabo mediante dos métodos, aplicados a las medidas obtenidas por el dispositivo MK6. A continuación se analizan las distribuciones de 9 índices de claridad comúnmente utilizados según la clasificación de cielos Estándar realizada. El segundo estudio incluye el análisis por orientaciones y tipos de cielo de 29 modelos de transposición (descritos en el marco teórico). Dicho análisis se lleva a cabo de forma cualitativa mediante Diagramas de Taylor y Diagramas de Ineichen. Estos últimos se han modificado ligeramente para incorporar más información sobre la distribución de los residuos, y la comparación de un número elevado de modelos. El análisis también se lleva a cabo de forma cuantitativa mediante la evaluación de diferentes parámetros estadísticos, entre los que destaca un nuevo índice propuesto por el autor. La **parte III** incluye tres capítulos:

Capítulo 8: Identificación y caracterización de los tipos de cielo en Burgos.

Capítulo 9: Estudio analítico de los modelos de transposición.

Capítulo 10: Conclusiones y aportes.

Además, se adjuntan los siguientes cuatro anexos que entran en detalle en ciertos aspectos particulares del núcleo de la Tesis expuesta:

Anexo A: Definiciones y fundamentos.

Anexo B: Medida de la irradiancia difusa.

Anexo C: Implementación de los modelos de transposición.

Anexo D: Técnicas estadísticas.

Por último, al final se incluyen las referencias citadas y un resumen en inglés o *"Summary"* con la introducción de esta Tesis, un resumen detallado de cada uno de los capítulos y resultados obtenidos y la exposición de las conclusiones generales, aportes realizados y líneas de trabajo a futuro.

Rendimiento científico

Esta sección está dedicada a enmarcar el entorno científico en el que se ha desarrollado la Tesis y a destacar los resultados preliminares de la investigación realizada. No obstante, no todos los resultados obtenidos han sido todavía publicados, pues algunos se encuentran aún en periodo de revisión y evaluación. En el momento de la impresión y depósito de este documento, la producción científica más relevante derivada de esta Tesis es:

Publicaciones en revistas científicas

2015 de Simón-Martín, M., Alonso-Tristán, C., González-Peña, D. and Díez-Mediavilla, M., *"New device for the simultaneous measurement of diffuse solar irradiance on several azimuth and tilting angles,"* Solar Energy, Elsevier. 2015. Vol. 119, pp. 370-382. DOI: 10.1016/j.solener.2015.06.001. (Impact Factor 2014: 3.496, Quartile: 1).

Patentes y Licencias de Software

2015 de Simón-Martín, M., *"Software de optimización y simulación de estación radiométrica multidireccional,"* España. 2015. En proceso de solicitud.

2014 de Simón-Martín, M., Díez-Mediavilla, M., Alonso-Tristán, C. and González-Peña, D., *"Dispositivo de medida de radiación difusa y procedimiento de utilización del mismo,"* España. Fecha de solicitud: 08/09/2014. Ref: P201400714. *Examen Previo.*

Comunicaciones en congresos

2015 de Simón-Martín, Alonso-Tristán, C. and Díez-Mediavilla, M., *"Cálculo analítico e interpretación de la incertidumbre de la medida de irradiancia solar global, difusa y reflejada,"* II Jornada de doctorandos de la Universidad de Burgos. Burgos (Spain), December, 2015, Escuela de Doctorado. In press.

2015 de Simón-Martín, M., González-Peña, D., Alonso-Tristán, C. and Díez-Mediavilla, M., *"Diseño y puesta en marcha de una micro-red de estaciones radiométricas en Castilla y León,"* 9º Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica (9CNIT). Cartagena (Spain), June 3rd- 5th, 2015, Universidad Politécnica de Cartagena. Vol. 1, pp. 495-504. ISBN: 978-84-606-8931-7. DOI: 10.13140/RG.2.1.1226.4804.

2014 de Simón-Martín, M., Díez-Mediavilla, M. and Alonso-Tristán, C., *"Diffuse Solar Energy Measurement on Vertical Surfaces: Instrument Design,"* 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (PVSEC'14). Amsterdam (The Netherlands), September 22nd- 26th, 2014, WIP Renewable Energies. Vol. 1, pp. 3467-3471, ISBN: 3-936338-28-0, DOI: 10.4229/29thEUPVSEC2014-5DV.5.33.

2014 de Simón-Martín, M., González-Peña, D., Díez-Mediavilla, M. and Alonso-Tristán, C., *"Medida de radiación solar difusa sobre paramento vertical,"* I Jornada de doctorandos de la Universidad de Burgos. Burgos (Spain), December 17th, 2014, Escuela de Doctorado. Vol. 1, pp. 111-116, ISBN: 978-84-16283-05-7.

2013 de Simón-Martín, M., Díez-Mediavilla, M. and Alonso-Tristán, C., *"Modelling solar data: reasons, main methods and applications,"* International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13). Bilbao (Spain), March 20th- 22nd, 2013, European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ). ISSN: 2172-038X, ISBN: 978-84-615-6648-8. **Best Poster Award**.

Uso de la nomenclatura

Salvo que se indique expresamente lo contrario, las variables que se citan en esta Tesis se expresan indicando la magnitud y el plano de medida, según:

Magnitud(plano),

donde:

Magnitud: tipo de variable considerada, como por ejemplo: temperatura (T), irradiancia global (G), irradiancia difusa (D), etc. (véase la Nomenclatura).

Plano: de aplicación para valores de irradiancia, plano de incidencia sobre el cual se ha determinado la variable. Puede tomar una de las siguientes expresiones:

(θ_{zp}, γ_p): ángulo cenital y acimutal (valores Oeste positivos) de la superficie en [º].
(0): plano horizontal.
(n): plano perpendicular al vector solar.

Por ejemplo, al escribir $B(0)$ se lee irradiancia directa (magnitud) en el plano horizontal (plano), mientras que $G(50, 20)$ se entiende irradiancia global (magnitud) en un plano inclinado 50º respecto a la vertical y orientado 20º hacia el Oeste (plano). $D(n)$ correspondería a la medida de irradiancia difusa en un plano normal al vector solar.

Otras consideraciones

Los textos y anotaciones presentes en todas las figuras están en inglés. Además, en todo el texto y como criterio general se han aplicado las especificaciones de la norma española UNE-50 135 *"Documentación. Presentación de informes científicos y técnicos"*. Cabe remarcar en este punto que para la notación numérica, tal y como permite la norma anterior, se ha empleado el punto para separar la parte decimal de la parte entera. Los millares se han separado mediante un espacio en blanco.

Clasificación según UNESCO

De acuerdo a la Nomenclatura Internacional de la UNESCO para los campos de Ciencia y Tecnología, la presente Tesis se clasifica en las siguientes áreas y líneas:

- **2106-01:** Energía solar.
- **2501-16:** Difusión atmosférica.
- **3311-13:** Aparatos científicos.
- **3322-05:** Fuentes no convencionales de energía.

PARTE I: MARCO TEÓRICO

Revisión del estado del arte sobre modelos de transposición de irradiancia difusa, modelos de corrección de las medidas y caracterización y clasificación de los tipos de cielo.

Capítulo 1

Modelización de la irradiancia difusa y reflejada sobre el plano

1.1. Introducción

Existen multitud de modelos desarrollados para determinar el valor de la irradiancia difusa sobre el plano, fundamentalmente si éste está orientado en la dirección ecuatorial (hacia el Sur para el hemisferio Norte). Sólo algunas publicaciones, entre las que destacan [Muneer, 2004, Usher and Muneer, 1989, Klein and Theilacker, 1981, Reindl et al., 1990b, Ruiz et al., 2002, Ramírez-Faz et al., 2015, Ivanova, 2013], abordan directamente el problema de la estimación de irradiancia difusa sobre superficies inclinadas con ángulos acimutales distintos de cero. En este capítulo se ha realizado una exhaustiva revisión de los modelos existentes más extendidos. Dichos modelos se han clasificado en paramétricos y no paramétricos. Los primeros incluyen modelos isótropos y modelos anisótropos según la caracterización física de la distribución de radiancia. Estos últimos, a su vez pueden dividirse en modelos de superposición o de gradiente de radiancia. Los modelos no paramétricos no están fundamentados en teorías físicas, sino que realizan la modelización en base a extracción de información de un conjunto de datos de entrenamiento. En total, se recoge una revisión de 31 modelos de transposición de irradiancia difusa y reflejada. Además, al final se analizan los principales modelos de reflectancia de albedo utilizados comúnmente en la bibliografía.

Se ha procurado homogeneizar la nomenclatura empleada en todos los modelos para facilitar su comprensión.

1.2. Modelización de la irradiancia solar

Determinar el valor de la irradiancia solar sobre un plano cualquiera exige conocer la relación o dependencia existente entre las distintas componentes y variables. En el esquema relacional de la figura 1.1 se indican dichas relaciones, desde la constante solar y el día del año, hasta la producción fotovoltaica de un elemento generador. Este diagrama permite definir cualquier variable, situadas en los nodos, a partir de sus predecesoras. Los nexos de unión constituyen distintos tipos de modelos.

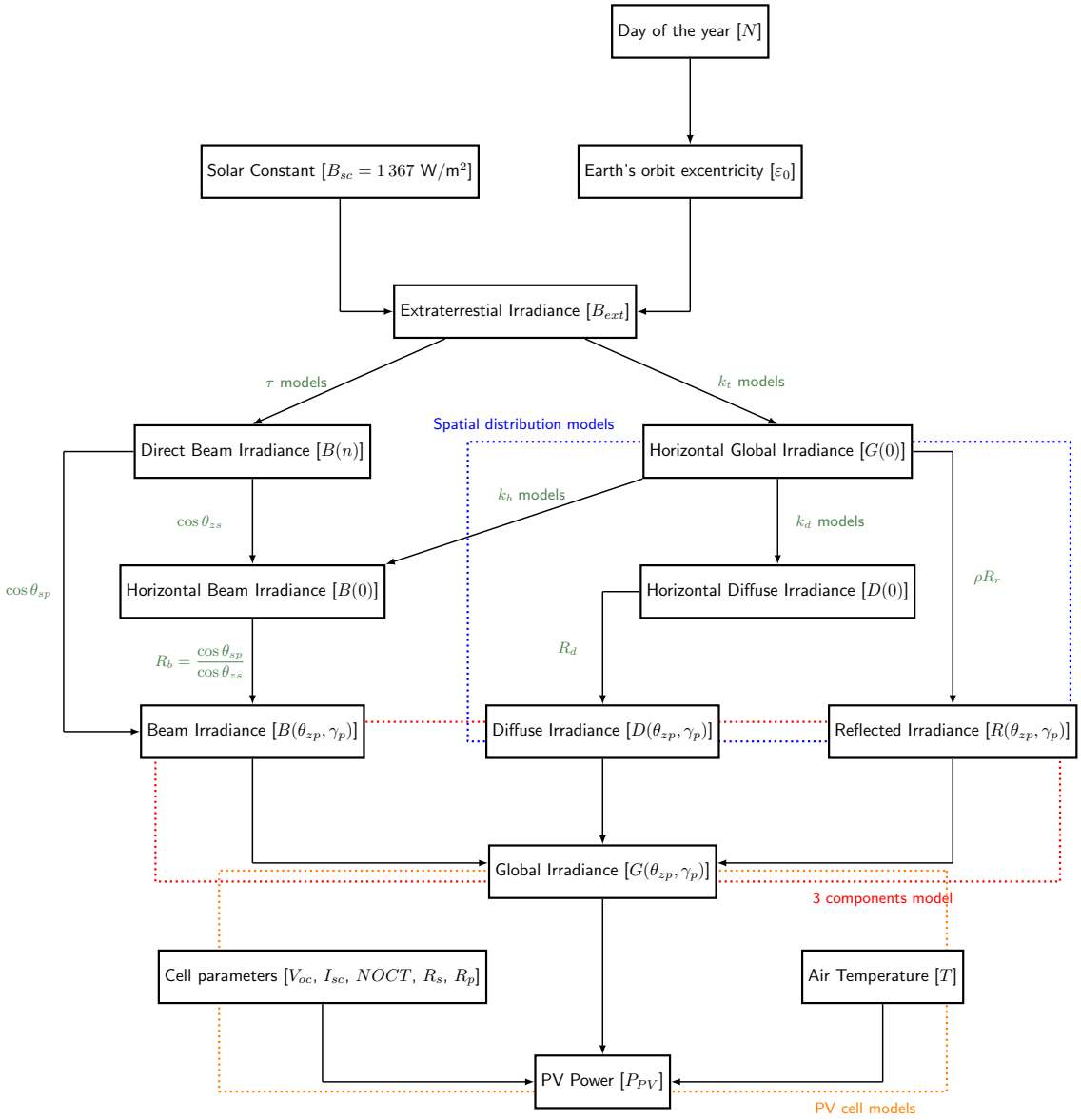


Figura 1.1: Esquema relacional de variables solares.

A partir del día del año, N, y del valor definido de la constante solar, B_{sc}, es posible calcular la irradiancia solar extraterrestre, B_{ext}, mediante el cálculo intermedio de la excentricidad de la órbita terrestre, ε_0. El valor promedio de la constante solar está definido por la Organización Meteorológica Mundial en 1 367 W·m^{-2} [WMO, 2013].

Trasladar el valor de la irradiancia incidente en las capas externas de la atmósfera al valor medido en la superficie terrestre, requiere determinar las distintas transmitancias, τ, de la atmósfera. Así la irradiancia directa normal a la dirección del Sol, $B(n) = B(\theta_{zp}, \gamma_p)$, es igual a la irradiancia extraterrestre, mitigada por el resultado de la integración de la transmitancia espectral, τ_λ, a lo largo de todas las longitudes de onda [King and Buckius, 1979, Bird, 1984, Gueymard, 1989, Gul et al., 1998, Paulescu and Schlett, 2003]. La irradiancia global sobre el plano horizontal, $G(0)$, se define a partir de la irradiancia solar extraterrestre sobre un plano paralelo al horizontal, $B_{ext}(0)$, mediante el índice de claridad k_t. Existen diversas correlaciones del índice de claridad, que se muestran con más detalle en el apartado 3.2.4. No obstante, algunos autores también han desarrollado numerosos trabajos donde se encuentran correlaciones con otras variables climáticas, como la temperatura ambiente, T [Paulescu et al., 2006, Tulcan-Paulescu and Paulescu, 2007, Maghrabi, 2009], la humedad relativa, HR [Maghrabi, 2009], o el número de horas de Sol reales respecto de las horas de Sol teóricas, S/S_0 [Hottel, 1976, Soler, 1990b, Sen, 2004, Tham et al., 2009, Bakirci, 2015] entre otros posibles estimadores [Dahlgren, 1984, Davies and McKay, 1988].

La irradiancia directa sobre el plano horizontal, $B(0)$, se calcula por definición como:

$$B(0) = B(n) \cos \theta_{zs}, \tag{1.1}$$

donde θ_{zs} se determina a partir de la declinación solar, δ_s, que es función del día del año, N, del ángulo horario, ω_s, y de la latitud geográfica del lugar de observación, ϕ_g. También puede obtenerse mediante los modelos k_b, que determinan la relación entre la irradiancia global horizontal y la irradiancia directa horizontal, normalmente como función del índice de claridad k_t. Análogamente la componente difusa horizontal de la irradiancia, $D(0)$, se puede determinar a partir de la irradiancia global horizontal mediante los modelos k_d, donde la fracción difusa también se expresa como una correlación del índice de claridad k_t [Soler, 1990a, Ridley et al., 2010, Reindl et al., 1990a, Orgill and Hollands, 1977, Nijegorodov et al., 1997, Khatib et al., 2012b]. Una representación de estos modelos se muestra en la sección 3.3. Nótese que la irradiancia reflejada o de albedo en el plano horizontal es nula, pues una superficie así definida tiene un ángulo de visión nulo por debajo del horizonte.

Para determinar la potencia eléctrica producida por un panel fotovoltaico, P_{PV}, uno de los parámetros esenciales que se precisa conocer es la irradiancia global sobre el plano del módulo, $G(\theta_{zp}, \gamma_p)$, la cual, o se mide directamente mediante un piranómetro colocado en un plano paralelo o, se modeliza mediante la composición de las componentes directa,

difusa y reflejada sobre dicho plano, dado que:

$$G(\theta_{zp}, \gamma_p) = B(\theta_{zp}, \gamma_p) + D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p). \tag{1.2}$$

La irradiancia directa proyectada sobre el plano de estudio, caracterizado por las coordenadas horizontales (θ_{zp}, γ_p) mediante el ratio de irradiancia directa, R_b, que es una relación geométrica entre el ángulo formado por la posición del Sol y la superficie de estudio, θ_{sp} y el ángulo cenital del Sol en ese instante, θ_{zp}:

$$R_b = \text{máx}\left(\frac{\cos\theta_{sp}}{\cos\theta_{zp}}, 0\right), \forall \cos\theta_{zp} > 0. \tag{1.3}$$

R_b siempre ha de verificar: $R_b \geq 0$. En caso contrario, se infiere que el Sol se encuentra por detrás de la superficie de estudio, y por lo tanto, la proyección de irradiancia directa sobre dicha superficie es nula o negativa. El ángulo θ_{sp} se puede calcular mediante la expresión (A.44).

Determinar la irradiancia difusa y reflejada sobre un plano cualquiera, $D(\theta_{zp}, \gamma_p)+R(\theta_{zp}, \gamma_p)$, es una cuestión más compleja de modelizar, y es por ello que constituye el objeto principal de la presente Tesis. Ambas componentes están relacionadas con el valor de la irradiancia global horizontal a través de los denominados *"modelos de distribución espacial de radiancia"*, *"modelos de distribución angular de radiancia"* o *"modelos de transposición"*. La principal dificultad reside en determinar la anisotropía de la atmósfera y su distribución, que depende fundamentalmente del tipo de cielo (claro, intermedio, nuboso, completamente cubierto, etc.) que exista en el instante de estudio, y para lo cual no existe un criterio estandarizado. Para más detalles véase el capítulo 3 donde este aspecto es tratado en profundidad.

La irradiancia difusa sobre un plano cualquiera y su valor en un plano horizontal se encuentran relacionadas mediante el ratio R_d, mientras que el valor de la irradiancia reflejada, respecto de la irradiancia global horizontal, define el producto del ratio R_r y la reflectancia aparente ρ. El ratio R_d se puede determinar mediante un estudio geométrico si se considera una distribución isótropa de la radiancia en la bóveda celeste. Sin embargo, si se consideran los efectos de anisotropía de la región circunsolar o de la banda del horizonte, dicha correlación puramente geométrica deja de ser válida, dando lugar a los modelos anisótropos. Por otro lado, el ratio de irradiancia reflejada R_r suele corresponderse con una relación de proporcionalidad geométrica de la porción de terreno circundante dentro del ángulo de visión de la superficie de estudio mientras que, para la reflectancia aparente ρ, existen diferentes modelos para definirla.

Finalmente, en cualquier punto es posible aplicar modelos no paramétricos, también llamados de caja negra o técnicas de *"soft-computing"*, que pueden extraer información de un

conjunto disponible de datos denominado conjunto de entrenamiento [Mohandes et al., 1998, Kumar et al., 2012, Khatib et al., 2012b, Notton et al., 2013, Yadav and Chandel, 2014a, Wadi Abbas Al-Fatlawi et al., 2015]. El funcionamiento y rendimiento de estos modelos será mejor conforme más se ciñan a las relaciones existentes entre las variables, mostradas en la figura 1.1, [Assi et al., 2012, Bao et al., 2014, Yadav et al., 2014].

1.3. Clasificación de los modelos de transposición

No se ha encontrado un criterio unificado de clasificación de modelos para la estimación de irradiancia solar difusa sobre superficies inclinadas. No obstante, la mayoría de los autores coincide en hacer una clasificación básica en:

Modelos paramétricos: estos modelos determinan la ecuación subyacente (por ejemplo, una relación lineal, polinómica, logarítmica, etc.) entre las variables de entrada o estimadores y las variables de salida o respuestas del modelo. Se denominan paramétricos pues lo que se debe ajustar son los parámetros de los que depende la formulación del propio modelo. Determinar la ecuación parametrizada requiere de un conocimiento profundo de la física involucrada en el sistema, o establecer una teoría que la explique.

Modelos no paramétricos: son aquellos que no se basan en la formulación de una teoría que explique cómo se relacionan las distintas variables objeto de estudio, sino que predicen cómo una variable afecta a una respuesta sin conocer el mecanismo físico del fenómento involucrado. Conforme aumenta el número de estimadores y/o las relaciones dejan de intuirse lineales, la modelización del problema se complica, pudiéndose llegar a dar problemas de tipo NP-hard o incluso NP-completos[1]. Es por ello, que en las últimas décadas se han desarrollado técnicas basadas en el aprendizaje automático e inteligencia artificial o *"machine-learning"*, que han facilitado en gran medida su resolución. Estas técnicas pueden agruparse en una rama de la informática científica denominada como *"soft-computing"*.

Dentro de las técnicas de soft computing, destacan por su flexibilidad, sencillez y precisión dos técnicas en particular: sistemas de inferencia basados en conjuntos y reglas borrosas o *"fuzzy"* y las redes neuronales artificiales (*"ANNs"*). Ambas técnicas se pueden combinar, dando lugar a las redes neuroborrosas. Se han implementado estos métodos siguiendo los procedimientos y descripciones expuestos en [Mohandes et al., 1998, Sen, 1998, Kumar et al., 2012, Celik and Muneer, 2013, Dahmani et al., 2014, Kaushika et al., 2014, Scott and Boland, 2014, Voyant et al., 2014, Yadav and Chandel, 2014a].

[1] Problemas que requieren un tiempo polinomial no determinista para su computación.

Dentro de los modelos paramétricos, se pueden distinguir:

- **Modelos isótropos:** son aquellos modelos que consideran una distribución isótropa u homogénea de la irradiancia solar difusa en toda la bóveda celeste. Es decir, consideran que el flujo radiante procedente de cualquier punto es constante.
- **Modelos anisótropos:** son aquellos modelos que determinan que existen variaciones en la distribución del flujo de irradiancia solar difusa en la atmósfera terrestre. Dichas variaciones se deben fundamentalmente a la anisotropía en la región circunsolar y la banda del horizonte.

  La diferencia de los modelos anisótropos, radica en la porción de bóveda celeste observada por la superficie de estudio y la proyección de la irradiancia sobre la misma. Los modelos anisótropos, a su vez pueden clasificarse en función de cómo realizan el análisis de la anisotropía de la atmósfera. Así se realiza la división entre:

  - **Modelos de superposición o anisótropos clásicos:** son modelos que pueden considerar una o las dos fuentes de anisotropía de la atmósfera. Así, superponen la irradiancia difusa isótropa de fondo y la suma ponderada de los efectos de anisotropía de la región circunsolar y de la banda del horizonte. Esta superposición también puede considerarse como la combinación de la irradiancia correspondiente a cielos cubiertos (mayormente isótropa) y cielos despejados o claros (condiciones anisótropas).
  - **Modelos de gradiente de radiancia:** estos modelos se han construido a partir de la integración del flujo de irradiancia proveniente de cada punto de la atmósfera. Dicho flujo se estima a partir de la radiancia cenital y una función de gradancia en función del ángulo cenital y, en algunos casos, una función indicatriz o de difusión que depende del ángulo acimutal formado por la posición del Sol y el elemento de la bóveda celeste considerado.

La figura 1.2 muestra un esquema de la clasificación realizada.

Otros autores como [Muneer, 2004] clasifican los modelos de la siguiente forma:

- **Modelos de primera generación:** incluye aquí a los modelos más antiguos y sencillos, generalmente isótropos.
- **Modelos de segunda generación:** dentro de esta categoría se sitúan los modelos anisótropos clásicos, que realizan una distinción entre cielos claros o anisótropos y cielos cubiertos o isótropos.
- **Modelos de tercera generación:** este grupo engloba los modelos más sofisticados. que distinguen las distintas componentes de anisotropía de la atmósfera.

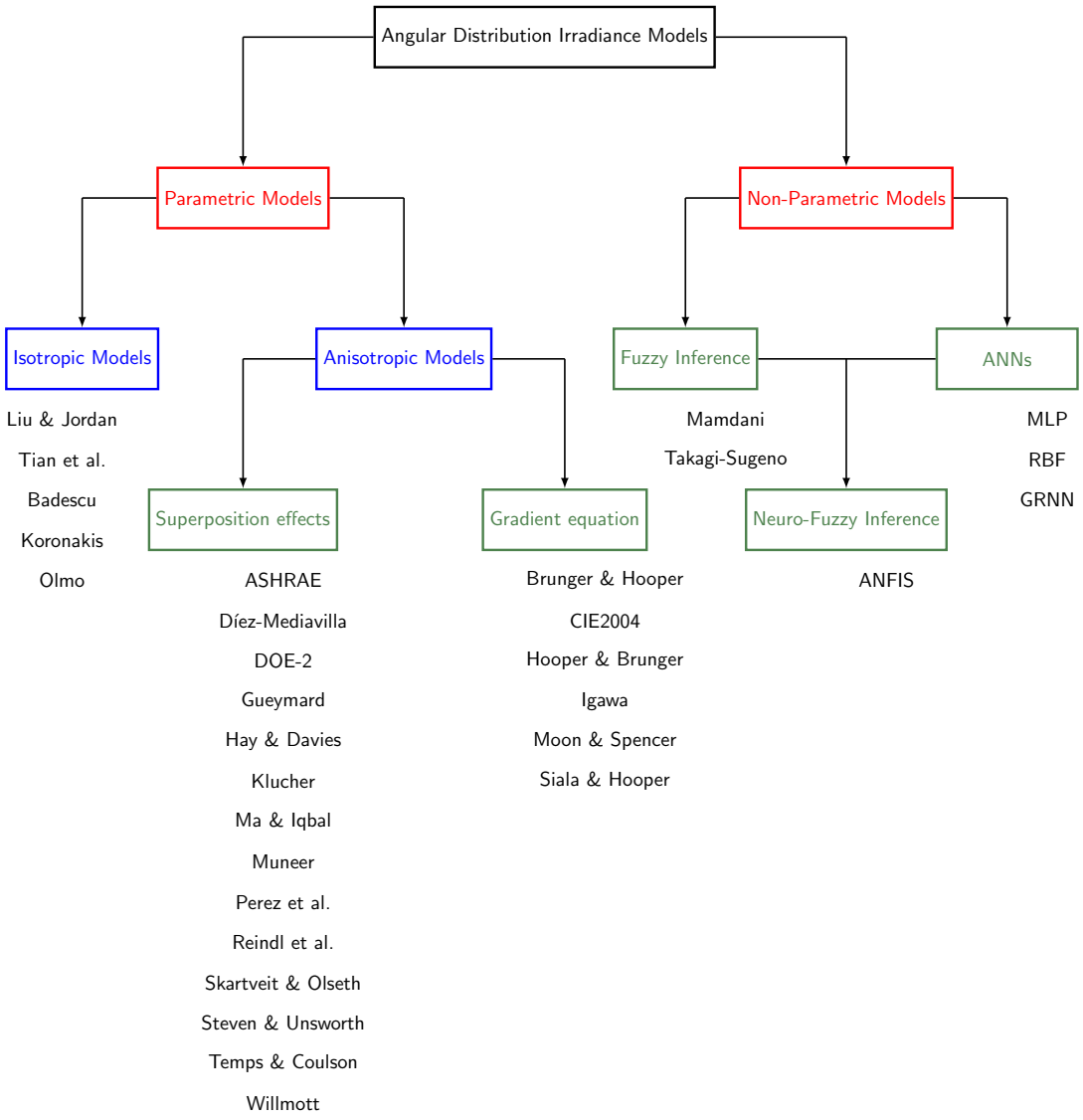


Figura 1.2: Clasificación de los modelos de transposición.

1.4. Formulación generalizada

Para la modelización de la distribución angular de la irradiancia difusa, o lo que es lo mismo, la estimación del valor de irradiancia difusa sobre una superficie cualquiera, definida por un vector director de módulo unidad y las coordenadas horizontales: ángulo acimutal (γ_p) y ángulo cenital (θ_{zp}), varios de autores han propuesto modelos expresados sin adoptar un criterio unificado. Para exponerlos de forma ordenada y clara, no sólo se ha unificado la nomenclatura de las diferentes variables, sino que también se ha tratado de homogeneizar la estructura en la formulación de los modelos. Para ello nos basamos en la definición de composición de la irradiancia global incidente sobre una superficie cualquiera, G, dada en la expresión (1.2). Las componentes de la irradiancia global se pueden expresar de forma relativa a su valor en el plano horizontal:

$$G(\gamma_p, \theta_{zp}) = R_b B(0) + R_d D(0) + R_r \rho G(0), \tag{1.4}$$

siendo ρ la reflectancia aparente de las superficies cercanas.

Así, a lo largo de este capítulo, expresaremos la definición de los distintos modelos en función del valor que asignan a los ratios R_d y R_r. Es interesante destacar que, aunque normalmente R_d y R_r suelen ser complementarios, no tienen por qué serlo.

1.5. Modelos isótropos

Los modelos isótropos suponen una distribución continua y homogénea de la irradiancia difusa en la bóveda celeste para cada instante, o lo que es lo mismo, el flujo radiativo procedente del Sol es igual en todas direcciones y la atenuación que produce la atmósfera es uniforme. En principio, esta hipótesis sólamente es válida con cielos totalmente cubiertos. Con cielos claros, y si el Sol se incluye en la porción de bóveda celeste observada por la superficie, la anisotropía de la atmósfera aumenta, especialmente en regiones próximas a la circunsolar y al horizonte (de forma más intensa con valores pequeños de la altura del Sol). Constituyen los modelos más sencillos y se basan, en términos generales, en buscar la proporción geométrica de la cúpula celeste observada.

1.5.1. Modelo de Liu & Jordan

Este modelo, publicado en 1961 [Liu and Jordan, 1961], es el modelo isótropo más sencillo y posiblemente el más extendido. Se fundamenta en considerar la proporción de la parte visible de la bóveda celeste por la superficie bajo estudio, sobre la que se proyecta

irradiancia (véase la figura 1.3), según:

$$R_d = \frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.5}$$

En este caso, la expresión para la irradiancia reflejada es complementaria a la de la irradiancia difusa sobre el plano de estudio, tal y como muestra la ecuación:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.6}$$

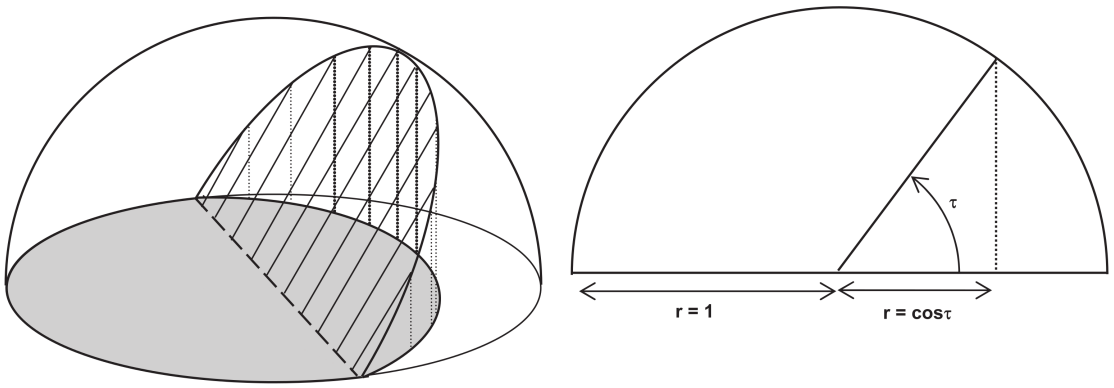


Figura 1.3: Proporción observada de la bóveda celeste por un plano inclinado según el modelo de Liu & Jordan. Adaptado de [Rakovec and Zakšek, 2012].

Obsérvese que este modelo podría recogerse dentro de los modelos de gradiente de radiancia que se describen en la sección 1.7, pues constituye un caso particular de los mismos. Como se expondrá posteriormente, estos modelos se fundamentan en integrar el producto de la radiancia cenital, I_z, y una función de radiancia, $i_r(\theta, \gamma)$, a lo largo de la bóveda celeste observada por el plano de estudio. Bajo la hipótesis de una distribución isótropa, dicha función toma el valor de:

$$i_r(\theta, \gamma) = 1. \tag{1.7}$$

La radiancia difusa resulta entonces:

$$I(\theta, \gamma) = i_r(\theta, \gamma) I_z = I_z. \tag{1.8}$$

Tomando como referencia la figura 1.4, la irradiancia difusa sobre un plano inclinado cualquiera, definido por el ángulo cenital θ_{zp} y el ángulo acimutal γ_p, quedará entonces expresada como:

$$D(\theta_{zp}, \gamma_p) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\theta_\gamma} I \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\gamma' + \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \int_0^{\pi/2} I \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\gamma'. \tag{1.9}$$

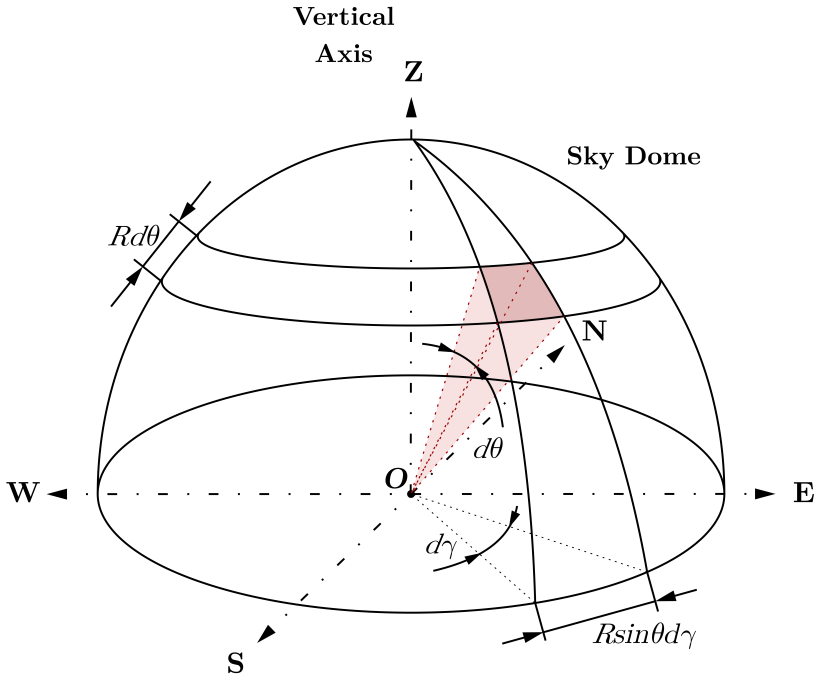


Figura 1.4: Integración de la radiancia del cielo.

donde el límite de integración θ_γ se define como el ángulo cenital correspondiente a la intersección de la superficie de estudio (plano definido por un vector director, de coordenadas horizontales $\mathbf{p} = (\theta_{zp}, \gamma_p)$, y el punto origen $O = (0, 0)$) con la bóveda celeste, y que no es constante [Rakovec and Zakšek, 2015]:

$$\sin\theta_{zp}\sin\gamma_p\sin\theta_\gamma\cos\gamma + \sin\theta_{zp}\sin\gamma_p\sin\theta_\gamma\sin\gamma + \cos\theta_{zp}\cos\theta_\gamma = 0, \tag{1.10}$$

por lo que despejando el límite de integración, este quedaría:

$$\tan\theta_\gamma = \frac{-\cos\theta_{zp}}{\sin\theta_{zp}\cos\gamma_p\cos\gamma + \sin\theta_{zp}\sin\gamma_p\sin\gamma}. \tag{1.11}$$

Obsérvese que la integral de la expresión (1.9) se realiza respecto de los ángulos cenital θ' y acimutal γ' relativos al vector director de la superficie de estudio, $\mathbf{p}$, y no a la vertical del lugar, para facilitar el tratamiento matemático. Así mismo, dado que la radiancia es constante, dicha expresión es independiente del ángulo acimutal del vector director de la superficie de estudio γ_p.

La radiancia I igual a la radiancia cenital I_z bajo la hipótesis de una atmósfera isótropa, que denominaremos I_{z0}. Ésta se puede calcular entonces a partir de la expresión (1.9) a

la irradiancia difusa sobre plano horizontal[2]:

$$I_{z0} = \frac{D(0)}{\int_{-\pi/2}^{3\pi/2}\int_{0}^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta d\gamma} = \frac{D(0)}{\pi}. \tag{1.12}$$

Sustituyendo (1.12) en (1.9) y despejando, se obtiene el coeficiente R_d que relaciona la irradiancia difusa sobre un plano inclinado respecto de la horizontal y que verifica la expresión:

$$R_d = \frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.13}$$

De forma análoga, la irradiancia reflejada o de albedo se puede determinar en base a la integración del producto de una radiancia nadital, I_{gz}, y una función gradiente de radiancia reflejada, $i_{gr}(\theta, \gamma)$, a lo largo de la proporción de terreno observado por la superficie de cálculo. Supuesta esta irradiancia reflejada también de carácter isótropo, queda:

$$i_{gr}(\theta, \gamma) = 1. \tag{1.14}$$

La radiancia reflejada resulta entonces:

$$I_g(\theta, \gamma) = i_{gr}(\theta, \gamma) I_{gz} = I_{gz}. \tag{1.15}$$

La irradiancia reflejada total se obtendría a partir de la integración de la radiancia reflejada angular:

$$R(\theta_{zp}, \gamma_p) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{\theta_\gamma}^{\pi/2} I_g \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\gamma', \tag{1.16}$$

donde de forma análoga a la irradiancia difusa, $I_g = I_{gz}$, y considerando la hipótesis de una distribución isótropa, $I_{gz} = I_{gz0}$. Ésta se obtendría a partir de la irradiancia global sobre el plano horizontal:

$$I_{gz0} = \frac{\rho G(0)}{\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta d\gamma} = \frac{\rho G(0)}{\pi}. \tag{1.17}$$

Sustituyendo (1.17) en (1.16) y despejando adecuadamente, se obtiene finalmente el coeficiente R_r que relaciona la irradiancia reflejada sobre un plano inclinado respecto de $\rho G(0)$:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.18}$$

La demostración completa de los resultados (1.13) y (1.18) se encuentran en el Anexo C.2.

[2]En el plano horizontal: $\cos\xi_p = \cos\theta$ y cuando la radiancia $I(\theta, \gamma)$ es **constante**, puede realizarse el cambio de base tal que $\mathbf{z} = \mathbf{p}$ y por tanto también se puede tomar: $\cos\xi_p = \cos\theta'$.

1.5.2. Modelo de Tian et al.

Tian et al. [Tian et al., 2001] consideran que la distribución isótropa de la irradiancia en la bóveda celeste no es proporcional a la proyección, sino que es proporcional a la superficie esférica de la misma (véase la figura 1.5), por lo que:

$$R_d = \frac{\theta_{zp}}{\pi}, \tag{1.19}$$

estando θ_{zp} medido en radianes.

La irradiancia reflejada o de albedo en este caso, también sigue siendo complementaria a la irradiancia difusa:

$$R_r = \frac{\pi - \theta_{zp}}{\pi}. \tag{1.20}$$

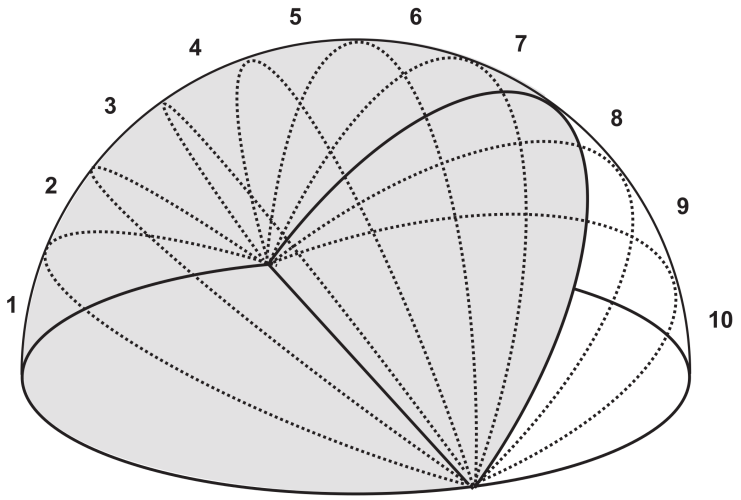


Figura 1.5: Proporción observada de la bóveda celeste por un plano inclinado según el modelo de Tian et al. Adaptado de [Rakovec and Zakšek, 2012].

1.5.3. Modelo de Badescu

En el año 2002, Badescu trata de mejorar el modelo de Liu & Jordan pues considera que su validez queda restringida al plano meridiano (2D) [Badescu, 2002]. Utilizando datos de Bucharest, y bajo la hipótesis de una distribución isótropa de la irradiancia difusa en la atmósfera, aplicando la expresión del ángulo formado por la posición del Sol en cada instante y la superficie de estudio, concluye que la expresión más adecuada para la irradiancia difusa sobre una superficie es:

$$R_d = \frac{3 + \cos(2\theta_{zp})}{4}, \tag{1.21}$$

que, tal y como muestra la figura 1.6, tiende a subestimar en comparación con los resultados que se obtendrían con el modelo de Liu & Jordan.

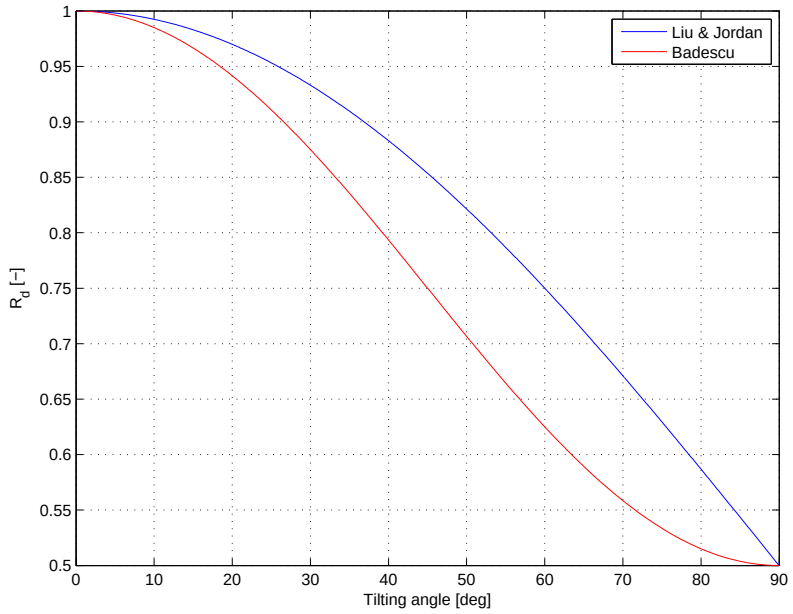


Figura 1.6: Comparación del valor de R_d para distintos ángulos de inclinación θ_{zp} estimado por los modelos de Liu & Jordan y Badescu.

Realizando un análisis análogo, y bajo las mismas hipótesis, obtiene la expresión (1.22) para la irradiancia reflejada por el terreno y que alcanza a la superficie de estudio.

$$R_r = \frac{1 - \cos(2\theta_{zp})}{4}. \tag{1.22}$$

1.5.4. Modelo de Koronakis

En [Koronakis, 1986] se propone una modificación del modelo de Liu & Jordan cuantificando de forma ponderada la irradiancia en función del ángulo cenital. Apoyado en las mediciones dadas en [Hamilton and Jackson, 1985], estima que la irradiancia procedente del hemisferio ecuatorial de la bóveda celeste aporta aproximadamente el 63 % de la irradiancia difusa total, con lo que para una superficie orientada en la dirección ecuatorial:

$$R_d = \frac{2 + \cos\theta_{zp}}{3}. \tag{1.23}$$

Estrictamente no es un modelo isótropo, pues en su propia definición indica que la irradiancia proveniente de la bóveda celeste no es uniforme. No obstante, se agrupa dentro de

los modelos isótropos pues, salvo esa ponderación, considera una distribución homogénea de la irradiancia en la atmósfera.

Para cuantificar la irradiancia reflejada sobre el plano de análisis emplea la misma expresión que Liu & Jordan,

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.24}$$

1.5.5. Modelo de Olmo

Este modelo se encuentra descrito en [Olmo et al., 1999, Ruiz et al., 2002]. Fue inicialmente desarrollado para estimar la irradiancia global en superficies inclinadas, utilizando medidas tomadas en la ciudad de Granada (España). Los datos incluían 114 experimentos realizados en condiciones de cielo despejado repartidos a lo largo de todo el año. Dichos experimentos consistían en el registro de la irradiancia solar por un piranómetro montado sobre un seguidor de dos ejes, con un paso de 15º para la inclinación (θ_{zp}) y 45º para el ángulo acimutal (γ_p). La irradiancia reflejada por el suelo era medida mediante un albedómetro. Los autores afirman que es aplicable tanto para medidas instantáneas como valores promedio.

Su expresión, detallada en la ecuación (1.25), indica que la irradiancia difusa incidente sobre una superficie inclinada, en ausencia de irradiancia reflejada, depende exponencialmente del índice de claridad (k_t) y de la diferencia de los cuadrados de los ángulos formados entre la posición del Sol y la superficie y el propio ángulo de inclinación de la superficie, medidos ambos en radianes.

$$R_d = \frac{G(0)\exp\left[-k_t\left(\theta_{sp}^2 - \theta_{zs}^2\right)\right] - R_b B(0)}{D(0)}, \tag{1.25}$$

siendo k_t el índice de claridad definido en la expresión (3.5).

Hay que tener en cuenta que la definición utilizada por Olmo del ángulo formado por la posición del Sol y la superficie de estudio es:

$$\cos\theta_{sp} = \sin\theta_{zp}\sin\theta_{zs} + \cos\theta_{zp}\cos\theta_{zs}\cos\left(\gamma_s - \gamma_p\right), \tag{1.26}$$

que es geométricamente incorrecta, pero es con la que ha ajustado el modelo el autor. En [Ruiz et al., 2002] comprueban que el empleo de esta expresión empeora el comportamiento del modelo frente a la expresión correcta detallada en la ecuación (A.44).

La componente reflejada la modeliza mediante:

$$R_r = \exp\left[-k_t\left(\theta_{sp}^2 - \theta_{zs}^2\right)\right]\sin^2\frac{\theta_{sp}}{2}. \tag{1.27}$$

En [Ruiz et al., 2002] o [Evseev and Kudish, 2009] se ha probado el modelo para distintas localizaciones (Madrid y Beer Shiva) y, aunque lo consideran válido, indican que han precisado hacer modificaciones para ajustar a sus medidas reales.

1.6. Modelos anisótropos de superposición

Estos modelos cuantifican la irradiancia solar difusa como la suma de una componente isótropa y uno o dos componentes para cuantificar la anisotropía, presente en días claros o despejados. La anisotropía de la atmósfera se manifiesta a través de dos fenómenos:

- **Radiancia de la región circunsolar:** radiancia dispersada por la atmósfera, de manera que parece provenir de la región del cielo adyacente al Sol. Se registra como un aumento en la intensidad de la radiancia (*"solar aureole"*), por una intensa dispersión hacia adelante de la radiancia solar, debida principalmente a aerosoles en suspensión [Iqbal, 1983].
- **Radiancia de la banda del horizonte:** en la zona próxima al horizonte observado, se registra un aumento de la intensidad de la radiancia, denominada en inglés como *"horizon brightening"*, causada por el incremento de la masa de aire observada en dichas direcciones [Iqbal, 1983].

La divergencia presentada entre modelos isótropos y anisótropos suele ser más acusada en los meses estivales, debido a que los efectos de la anisotropía son más pronunciados conforme aumenta la altura solar y el promedio de días claros es mayor.

Por otro lado cabría caracterizar la anisotropía de días intermedios, que está causada por la distribución heterogénea de las nubes en la atmósfera, y que puede afectar de forma diferenciada si se estudian diferentes orientaciones.

1.6.1. Modelo ASHRAE

El modelo ASHRAE es el recomendado por la Asociación Americana de Ingenieros de Instalaciones de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (*"American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers"*) para el cálculo de la irradiancia solar sobre distintas superficies. En 1971 este organismo propuso un procedimiento simplificado para el cálculo de esta variable con el objetivo de realizar simulaciones computacionales de diversos sistemas térmicos, principalmente en edificios [Lokmanhekim, 1971]. Desde entonces el modelo ha sido modificado en diversas ocasiones contando con las aportaciones

de diversos autores. Se trata de un modelo anisótropo obtenido a partir del procesamiento de datos recogidos en diversos emplazamientos de Estados Unidos y Canadá.

Este modelo se caracteriza por la evaluación conjunta de la irradiancia difusa y la irradiancia reflejada, aunque por normalizar con el resto de modelos descritos, y siguiendo el procedimiento empleado por Gueymard en [Gueymard, 1987], se han obtenido las expresiones correspondientes a R_d y R_r:

$$R_d = R_{dT} + \left(\frac{C_N^2}{C} - \frac{B}{D(0)} \right) \rho R_r \cos\theta_{zs}, \tag{1.28}$$

donde R_{dT} es una función empírica desarrollada por Threlkeld en [Threlkeld, 1962], C es un coeficiente empírico dependiente de la estación, y que se ha calculado a partir de una regresión polinómica de los valores dados en [Stephenson, 1967] cuyo ajuste se muestra en la figura 1.7. C_N es el denominado *"número de claridad"*, pero la ASHRAE sólo ha determinado este valor para el área de Estados Unidos, por lo que su valor se ha fijado en 1 en ausencia de otra información. Lo característico de la componente difusa de la irradiancia, en este expresión, es que depende de la componente reflejada.

El valor de R_{dT} desarrollado por Threlkeld sólo se indica para superficies verticales y corresponde con:

$$R_{dT} = \begin{cases} 0.45 & \text{si } \cos\theta_{sp} \leq 0.2, \\ 0.55 + 0.437\cos\theta_{sp} + 0.313\cos^2\theta_{sp} & \text{si } \cos\theta_{sp} > 0.2. \end{cases} \tag{1.29}$$

El valor del coeficiente C depende del contenido de partículas en suspensión en la atmósfera y varía estacionalmente. Como se indicó previamente, a partir de los datos obtenidos en [Stephenson, 1967] se ha realizado un ajuste polinómico de sexto grado:

$$C = a_0 + a_1 N + a_2 N^2 + a_3 N^3 + a_4 N^4 + a_5 N^5 + a_6 N^6, \tag{1.30}$$

donde N es el día del año y los coeficientes a_i con $i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ son respectivamente: $a_0 = 0.0530$, $a_1 = 5.6048\text{E-}4$, $a_2 = -2.2630\text{E-}5$, $a_3 = 3.8458\text{E-}7$, $a_4 = -2.3524\text{E-}9$, $a_5 = 5.9699\text{E-}12$, $a_6 = -5.4191\text{E-}15$.

La irradiancia reflejada en el modelo, tras la separación en las componentes difusa y reflejada del modelo original, coincide con la dada por el modelo de Liu & Jordan:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.31}$$

1.6.2. Modelo de Díez-Mediavilla

Tras el análisis de varios modelos de irradiancia difusa sobre plano inclinado, centrándose en superficies con orientación Sur en Valladolid (España), Díez-Mediavilla define un modelo para estimar dicha componente [Díez-Mediavilla, 2001, Díez-Mediavilla et al., 2005].

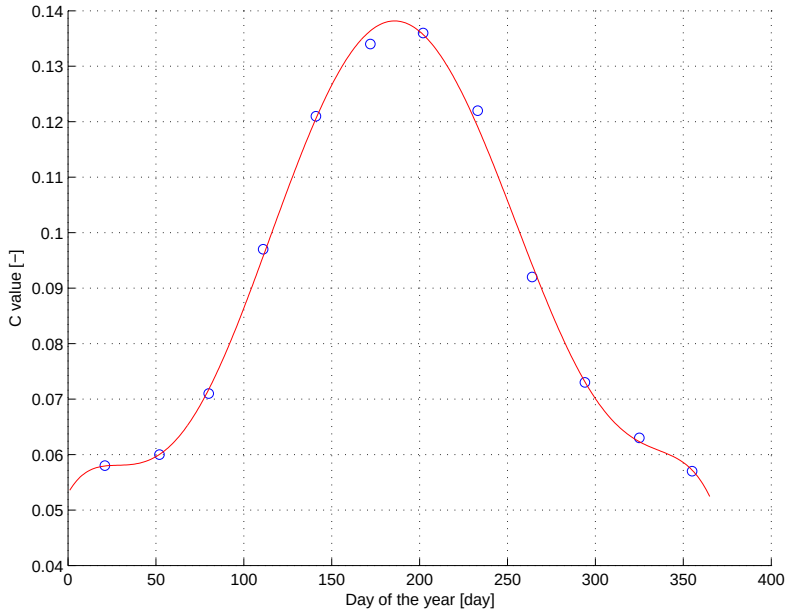


Figura 1.7: Ajuste del coeficiente C de Threlkeld.

Dicho modelo es derivado del modelo de Muneer (consúltese el subapartado 1.6.8) y parametrizado según la clasificación de cielos de Perez (descrito en el subapartado 1.6.9). El modelo se define como:

$$R_d = \frac{1+\cos\theta_{zp}}{2} + N_1 N_2, \tag{1.32}$$

donde N_1 es ajustado para ofrecer el mejor resultado para cualquier valor del índice de claridad ε':

$$N_1 = \frac{2b}{\pi(3+2b)} = 0.0751 - 1.999F_D - 0.8800F_D^2, \tag{1.33}$$

siendo F_D la función de modulación definida por el autor de forma idéntica a la dada por Muneer en la expresión (1.64).

N_2 toma el valor de:

$$N_2 = \sin\theta_{zp} - \theta_{zp}\cos\theta_{zp} - \pi\frac{1-\cos\theta_{zp}}{2}, \tag{1.34}$$

análogo al que se obtiene al descomponer la expresión del parámetro T_M del modelo de Muneer. Así mismo, θ_{zp} debe estar expresado en [rad].

Al no especificar ningún modelo para evaluar la irradiancia reflejada o de albedo, se aplica el modelo isótropo de Liu & Jordan:

$$R_r = \frac{1-\cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.35}$$

1.6.3. Modelo DOE-2

El modelo DOE-2 fue desarrollado por la Universidad de Berkley, explícitamente para mejorar los algoritmos existentes de estimación de la irradiancia en distintas superficies, tales como el propio DOE-2 [Hirsch, 2010] o ENCORE-CANADA [Konrad and Larsen, 1978, Maile et al., 2007]. Este modelo es uno de los componentes principales del software homónimo DOE-2, precursor y núcleo de herramientas informáticas utilizadas hoy en día, como *"EnergyPlus"* o *"Modelica"* [University of Berkley, 2012]. Es un modelo computacionalmente muy sencillo [Hedstrom and Freeman, 1980] en el cual la componente difusa es evaluada mediante:

$$R_d = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta_{zp} < 45^{\text{o}}, \\ R_{dT} & \text{si } 45^{\text{o}} \leq \theta_{zp} < 135^{\text{o}}, \\ 0 & \text{si } \theta_{zp} \geq 135^{\text{o}}. \end{cases} \tag{1.36}$$

R_{dT} está definido en la expresión (1.29).

La irradiancia reflejada considerada por el modelo sigue la distribución isótropa:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.37}$$

1.6.4. Modelo de Gueymard

Gueymard propone calcular la irradiancia difusa de un cielo cualquiera como suma de las irradiancias de un cielo despejado y de un cielo completamente cubierto [Gueymard, 1987, Gueymard, 1988]. Constituye así uno de los primeros modelos para todo tipo de cielos, denominados *"all sky models"*. Realiza una suma ponderada y normalizada de las irradiancias correspondientes a tipos extremos de cielos, que ya fue introducida por Steven y Unsworth en 1980 (consúltese el apartado 1.6.12). El modelo se define entonces por la siguiente expresión:

$$R_d = (1 - N_G)R_{d0} + N_G R_{d1}, \tag{1.38}$$

donde el subíndice 0 se refiere a un cielo completamente despejado y el subíndice 1 a un cielo totalmente cubierto. El primer caso correspondería a una distribución anisótropa de la irradiancia en el cielo y, por lo tanto, incluye la radiancia de la región circunsolar y la componente de fondo, que comprende la variación de la irradiancia difusa con el ángulo cenital θ. La distribución de radiancia para un cielo totalmente cubierto correspondería con la proporción de la radiancia de onda corta que incide sobre la superficie inclinada, respecto a la del plano horizontal.

El cálculo de R_{d0} se realiza mediante técnicas de regresión:

$$R_{d0} = \exp\left(a_0 + a_1\cos\theta_{zp} + a_2\cos^2\theta_{zp} + a_3\cos^3\theta_{zp}\right) + F1_G(\theta_{zp}) + F2_G(h'_s), \tag{1.39}$$

donde los coeficientes a_i con $i \in \{0,1,2,3\}$ son funciones de la altura solar corregida h'_s que depende de la altura solar h_s en grados:

$$h'_s = 0.01 h_s, \tag{1.40}$$

$$h_s = 90 - \frac{180}{\pi}\theta_{zs}. \tag{1.41}$$

$$a_0 = -0.897 - 3.364 h'_s + 3.960 h_s^{'2} - 1.909 h_s^{'3}, \tag{1.42}$$

$$a_1 = 4.448 - 12.962 h'_s + 34.601 h_s^{'2} - 48.784 h_s^{'3} + 27.511 h_s^{'4}, \tag{1.43}$$

$$a_2 = -2.770 + 9.164 h'_s - 18.876 h_s^{'2} + 23.776 h_s^{'3} - 13.014 h_s^{'4}, \tag{1.44}$$

$$a_3 = 0.312 - 0.217 h'_s - 0.805 h_s^{'2} + 0.318 h_s^{'3}. \tag{1.45}$$

Las funciones $F1_G(\theta_{zp})$ y $F2_G(h'_s)$ determinan la distribución de radiancia de fondo y dependen del ángulo de inclinación de la superficie y de la altura solar corregida respectivamente. $F1_G(\theta_{zp})$ queda definida por:

$$F1_G(\theta_{zp}) = \frac{1 + b_0 \sin^2\theta_{zp} + b_1 \sin(2\theta_{zp}) + b_2 \sin(4\theta_{zp})}{1 + b_0}, \tag{1.46}$$

donde los coeficientes b_j para $j \in \{0,1,2\}$ valen $b_0 = -0.2249$, $b_1 = 0.1231$ y $b_2 = -0.0342$. La expresión de la función $F2_G(h'_s)$ es:

$$F2_G(h'_s) = 0.408 - 0.323 h'_s + 0.384 h_s^{'2} - 0.170 h_s^{'3}. \tag{1.47}$$

El valor de R_{d1} se obtiene mediante la expresión:

$$R_{d1} = \frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2} + \frac{2b_i}{\pi(3 + 2b_i)}\left(\sin\theta_{zp} - \theta_{zp}\cos\theta_{zp} - \pi\frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}\right), \tag{1.48}$$

que corresponde con la distribución de irradiancia obtenida por Steven & Unsworth (consúltese la ecuación (1.82)). Análogamente, b_i es el índice de distribución de radiancia, cuyo límite teórico es $b_i = 0$ (cielo isótropo). No obstante, estudios empíricos lo determinan en el intervalo $b_i \in [1.0, 2.0]$ [Muneer, 2004]. Aunque depende localmente, Gueymard le asigna un valor promedio a nivel global $b_i = 1.5$, para cielos cubiertos, y $b_i = 0.5 + N_G$ para cielos parcialmente cubiertos y despejados.

N_G es un coeficiente de opacidad nubosa que se emplea en este modelo para ponderar el grado de nubosidad del cielo. Si no se dispone de mediciones de opacidad de las nubes, el factor N_G puede ser determinado a partir de la irradiancia difusa horizontal mediante:

$$N_G = \text{máx}\left[\text{mín}(Y(k_d), 1), 0\right], \tag{1.49}$$

siendo la función $Y(k_d)$ definida para dos intervalos del valor de fracción difusa en el plano horizontal:

$$Y(k_d) = \begin{cases} 6.6667k_d - 1.4167 & \text{si } k_d \leq 0.227, \\ 1.2121k_d - 0.1758 & \text{si } k_d > 0.227. \end{cases} \tag{1.50}$$

Las correlaciones y valores de las regresiones para determinar los parámetros óptimos del modelo están dadas para el cálculo de irradiancia horaria.

En la misma contribución, Gueymard realiza un análisis de la irradiancia reflejada o de albedo, exponiendo un nuevo modelo para la reflectancia aparente ρ, denominado modelo anisótropo semifísico, el cual se describe en detalle en el subapartado 1.9.4. Dicha reflectancia aparente es utilizada para el cálculo de la irradiancia de albedo, mediante el modelo isótropo de Liu & Jordan:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.51}$$

Gueymard determina que la reflectancia aparente de las superficies es anisótropa y su valor difiere respecto de si se trata de una reflectancia hacia adelante (*"forward"*) o hacia atrás (*"backward"*) según la incidencia de los rayos solares.

Por otro lado, si las superficies del entorno tienen un carácter especular, como por ejemplo una lámina de agua o elementos metálicos pulidos, la reflectancia no es proporcional a la irradiancia global en el plano horizontal y al factor de visión geométrico de la superficie inclinada, sino que es posible descomponer la reflectancia en una componente debida a la irradiancia directa y otra debida a la difusa según:

$$R = f_b\rho_b B(n)\cos\theta_{rp} + \rho_d \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2} D(0), \tag{1.52}$$

donde f_b es un factor de sombreado, ρ_b es la reflectancia por la irradiancia directa sobre el plano horizontal, θ_{rp} es el ángulo de dicha reflectancia directa reflejada sobre la superficie de estudio y ρ_d la reflectancia por la irradiancia difusa en la atmósfera.

Para mantener un criterio unificado, se reescribe el modelo (1.52) de forma análoga al modelo de las tres componentes, expresado según (1.4), y que se ha tomado como referencia para la exposición de todos los modelos. De esta forma se obtiene la expresión del factor R_r para este modelo:

$$R_r = f_b \frac{\rho_b}{\rho} \frac{B(n)\cos\theta_{rp}}{G(0)} + \frac{\rho_d}{\rho} \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2} k_d, \tag{1.53}$$

donde ρ sería el valor de reflectancia aparente, tomando usualmente $\rho = 0.2$.

El factor f_b es un factor de sombreado de la irradiancia directa sobre la superficie y permite modelizar aquellas situaciones en las que la posición del Sol se encuentra detrás de algún obstáculo en el horizonte. Si no ocurre sombreamiento, su valor es $f_b = 1$. En cambio, si el

disco solar está totalmente oculto, su valor es $f_b = 0$. Para situaciones intermedias debería evaluarse empíricamente.

El ángulo de incidencia de la irradiancia reflejada sobre la superficie inclinada objeto de estudio, θ_{rp}, se determina mediante:

$$\cos\theta_{rp} = \sin\theta_{zp}\sin\theta_{zs}\cos(\gamma_s - \gamma_p) - \cos\theta_{zp}\cos\theta_{zs}. \tag{1.54}$$

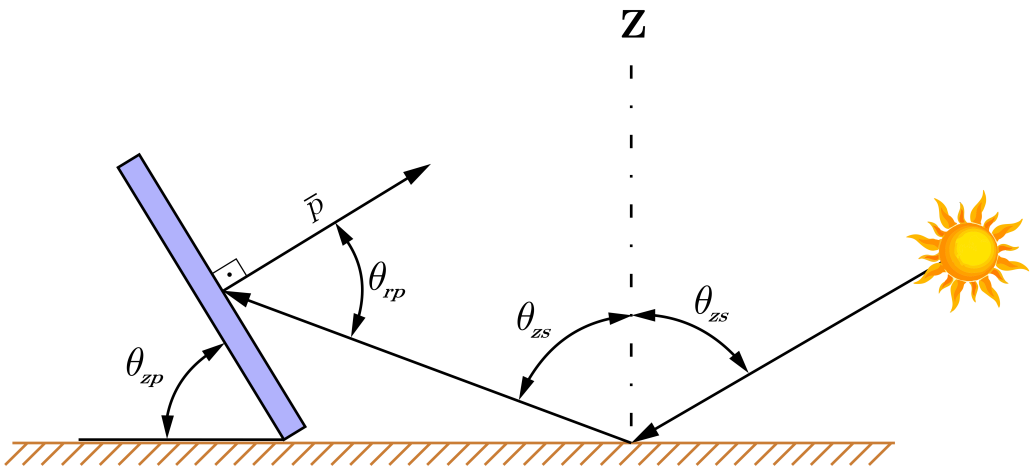


Figura 1.8: Ángulo con el plano de estudio de la irradiancia reflejada.

1.6.5. Modelo de Hay & Davies

El modelo de Hay [Hay, 1976, Hay, 1979] y posteriormente modificado y ampliado en los trabajos [Hay and Davies, 1980, Hay and McKay, 1988] gracias a la colaboración con Davies y McKay, modela la irradiancia difusa sobre un plano mediante la composición de una irradiancia difusa isótropa de fondo y una irradiancia debida a la región circunsolar:

$$R_d = F_H R_b + (1 - F_H)\frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.55}$$

F_H es la función de modulación del modelo, o índice de anisotropía y está definido por:

$$F_H = F = \frac{G(0) - D(0)}{B_{ext}(0)} = \frac{B(0)}{B_{ext}(0)}. \tag{1.56}$$

Cabe destacar en este punto, que este modelo, aún con consideraciones anisótropas, únicamente evalúa la anisotropía por la región circunsolar, sin considerar el gradiente de radiancia de la banda del horizonte.

La irradiancia reflejada sobre el plano es considerada isótropa según:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.57}$$

1.6.6. Modelo de Klucher

En 1979, Klucher presenta una modificación del modelo de Temps & Coulson (descrito en el subapartado 1.6.13) generalizándolo para cualquier condición del cielo [Klucher, 1979]. A partir de datos horarios de radiación sobre distintas superficies inclinadas, a lo largo de 6 meses en Nueva York, el autor obtiene un modelo que corrige la subestimación del modelo isótropo de Liu & Jordan para condiciones de cielos claros y parcialmente despejados. Por otro lado, pretende minimizar las sobreestimaciones que genera el modelo de Temps & Coulson para cielos cubiertos. Su expresión es:

$$R_d = \frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2}\left(1 + F_K \sin^3\frac{\theta_{zp}}{2}\right)\left(1 + F_K \cos^2\theta_{sp}\sin^3\theta_{zs}\right), \tag{1.58}$$

siendo F_K la función de modulación definida como:

$$F_K = 1 - \left[\frac{D(0)}{G(0)}\right]^2 = 1 - k_d^2. \tag{1.59}$$

Nótese que la función de modulación de Klucher suma de forma ponderada el modelo de Liu & Jordan para cielos cubiertos (valores elevados de la fracción difusa k_d) y el de Temps & Coulson para cielos parcialmente cubiertos o despejados.

La irradiancia reflejada aplica de nuevo el modelo isótropo:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.60}$$

1.6.7. Modelo de Ma & Iqbal

En [Ma and Iqbal, 1983] los autores realizan un estudio comparativo de los modelos isótropo de Liu & Jordan (subapartado 1.5.1), de Klucher (subapartado 1.6.6) y de Hay & Davies (subapartado 1.6.5) aplicados para modelizar irradiancia en superficies inclinadas 30º, 60º y 90º respecto del plano horizontal, orientadas hacia la dirección Sur. Los datos son recopilados en la localidad de Woodbridge, Ontario (Canadá) a intervalos minutales y los modelos son evaluados a escala horaria y diaria. La irradiancia de albedo también es medida para describir únicamente la irradiancia difusa.

El análisis concluye que el modelo isótropo de Liu & Jordan y el modelo de Hay & Davies subestiman a lo largo de todo el año. El modelo de Klucher sobreestima en el periodo estival y subestima en el periodo invernal. En términos globales, el modelo que ofrece mejores resultados es el de Hay & Davies. Basándose en dichas conclusiones, los autores plantean entonces una modificación del modelo, consistente en combinar una atmósfera isótropa de fondo según el modelo de Liu & Jordan, y una componente para modelizar la irradiancia procedente de la región circunsolar. El resultado es la expresión:

$$R_d = k_t \cos\theta_{sp} + (1 - k_t)\,\frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2}, \tag{1.61}$$

donde k_t es el índice de claridad que relaciona la irradiancia global en el plano horizontal con la irradiancia extraterrestre sobre el mismo plano.

Para evaluar la componente reflejada o de albedo aplica el modelo isótropo:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.62}$$

1.6.8. Modelo de Muneer

A lo largo de diferentes trabajos [Muneer, 1987, Saluja and Muneer, 1987, Muneer, 1988, Muneer, 1989, Muneer, 1990a, Muneer, 1990b, Muneer, 1995], Muneer y sus colaboradores proponen y perfeccionan un modelo para aumentar la precisión en la estimación del valor de la irradiancia difusa sobre superficies inclinadas, pues consideran que es una de las principales fuentes de error de los modelos de irradiancia global existentes, especialmente en su evaluación en climas europeos.

La última versión del modelo [Muneer, 1995] determina que la irradiancia difusa sobre un plano inclinado se puede calcular mediante:

$$R_d = T_M\,(1 - F_M) + F_M R_b, \tag{1.63}$$

donde T_M es una función de distribución de radiancia, definida por Muneer y F_M es una función de modulación que coincide con el índice F o función de claridad del cielo:

$$F_M = F = \frac{G(0) - D(0)}{B_{ext}(0)} = \frac{B(0)}{B_{ext}(0)}. \tag{1.64}$$

La función de distribución de irradiancia de Muneer se describe mediante:

$$T_M = \frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2} + \frac{2b_i}{\pi\,(3 + 2b_i)}\left(\sin\theta_{zp} - \theta_{zp}\cos\theta_{zp} - \pi\sin^2\frac{\theta_{zp}}{2}\right), \tag{1.65}$$

donde el ángulo θ_{zp} ha de estar dado en [rad].

En la ecuación (1.65), el parámetro b_i es el índice de distribución de radiancia, expuesto por primera vez en [Moon and Spencer, 1942] y analizado en profundidad por diferentes autores posteriormente, entre los que destaca [Kondratyev, 1969]. Su valor depende de la clasificación del cielo para el instante de cálculo. Muneer establece que su valor ha de ser $b_i = 5.73$, para superficies sin irradiancia directa y $b_i = 1.68$ para superficies enfrentadas al Sol [Muneer, 1990b, Muneer, 1995]. Como media global, se acepta el valor de $b_i = 2.5$ para cielos cubiertos. Para cielos despejados, el autor ofrece la siguiente expresión polinomial:

$$\frac{2b_i}{\pi(3+2b_i)} = 0.04000 - 0.820F_M - 2.0260F_M^2. \tag{1.66}$$

No obstante, para el Sur de Europa (validación empírica en Génova y Suiza) el autor recomienda emplear la expresión:

$$\frac{2b_i}{\pi(3+2b_i)} = 0.00263 - 0.712F_M - 0.6883F_M^2. \tag{1.67}$$

Para modelizar la componente reflejada, en [Saluja and Muneer, 1988, Muneer, 2004] se realiza un estudio del valor de la reflectancia para distintos localizaciones del Reino Unido, que se aplica en la expresión del modelo isótropo:

$$R_r = \frac{1-\cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.68}$$

1.6.9. Modelo de Perez et al.

En 1983 Perez et al. publican un modelo basado en la superposición de las tres componentes (isótropa, circunsolar y gradiente en la banda del horizonte) de irradiancia difusa y luminancia en la atmósfera, y que posteriormente optimizan en [Perez et al., 1987, Perez et al., 1990]. La expresión final que se determina para modelizar el comportamiento isótropo y anisótropo de la irradiancia difusa en la atmósfera es:

$$R_d = (1-F_1)\,\frac{1+\cos\theta_{zp}}{2} + F_1R_b + F_2\sin\theta_{zp}, \tag{1.69}$$

donde F_1 y F_2 son los coeficientes que cuantifican la irradiancia de la región circunsolar y de la banda del horizonte respectivamente. Hay que tener en cuenta que el cálculo de R_b en este caso debe realizarse aplicando la expresión:

$$R_b = \frac{\text{máx}(\cos\theta_{sp}, 0)}{\text{máx}(\cos\theta_{zs}, \cos 85^\text{o})}. \tag{1.70}$$

El modelo de Perez está validado únicamente para alturas solares $h \geq 5^\text{o}$.

Los coeficientes F_1 y F_2 dependen de tres parámetros que clasifican las condiciones del cielo: el ángulo cenital (θ_{zs}), el índice de claridad de Perez (ε) y la luminosidad o brillo celeste

(Δ). Estos índices se calculan mediante las expresiones (3.12) y (3.13) respectivamente. Los coeficientes F_1 y F_2 se calculan entonces mediante:

$$F_1 = \text{máx}(F_{11} + \Delta F_{12} + \theta_{zs} F_{13}, 0), \tag{1.71}$$

$$F_2 = F_{21} + \Delta F_{22} + \theta_{zs} F_{23}, \tag{1.72}$$

dado el ángulo cenital θ_{zs} en [rad]. Los valores promedio para todo el globo terráqueo de los nuevos coeficientes F_{ij} son dados por los autores en la tabla 1.1. No obstante, en el Anexo C.3 se han calculado los valores óptimos de dichos coeficientes para la estación de medida SWIFT0001 (42.351ºN, −3.688ºE, 857 m.s.n.m.).

Tabla 1.1: Coefs. modelo de Perez et al. (irradiancia). Fuente: [Perez et al., 1990].

ε	$\mathbf{F_{11}}$	$\mathbf{F_{12}}$	$\mathbf{F_{13}}$	$\mathbf{F_{21}}$	$\mathbf{F_{22}}$	$\mathbf{F_{23}}$
$[1.000, 1.065)$	−0.0083	0.5877	−0.0621	−0.0596	0.0721	−0.0220
$[1.065, 1.230)$	0.1299	0.6826	−0.1514	−0.0189	0.0660	−0.0289
$[1.230, 1.500)$	0.3297	0.4869	−0.2211	0.0554	−0.0640	−0.0261
$[1.500, 1.950)$	0.5682	0.1875	−0.2951	0.1089	−0.1519	−0.0140
$[1.950, 2.800)$	0.8730	−0.3920	−0.3616	0.2256	−0.4620	0.0012
$[2.800, 4.500)$	1.1326	−1.2367	−0.4118	0.2878	−0.8230	0.0559
$[4.500, 6.200)$	1.0602	−1.5999	−0.3589	0.2642	−1.1272	0.1311
$[6.200, \infty)$	0.6777	−0.3273	−0.2504	0.1561	−1.3765	0.2506

1.6.10. Modelo de Reindl

En [Reindl et al., 1990b] se realiza una comparación entre las medidas de valores de irradiación horaria sobre superficie vertical en las cuatro direcciones cardinales y diferentes modelos: Liu & Jordan, Hay & Davies, Perez et al. 1987 y 1990, y el que Reindl y sus colaboradores desarrollan tomando conceptos de los modelos de Hay & Davies, Temps & Coulson y Klucher.

El modelo elaborado por Reindl et al., cuya expresión es (1.73), utiliza un índice de anisotropía A_i para definir la proporción de irradiancia difusa procedente de la región circunsolar. El resto se considera como irradiancia isótropa. Además añade una función de modulación para cuantificar el gradiente de radiancia en la franja del horizonte, análogo

al utilizado por Temps & Coulson (véase la ecuación (1.85)).

$$R_d = (1 - A_i)\,\frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2}\left(1 + F_R \sin^3\frac{\theta_{zp}}{2} + A_i R_b\right). \tag{1.73}$$

El índice de anisotropía A_i queda definido por:

$$A_i = F = \frac{B(0)}{B_{ext}(0)}, \tag{1.74}$$

expresión que coincide con la función de claridad del cielo, y el factor F_R se describe por:

$$F_R = \sqrt{\frac{B(0)}{G(0)}} = \sqrt{k_b}. \tag{1.75}$$

Este modelo establece que la irradiancia reflejada es de carácter isótropo:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.76}$$

1.6.11. Modelo de Skartveit & Olseth

En 1986 los investigadores noruegos Skartveit y Olseth desarrollan un modelo de irradiancia difusa sobre plano inclinado, ajustado para latitudes elevadas, modificando para ello el modelo de Hay & Davies (consúltese el apartado 1.6.5) [Skartveit and Asle Olseth, 1986, Skartveit and Olseth, 1987]. La expresión del modelo resultante es:

$$R_d = F_H R_b + F_S \cos\theta_{zp} + (1 - F_H - F_S)\frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2}, \tag{1.77}$$

siendo F_H la función de modulación, que coincide con la expresión proporcionada por Hay & Davies en (1.56), y F_S la función de modulación de Skartveit & Olseth dada por:

$$F_S = \text{máx}\left[(0.3 - 2F_H), 0\right]. \tag{1.78}$$

El primer término de la ecuación (1.77) cuantifica la irradiancia procedente de la región circunsolar, el segundo la irradiancia difusa cenital y el tercero cuantifica la irradiancia difusa de fondo. Los autores indican que para la aplicación del modelo se debe verificar que $F_H \geq 0.15$.

Así mismo, se define una expresión para cuantificar la irradiancia difusa apantallada por obstáculos en el horizonte:

$$R'_d = -\int \frac{1 - F_H - F_S}{\pi}\cos\theta_{sp}\cos\xi_p \sin\xi_p d\xi_p, \tag{1.79}$$

donde ξ_p es el ángulo formado entre el punto del cielo oculto por el obstáculo y la superficie estudiada (definida por su vector director $\mathbf{p}$).

Para cuantificar la irradiancia reflejada sobre el plano de estudio, en horizontes despejados, adoptan el modelo isótropo:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.80}$$

Si existieran obstáculos en el horizonte la expresión propuesta es:

$$R'_r = \int \frac{1}{\pi} \cos\theta_{sp} \cos\xi_p \sin\xi_p d\xi_p. \tag{1.81}$$

1.6.12. Modelo de Steven & Unsworth

Los investigadores de la Universidad de Nottingham (Reino Unido) Steven y Unsworth tomaron medidas en la dirección cenital y en las direcciones verticales para caracterizar el índice de distribución de radiancia de la atmósfera (b) [Steven and Unsworth, 1979, Steven and Unsworth, 1980]. Concluyeron que la distribución de radiancia en una atmósfera despejada tiene un carácter marcadamente anisótropo. Para días cubiertos obtuvieron un valor de $b = 1.23$, inferior al obtenido por otros autores [Moon and Spencer, 1942], debido a las diferencias en la distribución de luminancia y radiancia en estas condiciones.

La expresión que se proporciona para modelizar la irradiancia solar difusa sobre una superficie cualquiera es:

$$R_d = s_c R_b + \frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2} + \frac{2b}{\pi(3 + 2b)} \left(\sin\theta_{zp} - \theta_{zp}\cos\theta_{zp} - \pi \sin^2 \frac{\theta_{zp}}{2} \right), \tag{1.82}$$

donde el primer término cuantifica la irradiancia de la región circunsolar, que consideran proporcional a la irradiancia difusa, y donde el resto de términos modelan la irradiancia difusa de fondo de la atmósfera. Para un rango del ángulo cenital comprendido entre 35º y 65º, el valor promedio de s_c y b es $s_c = 0.51$ y $b = -0.87$ respectivamente. El ángulo θ_{zp} debe estar expresado en [rad].

La irradiancia reflejada o de albedo se considera isótropa:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.83}$$

1.6.13. Modelo de Temps & Coulson

Este modelo es presentado en [Temps and Coulson, 1977] y referenciado posteriormente en [Iqbal, 1983, Díez-Mediavilla et al., 2005, Noorian et al., 2008]. Está basado en el modelo

propuesto en [Robinson, 1966] y modifica el modelo isótropo de Liu & Jordan introduciendo un factor que tiene en cuenta el incremento de irradiancia en la región circunsolar:

$$f_1 = 1 + \cos^2\theta_{sp}\sin^3\theta_{zs}, \tag{1.84}$$

y otro factor que cuantifica la luminosidad del cielo en las zonas próximas al horizonte:

$$f_2 = 1 + \sin^3\frac{\theta_{zp}}{2}. \tag{1.85}$$

Combinando el modelo isótropo de Liu & Jordan con los dos factores anteriormente descritos se obtiene:

$$R_d = \frac{1+\cos\theta_{zp}}{2} f_1 f_2. \tag{1.86}$$

Temps y Coulson proponen la siguiente expresión particular para la irradiancia reflejada, diseñada inicialmente para modelizar dicha componente producida por un terreno con césped:

$$R_r = \frac{1-\cos\theta_{zp}}{2}\left(1+\sin^2\frac{\theta_{zs}}{2}\right)\sin^2\theta_{zs}. \tag{1.87}$$

1.6.14. Modelo de Willmott

Este modelo se caracteriza por introducir un coeficiente de reducción anisótropo para superficies inclinadas, o lo que es lo mismo, un factor de visión de la bóveda celeste (SVF) [Willmott, 1982a]. La irradiancia difusa para el plano objeto de estudio se obtiene como la suma de tres componentes: la irradiancia difusa de fondo, la proporción de irradiancia recibida por reflexión en obstáculos verticales, tales como edificios o árboles frondosos, y la proporción de irradiancia recibida por reflexión en el terreno y no incluida en el término anterior:

$$R_d = \frac{F_W}{\cos\theta_{zp}} + C(\theta_{zp})\left(1-\frac{F_H}{\cos\theta_{zp}}\right), \tag{1.88}$$

donde F_H es la función de modulación de Hay & Davies, definido en la ecuación (1.56), y F_W es el índice de anisotropía o función de modulación en el plano, definido por Willmott como la relación entre la irradiancia directa sobre el plano de estudio y la irradiancia solar extraterrestre sobre el plano horizontal:

$$F_W = \frac{B(n)\cos\theta_{sp}}{B_{ext}(0)}. \tag{1.89}$$

El coeficiente $C(\theta_{zp})$ representa la integración de Revfeim de la geometría asociada con la irradiancia difusa sobre una superficie inclinada [Revfeim, 1978] y su aproximación numérica es:

$$C(\theta_{zp}) = 1.0115 - 0.20293\theta_{zp} - 0.080823\theta_{zp}^2, \forall C(\theta_{zp}) : 0.5 \leq C(\theta_{zp}) \leq 1.0, \tag{1.90}$$

donde el ángulo cenital de la superficie o ángulo de inclinación θ_{zp} está expresado en [rad].

La componente de irradiancia reflejada por el entorno es modelizada por Willmott como isótropa:

$$R_r = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{1.91}$$

1.7. Modelos anisótropos de gradiente de radiancia

En las secciones anteriores se han presentado los modelos isótropos y anisótropos de superposición o aquellos que evalúan la anisotropía como suma de componentes (gradiente de radiancia en la región circunsolar y en la franja del horizonte). En esta sección se describen modelos basados en funciones que calculan la irradiancia difusa sobre un plano cualquiera mediante la integración de las funciones gradiante de radiancia y difusión, en función de los ángulos cenital y acimutal. Algunos autores clasifican estos modelos como de tercera generación [Muneer, 2004].

La radiancia, $I(\theta, \gamma)$, se define en la sección A.2 como el flujo radiante en una dirección, transmitido por un rayo elemental, que atraviesa un punto de la bóveda celeste, y que se propaga de acuerdo a un ángulo sólido $d\Omega$, que contiene a la dirección dada, dividido entre el producto del valor del ángulo sólido, el área de la sección de dicho rayo que contiene el punto atravesado y el coseno del ángulo entre la normal a la sección y la dirección del rayo. A la radiancia también se la denomina *"intensidad de radiación"*. En base a esta definición, y tomando como referencia la figura 1.4, la irradiancia difusa sobre un plano cualquiera se puede calcular como:

$$D(\theta_{zp}, \gamma_p) = \int_{\gamma_p - \pi/2}^{\gamma_p + \pi/2} \int_0^{\pi/2} I(\theta, \gamma) \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma + \int_{\gamma_p + \pi/2}^{\gamma_p + 3\pi/2} \int_0^{\theta_\gamma} I(\theta, \gamma) \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma, \tag{1.92}$$

donde el límite de intergración θ_γ, que corresponde al ángulo cenital de la intersección del plano de estudio con la bóveda celeste, se encuentra definido en la expresión (1.11).

La función radiancia se puede determinar en función de la radiancia cenital I_z y la función gradiente $i_r(\theta, \gamma)$:

$$I(\theta, \gamma) = i_r(\theta, \gamma) I_z. \tag{1.93}$$

La radiancia cenital, por definición, puede calcularse a partir de la irradiancia difusa sobre el plano horizontal:

$$I_z = \frac{D(0)}{\displaystyle\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} i_r(\theta, \gamma) \cos\theta \sin\theta d\theta d\gamma}. \tag{1.94}$$

Como se indicó en el subapartado 1.5.1, si se considera una atmósfera isótropa, entonces $I_z = I_{z0}$, cuyo valor se ha calculado en (1.12).

Por continuar con el criterio adoptado a lo largo de este capítulo, se expresa la relación entre la irradiancia difusa sobre un plano inclinado y la correspondiente al plano horizontal como:

$$R_d = \frac{\int_{\gamma_p-\pi/2}^{\gamma_p+\pi/2}\int_0^{\pi/2} i_r(\theta,\gamma)\cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma + \int_{\gamma_p+\pi/2}^{\gamma_p+3\pi/2}\int_0^{\theta_\gamma} i_r(\theta,\gamma)\cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} i_r(\theta,\gamma)\cos\theta \sin\theta d\theta d\gamma}. \tag{1.95}$$

Cabe destacar que particularizaciones de estos modelos pueden dar lugar a modelos anisótropos clásicos, como el modelo de Perez et al. o el de Muneer entre otros (consúltense los apartados 1.6.9 y 1.6.8 respectivamente). Por otro lado, es interesante denotar que los modelos de gradiente de radiancia están estrechamente relacionados con los modelos de gradiente de luminancia. De hecho, muchos modelos de un tipo se pueden adaptar para describir la otra magnitud.

Una característica común a estos modelos es que la función gradiente $i_r(\theta,\gamma)$ es fuertemente dependiente del tipo de cielo que se esté estudiando. Resulta por ello fundamental hacer una buena identificación y clasificación de los cielos en función de parámetros fácilmente cuantificables. En el caso de los modelos que derivan de describir la luminancia del cielo, este aspecto no es tan relevante, pues normalmente interesa describir condiciones completamente cubiertas por ser el caso más desfavorable a la hora del diseño de instalaciones de iluminación. Como se expone en el capítulo 3, no existe un criterio unificado para la clasificación de los cielos, es decir, no se ha fijado un parámetro universalmente aceptado de referencia, ni una clasificación normalizada en base a ninguna variable. Los diferentes autores toman criterios particulares al respecto. Para este tipo de modelos, normalmente suele utilizarse la clasificación CIE de cielos de referencia, explicada en el mismo capítulo, pero presenta el inconveniente de que no indica un criterio para la asignación del tipo de cielo, sino que éste se asigna como aquel que mejor ajusta a los distintos tipos de cielo definidos.

El otro aspecto negativo de este tipo de modelos es la necesidad de resolver las integrales que lo componen. Como se indicará a continuación, las expresiones de las funciones gradiente de radiancia normalmente no presentan integrales inmediatas, y por lo tanto, suele ser necesario aplicar procedimientos de integración numérica para su resolución. El desarrollo analítico de las integrales involucradas, o la elección del procedimiento de integración numérico más adecuado en cada caso, queda reservado para otros estudios.

La irradiancia reflejada con este tipo de modelos se estima mediante la expresión:

$$R(\theta_{zp},\gamma_p) = \int_{\gamma_p-\pi/2}^{\gamma_p+\pi/2}\int_{\pi/2}^{\pi-\theta_\gamma} I_g(\theta,\gamma)\cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma, \tag{1.96}$$

donde $I_g(\theta,\gamma)$ es la radiancia reflejada por el entorno y que viene definida por el producto

de una función gradiente de radiancia, $i_{gr}(\theta, \gamma)$, y la radiancia nadital, I_{gz}:

$$I_g(\theta, \gamma) = i_{gr}(\theta, \gamma) I_{gz}. \tag{1.97}$$

En el caso de suponer una distribución isótropa de la irradiancia reflejada, su valor ha sido calculado en (1.17).

Dentro de esta categoría, de acuerdo con [Badescu, 2008], los modelos pueden ser a su vez clasificados en:

- **Modelos de naturaleza semi-empírica o semi-teóricos:** combinan una formulación teórica resultante de resolver la ecuación de transferencia radiativa a través de la atmósfera, expresión (1.98), y una regresión a determinadas observaciones bajo ciertas condiciones.

$$\frac{dI(\theta, \gamma)_\lambda}{d\tau_\lambda} = -I(\theta, \gamma)_\lambda + J(\theta, \gamma)_\lambda, \tag{1.98}$$

  donde $J(\theta, \gamma)_\lambda$ es una función que cuantifica la difusión y transmisividad en la atmósfera en función de la longitud de onda λ.

- **Modelos empíricos:** son aquellos basados en el ajuste por regresión de los valores de radiancia en la atmósfera observados bajo determinadas condiciones.

- **Modelos estocásticos:** son aquellos que caracterizan el comportamiento de la radiancia en cada punto del espacio como la composición de una componente determinística y una componente estocástica, que modela el comportamiento estadístico de diferentes elementos atenuantes de la atmósfera.

Por otro lado, también se puede realizar una clasificación de estos modelos en función de su validez, dada la caracterización del cielo. Así se pueden encontrar:

- **Modelos de distribución de radiancia difusa para cielos cubiertos:** estos modelos caracterizan la distribución de la radiancia en cielos cubiertos o nubosos siguiendo una estructura genérica que se ajusta a la ecuación:

$$i_r(\theta) = \frac{a + b_i \cos\theta}{a + b_i}, \tag{1.99}$$

  donde a es un coeficiente que suele tomar el valor $a = 1$ y b_i es el índice de distribución de radiancia, que puede tomar diferentes valores [Moon and Spencer, 1942, Iqbal, 1983, Muneer, 2004]. Nótese que la distribución de radiancia en estos modelos depende únicamente del ángulo cenital de la región de cielo evaluada.

- **Modelos de distribución de radiancia difusa para cielos despejados:** son modelos que permiten determinar la radiancia de cada región del cielo en condiciones despejadas. En este caso, las funciones de radiancia pasan a depender no sólo del ángulo cenital θ, sino también del ángulo ξ_s formado entre la región del cielo evaluada y la posición del Sol en dicho instante.

- **Modelos de distribución de radiancia difusa para cielos intermedios:** mediante el registro de series temporales de medidas es posible determinar unas condiciones de cielo intermedias según los estándares CIE, para cielos cubierto y despejado respectivamente. Dicho cielo intermedio puede expresarse como una combinación lineal de los dos tipos de cielo extremos anteriores, en función de su frecuencia de ocurrencia. Este modelo se describe como más fiable para el cálculo de luminancia en interiores.

- **Modelos de distribución de radiancia difusa para todo tipo de cielos:** estos modelos permiten una descripción generalizada de la distribución de radiancia adecuándose a los distintos tipos de cielo, tomando en la mayor parte de los casos, características de los modelos de distribución de radiancia para cielos despejados y cubiertos.

Aunque existe una amplia diversidad de modelos de cada una de las categorías anteriormente descritas, en este trabajo nos centramos en 5 modelos representativos. Dichos modelos se han seleccionado para la descripción de todo tipo de cielos para que puedan presentar un buen ajuste a las condiciones de medida. Como representación de los modelos de naturaleza semi-empírica se describe el modelo de Siala & Hooper [Siala and Hooper, 1989], y de los modelos empíricos, se trabajará con el de Hooper & Brunger [Hooper and Brunger, 1980], el modelo de Brunger [Brunger and Hooper, 1993], el modelo CIE 2004 [CIE, 2004] y el modelo de Igawa et al. [Igawa et al., 2004]. No se analiza en esta Tesis ningún modelo de naturaleza estocástica, pues los más representativos en este campo, como el de Siala & Hooper [Siala et al., 1987], exigen para la calibración del modelo (cálculo óptimo de sus coeficientes) una extensa serie temporal de medidas precisas de la radiancia de distintas regiones del cielo de las cuales no se dispone.

1.7.1. Modelo de Brunger & Hooper

El modelo descrito en [Brunger and Hooper, 1993] es una modificación del Modelo de Distribución Continua de Tres Componentes (TCCD), propuesto por Hooper & Brunger en 1980, y que se analiza en detalle en el apartado 1.7.3. La modificación propuesta reside en sustituir la función cuadrática que describe el gradiente de radiancia en la franja del horizonte, por una función coseno del ángulo cenital, como la propuesta por Moon &

Spencer en 1942, citado por [Badescu, 2008]. La expresión propuesta en este caso para describir la radiancia procedente de la región caracterizada por el ángulo cenital θ y el ángulo entre la posición del Sol y dicha región ξ_s es:

$$I(\theta, \xi_s) = D(0)\frac{a_0 + a_1 \cos\theta + a_2 \exp(-a_3\xi_s)}{\pi(a_0 + 2a_1/a_3) + 2a_2 J(\theta_{zs}, a_3)}, \tag{1.100}$$

donde la función $J(\theta_{zs}, a_3)$ está definida como:

$$J(\theta_{zs}, a_3) = \frac{1 + \exp(-a_3\pi/3)}{a_3^2 + 4}\left\{\pi - \left[1 - \frac{2}{\pi a_3}\frac{1 - \exp(-a_3\pi)}{1 + \exp(-a_3\pi/2)}\right][2\theta_{zs}\sin\theta_{zs} - 0.02\pi\sin(2\theta_{zs})]\right\}, \tag{1.101}$$

con el ángulo θ_{zs} expresado en [rad].

El ángulo ξ_s se calcula mediante la expresión (A.41).

Los parámetros a_i con $i \in \{0, 1, 2, 3\}$ se pueden calcular a partir de dos índices que caracterizan las condiciones del cielo: el índice de claridad k_t y la fracción difusa k_d. La tabla 1.2 muestra los valores de los citados coeficientes, en función de los rangos de valores que pueden adoptar los dos índices anteriores.

1.7.2. Modelo CIE 2004 (Cielo general estándar)

Este modelo es el adoptado por la CIE [CIE, 2004] para evaluar la radiancia y la luminancia del cielo mediante una función gradiente en comparación con la magnitud cenital:

$$i_r(\theta, \gamma) = \frac{f(\xi_s)g(\theta)}{f(\theta_{zs})g(0)} = \frac{\{1 + c[\exp(d\xi_s) - \exp(d\pi/2)] + e\cos^2\xi_s\}\{1 + a\exp(b/\cos\theta)\}}{\{1 + c[\exp(d\theta_{zs}) - \exp(d\pi/2)] + e\cos^2\theta_{zs}\}\{1 + a\exp(b)\}}, \tag{1.102}$$

siendo $f(\xi_s)$ la función indicatriz de difusión, $g(\theta)$ la función gradiente cenital y ξ_s el ángulo formado por la posición del Sol y la parte diferencial del cielo evaluado. El valor de ξ_s se puede determinar a partir de la expresión (A.41).

Los coeficientes a, b, c, d y e se agrupan en dos conjuntos de seis grupos que recogen a y b por un lado y c, d y e por otro, dando lugar a un conjunto total de 36 combinaciones diferentes o tipos de cielo. Sin embargo, el modelo estándar, simplifica dichas 36 combinaciones a 15 [CIE, 2004], que son los comúnmente utilizados por éste y otros modelos derivados. Dichos tipos de cielo, y los valores de los coeficientes asociados se muestran en la tabla 3.9.

La cuestión principal a la hora de aplicar este modelo es determinar el tipo de cielo existente. Sin embargo, como se ha ido indicando, no existe un criterio unificado. Ésta es una de las principales desventajas de este modelo, pues requiere un elevado tiempo de cálculo para verificar el tipo de cielo más adecuado en cada caso. Es por ello que los

Tabla 1.2: Coeficientes del modelo de Brunger & Hooper en función del índice de claridad (k_t) y la fracción difusa (k_d). Fuente: [Brunger and Hooper, 1993].

k_t \ k_d	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
0.95	0.1864	0.2002	0.138	0.1508	0.1718	0.2060			
	0.1979	0.1772	0.093	0.5472	0.0566	−0.0294			
	0.0000	0.0000	0.289	0.6659	0.8734	2.9511			
	1.0000	1.0000	0.9667	1.6755	2.4129	3.7221			
0.85	0.1431		0.3477	0.2664	0.2139	0.1520	0.1151		
	0.142		−0.2153	−0.1559	0.0307	0.1497	0.1805		
	2.636		5.3170	1.7758	1.6099	1.8315	2.2284		
	5.525		4.4211	2.8590	3.726	4.6125	4.1553		
0.75			0.3687	0.2684	0.2019	0.1870	0.1842	0.1566	
			−0.2927	−0.1615	−0.1275	−0.0632	0.0253	0.3003	
			2.6268	4.5224	1.4096	1.2819	1.3080	1.8486	
			2.8413	4.0842	2.2453	2.5932	3.1127	14.744	
0.65			0.3851	0.2843	0.2713	0.1597	0.2088	0.1273	
			−0.2726	−0.1645	−0.1837	−0.1715	−0.0520	−0.0500	
			4.1962	5.2960	2.822	1.2964	1.3225	1.5961	
			5.259	4.3678	3.486	1.9183	2.8364	2.0993	
0.55			0.6079	0.2892	0.2816	0.2465	0.2070	0.2477	
			−0.4838	−0.1953	−0.1945	−0.1245	−0.0927	−0.0711	
			11.078	2.1346	3.8606	2.9163	1.1098	1.5836	
			4.588	3.7268	3.7447	4.0760	2.5586	3.450	
0.45				0.2337	0.2822	0.2916	0.2583	0.2457	0.2315
				−0.1015	−0.1842	−0.2065	−0.1654	−0.1398	−0.2028
				11.792	6.0300	2.7327	1.9525	1.512	1.5803
				5.3698	4.5241	3.7624	3.3769	2.964	2.3229
0.35		a_0			0.3162	0.3006	0.2871	0.2691	0.2510
		a_1			-0.2039	−0.2172	−0.2184	−0.2224	−0.0907
		a_2			6.2226	4.5443	2.6467	1.5992	0.9733
		a_3			5.8975	4.2660	3.594	2.6404	2.6775
0.25						0.3417	0.3153	0.3071	0.2971
						−0.2574	−0.2338	−0.2576	−0.3126
						4.1918	3.8860	2.3127	1.3594
						4.3268	4.3920	3.5189	2.397
0.15							0.3360	0.3243	0.3061
							−0.2600	−0.3003	−0.4531
							4.2481	1.9157	1.612
							4.3727	3.2680	2.319

esfuerzos de los investigadores en este campo se centran en establecer un criterio unificado que permita una clasificación inicial del tipo de cielo, como por ejemplo los propuestos en [Igawa et al., 2004, Igawa, 2014].

1.7.3. Modelo de Hooper & Brunger (TCCD)

El modelo de Hooper & Brunger, también denominado de Distribución Continua de Tres Componentes (o *"Three Component Continuous Distribution Model"* (TCCD) en inglés) [Hooper and Brunger, 1980] describe la radiancia procedente de un punto de la bóveda celeste mediante la expresión:

$$I(\theta,\gamma) = D(0)\left\{a_0 + a_1\left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^2 + a_2\exp[-c\xi_s\exp(d\theta_{zs})]\right\}, \tag{1.103}$$

donde los coeficientes a_0, a_1 y a_2 cuantifican la contribución de la radiancia de naturaleza isótropa, anisótropa procedente de la franja del horizonte y anisótropa procedente de la región circunsolar respectivamente. Su valor se determina empíricamente mediante la calibración inicial del modelo. En este caso se han empleado los valores dados en [Rosen et al., 1989] para Toronto en ausencia de medidas propias y éstos se muestran en la tabla 1.3. Los coeficientes c y d son dos constantes positivas cuyos valores se fijan en la calibración del modelo, y que para Toronto (Canadá), a partir de los datos recogidos en [Steven and Unsworth, 1979], toman $c = 0.0145423$ y $d = 0.0231798$ respectivamente.

1.7.4. Modelo de Igawa et al.

En [Igawa et al., 2004, Igawa et al., 2014] se presenta un modelo de gradiente de radiancia similar al modelo CIE 2004 estándar. La principal mejora introducida es que ofrece expresiones analíticas para los coeficientes a, b, c, d y e del modelo CIE 2004 de forma parametrizada para la determinación a priori del tipo de cielo (según el índice Si descrito el apartado 3.19). De esta forma, los coeficientes del modelo CIE2004 se pueden calcular como:

$$a = \frac{4.5}{1 + 0.15\exp(3.4Si)} - 1.04, \tag{1.104}$$

$$b = \frac{-1}{1 + 0.17\exp(1.3Si)} - 0.05, \tag{1.105}$$

$$c = 1.77(1.22Si)^{3.56}\exp(0.2Si)(2.1 - Si)^{0.8}, \tag{1.106}$$

$$d = \frac{-3.05}{1 + 10.6\exp(-3.4Si)}, \tag{1.107}$$

Tabla 1.3: Coeficientes de anisotropía normalizados del modelo de Hooper & Brunger. Adaptado de [Rosen et al., 1989].

Tipo de cielo	**Nubes**	θ_{zs} [º]	**D(0)** [$\mathbf{W \cdot m^{-2}}$]	$\mathbf{a_0}$ [-]	$\mathbf{a_1}$ [-]	$\mathbf{a_2}$ [-]
Despejado	0/10	20-40	162	−0.04	0.38	1.16
		40-60	102	−0.13	0.55	2.26
		60-80	55	−0.11	0.88	3.51
		80-90	18	−0.57	2.52	16.24
Claro con niebla	0/10	40-60	224	0.05	0.16	1.92
		60-80	130	0.12	0.16	3.70
		80-90	27	0.29	−0.03	4.64
Nuboso nivel alto	1-3/10	20-40	211	−0.02	0.25	1.14
(cirrus, cirrostratus,		40-60	147	0.03	0.33	1.45
cirrocumulus)		60-80	80	−0.43	1.57	8.01
		80-90	25	−5.00	14.78	112.64
	4-6/10	20-40	326	0.08	0.05	0.87
		40-60	246	0.09	0.01	1.54
	7-9/10	20-40	233	0.19	−0.03	0.59
		40-60	203	0.12	0.13	1.34
		60-80	94	0.17	−0.12	3.13
Nuboso nivel medio	1-3/10	40-60	258	0.14	0.01	1.26
(altostratus, altocumulus)		60-80	64	0.07	0.49	4.10
		80-90	22	0.41	−0.42	0.81
	4-6/10	20-40	240	0.06	0.15	0.89
		40-60	184	0.11	0.06	1.44
		60-80	83	−0.17	1.00	5.64
	10/10	20-40	413	0.22	−0.16	0.56
		40-60	318	0.20	−0.08	0.89
		60-80	178	0.38	−0.28	0.37
Nuboso nivel bajo	10/10	20-40	217	0.40	−0.28	0.00
(stratus, stratocumulus,		40-60	141	0.39	−0.24	0.00
nimbostratus)		60-80	93	0.41	−0.31	0.00
		80-90	21	0.39	−0.25	0.00
Desarrollo vertical	1-3/10	20-40	177	0.04	0.23	0.96
(cumulus,	4-6/10	40-60	235	0.25	−0.09	0.88
cumulonimbus)		60-80	108	0.16	0.33	2.40
		80-90	16	0.06	0.77	3.01
	7-9/10	40-60	232	0.20	−0.39	0.82

$$e = \frac{0.48}{1 + 245\exp(-4.13Si)}. \tag{1.108}$$

La función gradiente de radiancia para este modelo coincide con la dada para el modelo CIE 2004, expuesta en (1.102).

1.7.5. Modelo de Moon & Spencer

Los investigadores Moon y Spencer propusieron en 1942 un modelo para calcular valores de luminancia y radiancia basado en una función gradiente, que modificaba el valor de la radiancia cenital [Moon and Spencer, 1942]. La expresión propuesta por los autores para la distribución de radiancia es:

$$i_r(\theta) = \frac{1 + b_i \cos\theta}{1 + b_i}, \tag{1.109}$$

siendo b_i el índice de distribución de radiancia, que Moon y Spencer determinaron con un valor de $b_i = 2$, y que después fue adoptado por la CIE para describir el cielo cubierto estándar. Como se puede comprobar es un modelo de distribución de radiancia difusa para cielos cubiertos, cuya expresión se ciñe a la forma generalizada introducida en (1.99).

1.7.6. Modelo de Siala & Hooper

El modelo descrito en [Siala and Hooper, 1989] es de naturaleza semi-empírica y se basa en la solución de la ecuación radiativa de transferencia mediante la aproximación de órdenes sucesivos de dispersión. La ecuación de transferencia radiativa es aplicada al espectro completo de la radiancia, y la contribución de emisión es despreciada por simplificación. Así se obtiene la siguiente expresión para la radiancia:

$$I(\theta,\gamma) = \begin{cases} B_{sc}\dfrac{a_1\cos\theta_{zs}}{4\pi(\cos\theta - \cos\theta_{zs})}\dfrac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\xi_s)^{3/2}}\left[\exp\left(\dfrac{-a_2}{\cos\theta}\right) - \exp\left(\dfrac{-a_2}{\cos\theta_{zs}}\right)\right] & \text{si } \theta \neq \theta_{zs}, \\ B_{sc}\dfrac{a_1 a_2}{4\pi\cos\theta_{zs}}\dfrac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\xi_s)^{3/2}}\exp\left(\dfrac{-a_2}{\cos\theta_{zs}}\right) & \text{si } \theta = \theta_{zs}, \end{cases} \tag{1.110}$$

donde a_1 y a_2 son obtenidos empíricamente a través del ajuste del modelo mediante regresión no lineal por mínimos cuadrados y g es el factor de asimetría de la función de fase de la dispersión. Los valores dados por los autores para Toronto (Canadá), que posee latitud y climas similares a la mayor parte de la Península Ibérica, son $a_1 = 1.287$, $a_2 = 0.460$ y $g = 0.438$ respectivamente.

1.8. Modelos no paramétricos

Se entiende por modelos no paramétricos aquellos que permiten establecer relaciones entre un conjunto de entradas, estimadores o *"inputs"* y un conjunto de salidas, respuestas o *"outputs"* analizando únicamente los datos, sin adoptar ninguna hipótesis o modelo teórico previo. También pueden denominarse *"modelos de caja negra"* o incluso *"modelos estadísticos"*, distinguiéndolos de los *"modelos físicos"* o paramétricos.

La construcción de este tipo de modelos se basa en la extracción de información de un conjunto de datos de entrenamiento. Esto puede constituir una ventaja en problemas complejos, pero sin embargo, se requieren tamaños de muestra grandes para configurarlos y evaluarlos. Su ajuste es un arte complejo (*"model-fitting"*) y está directamente relacionado con los procesos de inferencia[3].

Dentro de esta clase de modelos, destacan por su flexibilidad y buenos resultados los algoritmos de *"soft-computing"*, que integran métodos de aprendizaje automático, como el reconocimiento de patrones, la teoría de aprendizaje computacional y la inteligencia artificial. Además, pueden mejorar su rendimiento de forma adaptativa, a medida que aumenta el número de muestras disponibles para el aprendizaje. Estas técnicas han ayudado a modelizar sistemas complejos en distintos campos, como la medicina, la biología, la economía o la energía, que resultaban inmanejables con los métodos analíticos convencionales. Existen múltiples tipos de modelos no paramétricos, pero dentro de los más estudiados y desarrollados destacan los sistemas de inferencia borrosa y las redes neuronales artificiales:

- **Sistemas de inferencia borrosa:** estos sistemas, también denominados como *"sistemas basados en reglas fuzzy"* o *"modelos fuzzy"*, sustituyen expresiones exactas de regresión entre los estimadores por una función de pertenencia a un conjunto borroso y una serie de reglas que relacionan dichos conjuntos. Resultan de particular interés los sistemas de inferencia Mamdani y Takagi-Sugeno, por su capacidad de operar como aproximadores universales[4].

- **Redes neuronales artificiales:** los sistemas basados en redes neuronales, o adaptativos, tratan de imitar el funcionamiento del cerebro humano, que se sabe es capaz de detectar tendencias y relaciones entre conjuntos pareados de datos. Existen multitud de estructuras basadas en redes neuronales. En nuestro caso evaluaremos los sistemas Perceptrón multicapa (MLP), redes neuronales con función de base radial (RBF) y redes neuronales de regresión generalizada (GRNN) por su capacidad de actuar como aproximadores universales.

[3]Una inferencia es una evaluación que realiza la mente entre proposiciones [Hagan et al., 1996].

[4]Un aproximador universal es aquel algoritmo que puede aproximar, con un grado de precisión elevado, cualquier función matemática [Hagan et al., 1996].

- **Redes neuroborrosas:** como su propio nombre indica, constituyen una combinación de los dos sistemas anteriores. Se trata de redes neuronales que sustituyen las neuronas de la capa de entrada por funciones de pertenencia a conjuntos borrosos y la capa oculta por reglas de inferencia borrosa. La red de este tipo más desarrollada es el modelo ANFIS.

1.8.1. Sistemas de inferencia borrosa

Los sistemas de inferencia borrosa se apoyan en la *"Teoría de Conjuntos Borrosos"* y se definen por una estructura caracterizada por tres elementos:

1. Un conjunto de reglas fuzzy: marcan el funcionamiento del sistema.
2. Un diccionario: define las funciones de pertenencia de una determinada variable a un conjunto.
3. Un mecanismo de razonamiento: permite obtener un valor de salida o conclusión.

Gracias a la Teoría de Conjuntos Borrosos, desarrollada desde medidados de la década de 1960 [Zadeh, 1965], la definición del valor de una variable no es dicotómica, si no que presenta un grado de pertenencia. Esta propiedad hace muy flexibles a estos sistemas y es muy sencillo transformar relaciones lingüísticas en relaciones matemáticas, que de otra forma serían muy complejas [Zadeh, 1973, Zadeh, 1989].

Los conjuntos borrosos o fuzzy se caracterizan por no tener unos límites definidos, si no que éstos se sustituyen por las denominadas funciones de pertenencia o *"membership functions"*. Estas funciones indican un grado o valor de pertenencia, $\mu(X)$, para cada elemento X del conjunto, de forma que $0 \leq \mu(X) \leq 1$. Una de las claves a la hora de la definición de los conjuntos borrosos es, precisamente, la definición apropiada de la función de pertenencia, pero esto depende fundamentalmente de la experiencia y criterio del investigador.

Las reglas borrosas indican la dependencia entre conjuntos y admiten el principio de extensión, lo que permite realizar el mapeo entre conjuntos borrosos [Yager, 1980]. Estas reglas son implicaciones condicionales de la forma:

$$\text{si } x \in \mathcal{A} \rightarrow y \in \mathcal{B}, \tag{1.111}$$

donde $\mathcal{A}$ y $\mathcal{B}$ son conjuntos borrosos. Además, estas reglas son capaces de operar con variables lingüísticas, que facilitan la transcripción del conocimiento de expertos en entidades reconocibles por el método [Sugeno, 1977, Sugeno, 1985].

Una variable lingüística se expresa formalmente como la quíntupla $(x, T(x), X, R_s, R_m)$, donde x es el nombre de la variable, $T(x)$ es el conjunto de términos lingüísticos, X es el universo, R_s es la regla sintáctica que genera los términos en $T(x)$ y R_m es la regla semántica que asocia a cada valor lingüístico un significado. Además, a estas variables se les puede aplicar modificadores (*"muy"*, *"poco"*, *"mucho"*...) y así adaptarse de forma más restrictiva la pertenencia al conjunto [Klir and Yuan, 1995].

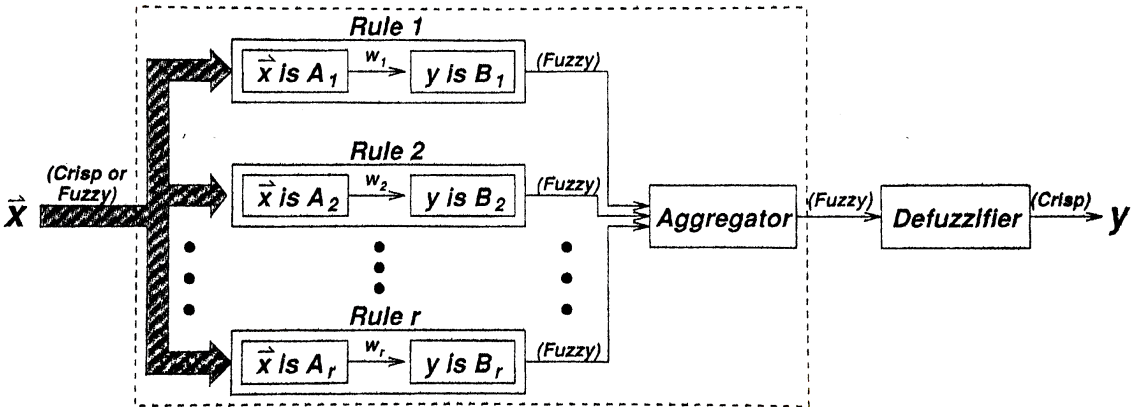


Figura 1.9: Modelo borroso. Fuente: [Jang et al., 1997].

La figura 1.9 muestra el funcionamiento genérico de un sistema de inferencia borroso. Los datos de entrada del sistema deben ser preprocesados para que el modelo borroso pueda operar adecuadamente, definiendo las funciones de pertenencia y aplicando correctamente las reglas. A este proceso se le denomina *"fuzzyficación"*. Una vez ha operado el sistema, la salida se debe de transformar de nuevo a un valor perteneciente al conjunto de valores posibles para la salida esperada. A este postprocesado se le denomina *"desfuzzyficación"*. Existen diversos métodos para realizar estos procesos, destacando el método de cálculo del centroide (muy costoso computacionalmente) o el del cálculo de la media entre el valor máximo y mínimo (más rápido pero menos preciso) [Lee, 2005].

En cuanto a los sistemas de inferencia en sí, existen diferentes métodos, destacando dos:

- Modelo Mamdani [Mamdani and Assilian, 1975, Mamdani, 1976, Mamdani, 1977].
- Modelo Takagi-Sugeno [Takagi and Sugeno, 1985].

La mayor diferencia entre ambos reside en que, al contrario que el modelo Mamdani, el modelo Takagi-Sugeno no puede seguir la *"regla de inferencia de composición"*[5] de forma

[5]Regla que permite traducir el *"modus ponens"* de la inferencia en lógica clásica a su análogo para inferencia en lógica borrosa.

estricta en su mecanismo de razonamiento. Sin embargo, la respuesta del modelo Takagi-Sugeno es una función exacta del consecuente o salida de la regla, con lo que se elimina la necesidad de desfuzzyficar. Obsérvese que el *"Modelo Borroso Takagi-Sugeno de Orden Cero"* es un caso particular del sistema de inferencia Mamdani, en el que el consecuente de cada regla fuera una función constante. La tabla 1.4 muestra una comparativa de las características de cada método.

Tabla 1.4: Comparativa entre los sistemas de inferencia Mamdani y Takagi-Sugeno. Adaptado de [MathWorks, 2015].

S.I. Mamdani	**S.I. Takagi-Sugeno**
Es intuitivo.	Es computacionalmente eficiente.
Tiene una amplia aceptación.	Funciona bien con técnicas lineales.
Se ajusta bien a entradas de un operador humano.	Funciona bien con técnicas de optimización y adaptativas.
	Garantiza la continuidad de la superficie de salida.
	Se adapta bien al análisis matemático.

La mayoría de las técnicas de inferencia borrosa son en realidad técnicas híbridas entre un algoritmo borroso y un algoritmo de optimización, que permite encontrar los valores óptimos de ciertos parámetros del modelo, como por ejemplo, los parámetros de las funciones de pertencia.

Existen diversas técnicas de optimización, siendo una de las más extendidas el empleo de algoritmos genéticos. Su combinación con modelos borrosos, da lugar a lo que comúnmente se conoce como *"algoritmos fuzzy-genéticos"*. En [Goldberg, 1989] se pueden consultar más detalles sobre las características y funcionamiento de los algoritmos genéticos y su aplicación en la optimización de sistemas de inferencia borrosa. Así mismo, los fundamentos sobre algoritmos genéticos se indican en [Gen and Cheng, 2000].

Los métodos de inferencia borrosa se han empleado con éxito para optimizar el control de plantas solares [Jafarzadeh et al., 2013], análisis de series temporales de datos y predicción de valores [Wu et al., 2014], o la estimación de irradiancia global horizontal a partir de otras variables climáticas, como por ejemplo el número de horas de Sol [Güçlü et al., 2014].

1.8.2. Redes neuronales artificiales

Basados en los procesos cognitivos naturales y en el estudio de los sistemas nerviosos biológicos, numerosos investigadores han conseguido desarrollar redes neuronales artificiales, mecanismos no lineales continuos con arquitecturas conectadas que simulan el comportamiento de un cerebro real. La estructura conectada reemplaza las representaciones simbólicas con representaciones distribuidas en términos de pesos o ponderaciones entre un conjunto masivo de neuronas (unidades de procesamiento) interconectadas. De esta forma se evitan todos los algoritmos de decisión [Jang et al., 1997, Fombellida García, 2013].

Las redes neuronales, con aprendizaje supervisado o no supervisado, se incluyen dentro del conjunto de las redes adaptativas. Éstas son unas estructuras en red, cuyo comportamiento está determinado por parámetros ajustables (a través de un proceso de aprendizaje). Su estructura topológica se compone de nodos y conexiones siendo cada nodo una unidad de proceso independiente que genera una salida según su funcionamiento interno. Estos nodos pueden ser fijos, si representan funciones predefinidas que no se pueden modificar, o adaptativos, cuyo comportamiento se puede regular mediante el ajuste de sus parámetros [Fombellida García, 2013].

En [Kalogirou, 2001] se realiza una revisión de las redes neuronales aplicadas en la resolución de diversos problemas, incluidas plantas de generación renovable. Entre dichos sistemas, el autor indica la resolución del cálculo de irradiancia, estimación del potencial solar en localizaciones en las que no se diponen medidas directas, predicción del tiempo de insolación diario, etc. Otros autores las han utilizado como herramienta para estimar la radiación global a partir de otros parámetros meteorológicos, como la temperatura ambiente o la humedad relativa [Rehman and Mohandes, 2008], estimar la irradiancia global media diaria mensual [Mubiru and Banda, 2008], predicción de la fracción difusa horaria y diaria [Elminir et al., 2007], generación de mapas de distribución de la irradiancia global horizontal [Moreno et al., 2011], cálculo del ángulo óptimo de inclinación de módulos [Chang and Wang, 2010, Chang, 2012], etc. También se han aplicado para estimar la transposición de irradiancia horizontal al plano inclinado [Mehleri et al., 2010, Notton et al., 2012, Celik and Muneer, 2013, Yadav and Chandel, 2014a].

A continuación se expone la descripción de estos modelos, para lo cual se ha empleado la notación utilizada en [Hagan et al., 1996].

Modelo de neurona

El modelo que imita el comportamiento biológico de neurona cerebral fue presentado, por primera, vez en [McCulloch and Pitts, 1943] y modificado en [Rosenblatt, 1962] para el

desarrollo del algoritmo Perceptrón.

Una neurona es un modelo en el que concurren tres procesos. Primero, la variable escalar de entrada p es multiplicada por el peso, también escalar, w. La variable ponderada resultante, wp, también escalar, se agrega al valor de sesgo b para formar la variable de entrada de la red n:

$$n = wp + b. \tag{1.112}$$

La función de agregación suele ser un sumatorio, pero hay arquitecturas que pueden utilizar otras, como el productorio. Finalmente, n es introducida en la función de transferencia o de activación $f(n)$, que produce la variable escalar de salida a. El valor de ponderación o peso w y el sesgo b son parámetros ajustables de la neurona (véase la figura 1.10). De hecho, son los parámetros que se persigue ajustar en la fase de entrenamiento para optimizar el funcionamiento de la red neuronal.

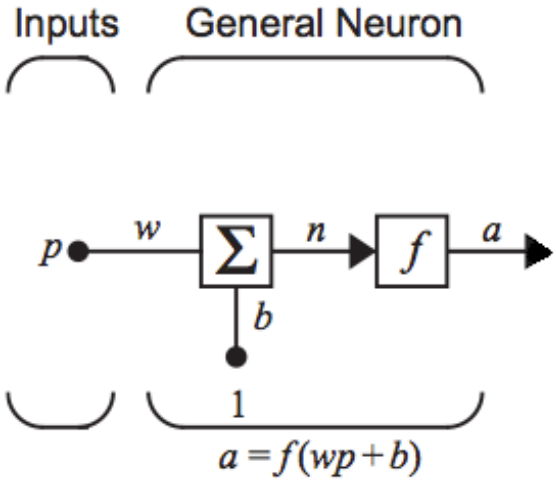


Figura 1.10: Modelo de neurona con entrada única. Fuente: [Hagan et al., 1996].

Existen multitud de funciones de transferencia, aunque las más utilizadas son la lineal ($a = n$), típica de la capa final en redes neuronales multicapa, y la función logarítmica sigmoidal ($a = \text{logsig}(n)$), típica de las capas ocultas, con la ventaja de ser diferenciable.

Cuando la neurona tiene por entrada un vector de valores $\mathbf{p}$, el funcionamiento es análogo (véase la figura 1.11). Mediante el producto escalar de los vectores $\mathbf{p}$ y la fila correspondiente de la matriz de pesos $\mathbf{W}$ se obtiene el valor de la variable de entrada de la red n_j. Al resultado se le suma el sesgo b:

$$n = \mathbf{W} \cdot \mathbf{p} + b. \tag{1.113}$$

Nótese que el resultado, n sigue siendo un escalar. Éste es introducido en la función de transferencia para dar lugar a la salida a de la neurona.

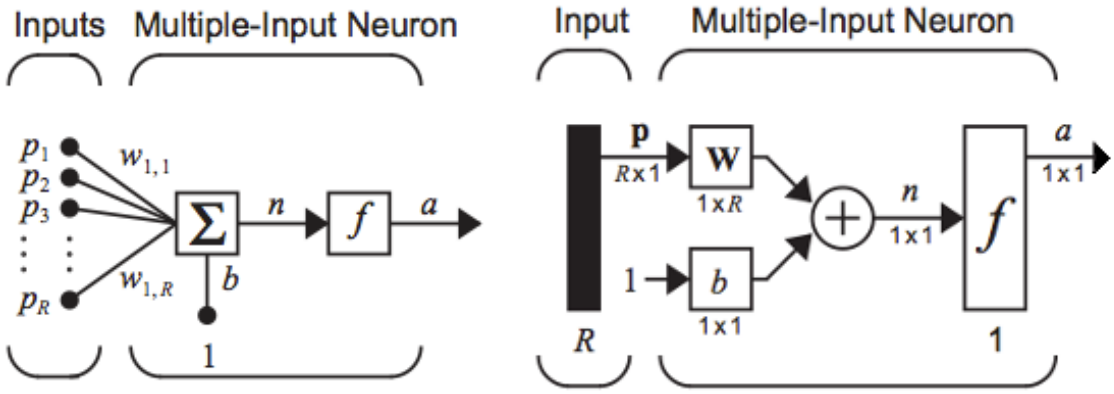


Figura 1.11: Modelo de neurona con múltiples entradas. Fuente: [Hagan et al., 1996].

Determinadas arquitecturas de redes neuronales, como por ejemplo la red de base radial, utilizan otras funciones de ponderación y/o de red, tales como la distancia euclídea a ciertos centros y el productorio.

Arquitectura de la red neuronal

Las redes neuronales finalmente, no son más que combinaciones de capas en serie y, dentro de éstas, neuronas en paralelo. Así se distinguen redes monocapa y multicapa. Estas últimas no suelen poseer más de tres.

En la figura 1.12 se puede observar una red neuronal monocapa, en la que cada elemento del vector de entradas $\mathbf{p}$ está conectado a la entrada de cada neurona mediante el elemento correspondiente de la matriz de pesos $\mathbf{W}$. Cada neurona produce una salida n_j, que alimenta a su respectiva función de transferencia o activación $f(n_j)$, la cual produce la respuesta a_j. Nótese que el número de neuronas no tiene por qué coincidir con el número de parámetros de entrada, es decir, la matriz $\mathbf{W}$ no tiene por qué ser cuadrada.

En los modelos multicapa, como el mostrado en la figura 1.13, la salida de una capa, denotada por el superíndice k, alimenta a las siguientes, de forma que cada capa posee su matriz de pesos $\mathbf{W}^k$, su vector de sesgos $\mathbf{b}^k$, y produce su correspondiente vector de respuestas $\mathbf{a}^k$. Dentro de las capas distinguimos dos clases:

- **Capa de salida:** produce las salidas de la red.
- **Capa/s ocultas:** no produce/n las salidas de la red.

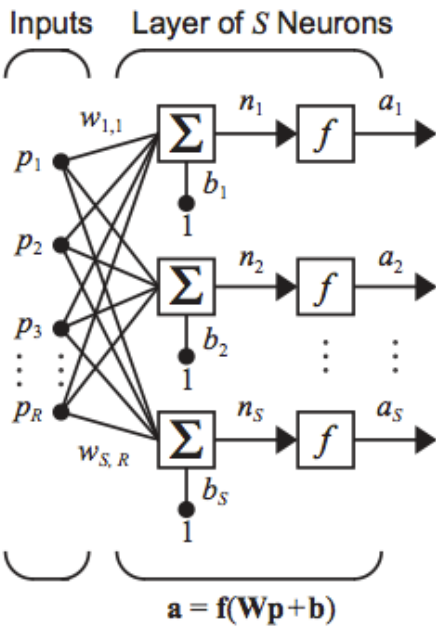


Figura 1.12: Red neuronal monocapa. Fuente: [Hagan et al., 1996].

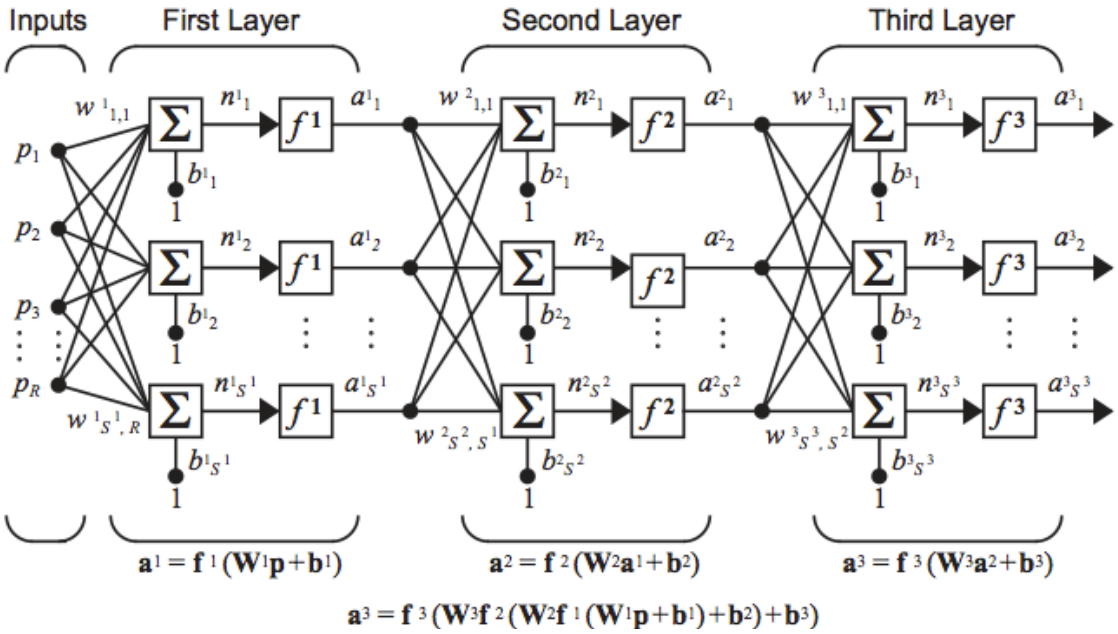


Figura 1.13: Red neuronal multicapa. Fuente: [Hagan et al., 1996].

Algunos autores reconocen una tercera capa, la *"capa de entrada"*, pero estrictamente no es tal al no contener neuronas con pesos y sesgos. Cabe destacar que existen tantas neuronas en la capa de salida como salidas esperadas del modelo. Sin embargo, el número de neuronas de las capas ocultas depende de cómo se quiera realizar la división del espacio que relaciona las variables de entrada con la salida. No existen reglas definidas al respecto y depende de cómo sea la función intrínseca en los datos, y del criterio del investigador [Hagan et al., 1996, Jang et al., 1997].

Las conexiones entre las neuronas de las diferentes capas da lugar a dos configuraciones posibles de redes:

- **Alimentadas hacia delante:** comúnmente denominadas *"feedforward"*, sólo realizan conexiones entre neuronas consecutivamente, desde la primera capa oculta hasta la capa de salida.
- **Retroalimentadas:** también llamadas *"feedback"*, permiten conectar la salida de neuronas posteriores como entradas de neuronas anteriores.

En síntesis, una red neuronal queda definida por:

1. Número de capas de la red.
2. Número de neuronas por capa.
3. Si existen o no conexiones de retroalimentación.
4. El tipo de función de transferencia o activación de las neuronas.

Aprendizaje y entrenamiento

Dado que estos modelos extraen las características del sistema a partir de los propios datos que analizan, es fundamental prestar atención al proceso de entrenamiento. Antes de describirlo, es preciso definir los conjuntos en los que se dividen los datos:

- **Conjunto de entrenamiento:** se utiliza para calcular los gradientes y actualizar los pesos y sesgos de la red.
- **Conjunto de validación:** permite monitorizar y evaluar el error durante el proceso de entrenamiento, evitando así el sobreajuste y generalizando la red.
- **Conjunto de test:** se utiliza para evaluar diferentes modelos.

La división en conjuntos puede realizarse de forma aleatoria (forma más extendida), en bloques contiguos, por índice o por selección intercalada [Hagan et al., 1996].

El proceso de aprendizaje es aquel por el cual la red es capaz de ajustar las matrices de pesos y sesgos que la configuran. El algoritmo que realiza este proceso se denomina *"regla de aprendizaje"*. Para el ajuste de funciones, la regla de aprendizaje empleada es de tipo supervisado. En este tipo de aprendizaje se dispone de un conjunto de entrenamiento constituido por vectores de estimadores y sus respectivas respuestas, $\{\mathbf{p}_i, \mathbf{t}_i\}$. De esta forma, se pueden comparar las salidas de la red $\mathbf{a}_i$, cuando ésta es alimentada por las entradas $\mathbf{a}_i$, con las respuestas objetivo $\mathbf{t}_i$ y calcular la diferencia. En base a ésta es posible actualizar los pesos y sesgos de la red.

En los métodos de aprendizaje supervisado, el proceso de entrenamiento se ejecuta en función del rendimiento de la red, medido éste normalmente como la raíz de la diferencia cuadrática media o RMSD[6] (véase la ecuación D.23). Esta función puede modificarse mediante un proceso de *"regularización"* para mejorar la generalización del modelo obtenido, optimizada mediante métodos bayesianos [Franklin, 1974].

Además, existen dos modos principales de entrenamiento:

- **De forma incremental u on-line:** en este caso los pesos se actualizan después del análisis de cada valor de entrenamiento. Tiene la ventaja de que el conjunto de entrenamiento y de validación coinciden y el modelo se reajusta con cada patrón procesado.
- **En bloque u off-line:** los pesos y sesgos se actualizan después de evaluar todos los datos de entrenamiento. Esta forma es más rápida que la primera y suele generar menos errores si el conjunto de entrenamiento se ha definido adecuadamente.

Regla de aprendizaje de propagación hacia atrás (Backpropagation) Existen diferentes reglas o algoritmos de aprendizaje. Para las redes neuronales multicapa, la más extendida es la *"Regla de aprendizaje de propagación hacia atrás"*, o comúnmente denominada en inglés *"Backpropagation Learning Rule"*. También suele definirse como *"regla delta generalizada"*, dado que deriva de la regla delta construida para el entrenamiento del Perceptrón monocapa, propuesta por [Werbos, 1974] y que fue adaptada a redes multicapa en [Rumelhart et al., 1986]. Esta regla permite trasladar el error cometido por el ajuste del modelo, desde la capa de salida a todas las capas anteriores, pudiendo regular así los pesos asociados a los conectores entre neuronas ($w_{i,j}^k$).

Este algoritmo funciona de forma que, una vez que se ha alimentado la entrada de la red,

[6] Es habitual trabajar directamente con su cuadrado: MSD = RMSD^2.

se produce una propagación desde la primera capa a través de las capas superiores de la red, hasta generar una salida. Las salidas de error se propagan hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de la capa oculta que contribuyen directamente a la salida. El error se pondera entre cada neurona, basándose en la contribución relativa (peso) al error total. La importancia de este proceso reside en que, a medida que se entrena la red, las neuronas de las capas intermedias se organizan a sí mismas de tal modo que las distintas neuronas aprenden a reconocer distintas características del espacio total de entrada (división del espacio) [Hagan et al., 1996, Jang et al., 1997].

En el caso de entrenamiento en bloque, los pesos se actualizan sólamente después de procesar el conjunto completo de entrenamiento, denominado ciclo completo o época.

Existen distintas mejoras propuestas al algoritmo backpropagation original. La tabla 1.5 identifica los 12 métodos más comunes y que se han evaluado para la implementación de los modelos de red neuronal de esta Tesis.

Tabla 1.5: Variantes de algoritmos de entrenamiento de propagación hacia atrás.

ID	Algoritmo de entrenamiento	Referencia
01	Levenberg-Marquardt	[Marquardt, 1963], [Hagan and Menhaj, 1994]
02	Regularización bayesiana	[MacKay, 1991]
03	BFSG Quasi-Newton	[Dennis and Schnabel, 1996]
04	Propagación hacia atrás resiliente	[Riedmiller and Braun, 1993]
05	Gradiente conjugado escalado	[Møller, 1993]
06	Gradiente conjugado con reinicios de Powell-Beale	[Powell, 1977], [McIntosh, 2012]
07	Gradiente conjugado de Fletcher-Powell	[Fletcher and Reeves, 1964]
08	Gradiente conjugado de Polak-Ribiére	[Scales, 1985]
09	Secante en un paso	[Battiti, 1992]
10	Aprendizaje de la tasa de descenso de gradiente	[Rehman and Nawi, 2011], [Jacobs, 1988]
11	Descenso de gradiente con momento	[Hagan et al., 1996]
12	Descenso de gradiente	[Hagan et al., 1996], [Riedmiller and Braun, 1993]

El proceso de entrenamiento finaliza cuando se activa la más restrictiva de las condiciones de finalización [Hagan et al., 1996, Jang et al., 1997]. Éstas pueden ser:

- Mínimo gradiente.
- Máximo número de incrementos en la validación.
- Tiempo máximo.
- Mínimo valor de la función de rendimiento (error).
- Máximo número de épocas de entrenamiento (iteraciones).

Sobre-entrenamiento y sub-entrenamiento de la red El sobre-entrenamiento de la red neuronal provoca que ésta produzca muy buen ajuste para los datos de entrenamiento, pero pierda capacidad de generalización, es decir, de adaptarse a otros conjuntos de datos, lo cual no es deseable. Normalmente, esto ocurre cuando el tamaño de la red es demasiado grande para la aplicación dada o el conjunto de entrenamiento es demasiado pequeño. Sin embargo, si el tamaño de la red es demasiado pequeño, se corre el riesgo de sub-entrenarla. Esto se produce cuando la red neuronal implementada no es suficientemente compleja para detectar correctamente los patrones en un conjunto de datos con ruido.

Para diseñar una red con capacidad de generalización, se incrementa iterativamente el número de neuronas que la componen para dividir adecuadamente el espacio de estimadores y resultados. Por otro lado, se establece una condición de parada, fijada en el punto en el cual el error del conjunto de validación aumenta, aún cuando el error del conjunto de entrenamiento sigue disminuyendo. Esta técnica se denomina *"interrupción temprana"* [Jang et al., 1997, Badescu, 2008].

Aproximadores universales

No todas las configuraciones de redes neuronales permiten realizar adecuadamente la función de aproximador universal. Para ello deben ser redes multicapa y tener por funciones de transferencia funciones derivables. La ventaja de utilizar múltiples capas reside en la posibilidad de combinar varias funciones de transferencia, lo que permite aproximar prácticamente cualquier función (con un número finito de discontinuidades).

Las principales redes neuronales que pueden actuar como aproximadores universales son:

- Perceptrón multicapa (MLPs).

- Redes neuronales de base radial (RBFs).
- Redes neuronales de regresión generalizada (GRNNs).

Estos modelos han sido aplicados con éxito en diversos casos para la modelización del recurso solar, tal y como indica la tabla 1.6.

Tabla 1.6: Utilización de redes neuronales en la modelización de energía solar.

Tipo de red	**Referencias**
MLP	[Mishra et al., 2008], [Rehman and Mohandes, 2008], [Khatib et al., 2011], [Chatterjee and Keyhani, 2012].
RBF	[Sfetsos and Coonick, 2000], [Mishra et al., 2008], [Mehleri et al., 2010].
GRNN	[Khatib et al., 2012a], [Celik and Muneer, 2013].

Perceptrón multicapa (MLP)

El modelo de red neuronal artificial de aprendizaje supervisado Perceptrón multicapa es una modificación del modelo original Perceptrón, en el cual se introducen una o varias capas ocultas. Esto le permite resolver problemas linealmente no separables, que era la principal limitación del modelo original [Rumelhart et al., 1986].

En particular, se denomina como modelo Perceptrón multicapa a aquella red neuronal alimentada hacia delante que se compone de una capa de entrada, una o varias capas ocultas, cuyas funciones de activación son de tipo sigmoidal, y una capa de salida, cuya función de activación es lineal. El número de neuronas de las capa de entrada y de salida está determinado por los espacios de los vectores de entrada y salida respectivamente. Es decir, habrá tantas neuronas de entrada, n, como dimensión tenga el espacio de entrada, $\mathbb{R}^n$, y tantas neuronas de salida, m, como dimensión tenga el espacio de salida, $\mathbb{R}^m$.

El modelo Perceptrón deriva del modelo matemático de neurona cerebral descrito en el apartado 1.8.2. La capa de entrada actúa como un conjunto de *"detección de características"*, que se activan al detectar determinados *"rasgos"* en las variables de entrada. La capa de salida permite mapear las características extraídas por la capa de entrada y la capas ocultas con el valor correspondiente a las variables de salida. Se muestra un esquema del modelo en la figura 1.14.

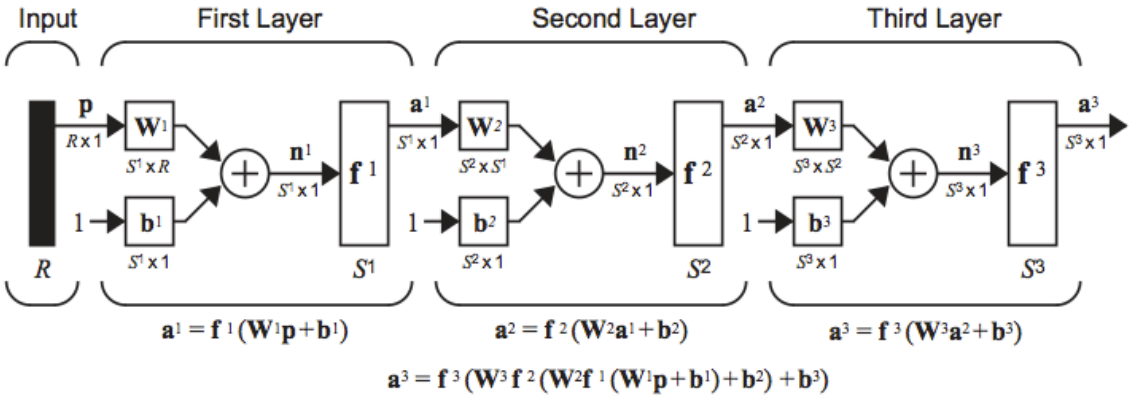


Figura 1.14: Red neuronal Perceptrón multicapa. Fuente: [Hagan et al., 1996].

Las redes Perceptrón multicapa se caracterizan porque las funciones de transferencia o activación de las neuronas de las capas ocultas son derivables, lo que permite aplicar la regla de aprendizaje de propagación hacia atrás. Estas funciones suelen ser de tipo sigmoidal, como la función logística, la función tangente hiperbólica o la función identidad.

Red neuronal con función de base radial (RBF)

Estas redes, denominadas en inglés *"Radial Basis Function Networks"* (RBFs), fueron introducidas por primera vez en 1988 por Broomhead y Lowe para minimizar los tiempos de aprendizaje de las redes Perceptrón multicapa [Broomhead and Lowe, 1988]. Se estructuran como una red de tres capas alimentadas siempre hacia adelante, y se caracterizan porque la función de activación de las neuronas de la capa oculta es una función de base radial. Estas funciones calculan la distancia euclídea de un vector de entrada $\mathbf{p}$ respecto de un centro c_i:

$$f_i(\mathbf{p}) = ||\mathbf{p} - c_i||, \tag{1.114}$$

de forma que a cada neurona de la capa oculta le corresponde una función de base radial, $\Phi_i(||\mathbf{p} - c_i||)$, y un peso de salida w_i^k. Este patrón de salida de la capa oculta, ingresa a una neurona de la capa de salida, que suma las entradas para dar lugar a la salida del modelo:

$$a_i^k(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{n} w_i^k \Phi_i(||\mathbf{p} - c_i||), \tag{1.115}$$

donde n es el número de neuronas de la k-ésima capa oculta.

En este modelo, que se representa en la figura 1.15, la capa de entrada transmite directamente las señales de entrada $\mathbf{p}$ a las neuronas de la capa oculta, sin realizar ningún procesamiento ni ponderación de pesos. La capa oculta hace una transformación local y

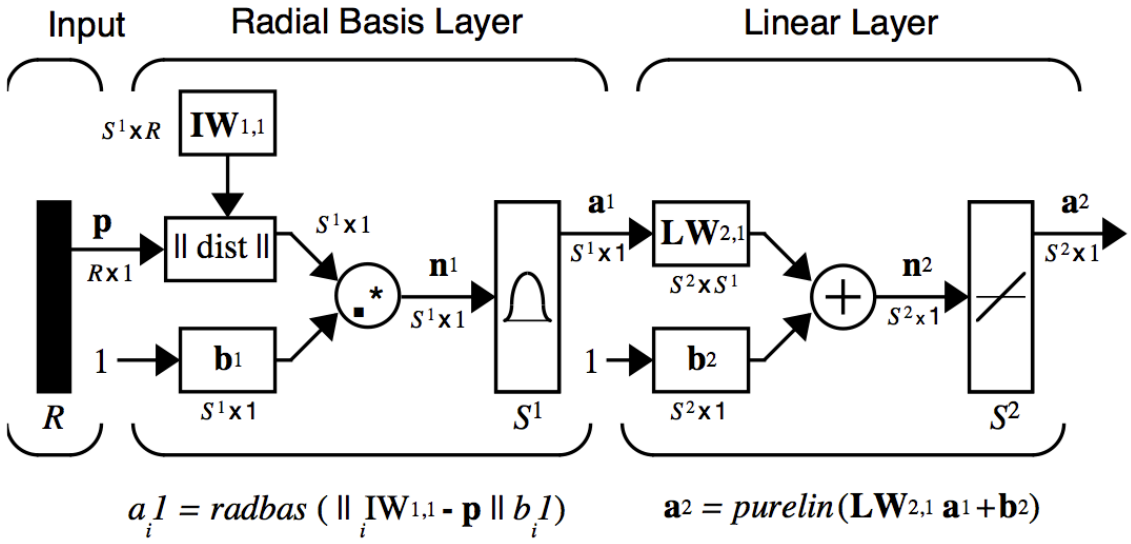


Figura 1.15: Red neuronal con función de base radial. Fuente: [Hagan et al., 1996].

no lineal de dichas señales, gracias a las funciones de base radial. Finalmente, la capa de salida combina linealmente las neuronas activadas en la capa oculta.

Como funciones de base radial típicas destacan la función gaussiana, la función multicuadrática y la función multicuadrática inversa, descritas en las ecuaciones (1.116), (1.117) y (1.118) respectivamente.

$$\Phi_i(||p_j - c_i||) = \exp\left(-\frac{||p_j - c_i||^2}{2\sigma^2}\right). \tag{1.116}$$

$$\Phi_i(||p_j - c_i||) = \sqrt{||p_j - c_i||^2 + \phi^2}. \tag{1.117}$$

$$\Phi_i(||p_j - c_i||) = \frac{1}{\sqrt{||p_j - c_i||^2 + \phi^2}}. \tag{1.118}$$

Los parámetros ϕ y σ son modificadores de la distancia radial.

Para definir el modelo se deben ajustar los centros de las funciones c_i, las desviaciones d_i, los pesos w_i^k, y los sesgos b_i^k. Esto se realiza mediante un mecanismo de aprendizaje híbrido, ya que el ajuste de los centros y desviaciones se realiza de forma no supervisada, y el de los pesos y sesgos, de forma supervisada. El número de centros, o lo que es lo mismo, de neuronas de la capa oculta, definirán el número de partes en las que se divide el espacio de la función. Esto es determinado por el investigador en base a las características de la función a aproximar. Para determinar las desviaciones, las amplitudes de cada región deben definirse de manera que cada neurona oculta se active en la región del espacio de entrada, pero el solapamiento de las zonas de activación sea lo más pequeño posible para suavizar la

interpolación. Para la definición de los centros dentro de cada subespacio, se pueden utilizar diferentes algoritmos, como el *"algoritmo de las k-medias"* [Jang et al., 1997]. En el ajuste de los pesos y umbrales se emplea la regla de propagación hacia atrás [Jang et al., 1997, Huang, 2009].

Red neuronal de regresión generalizada (GRNN)

Las redes neuronales de regresión generalizada, o en inglés *"Generalized Regression Neural Networks"* (GRNNs), son redes neuronales alimentadas hacia adelante, de aprendizaje supervisado, que pueden realizar regresiones lineales y no lineales [Specht, 1991]. Algunos autores las clasifican como un tipo de red neuronal con función de base radial, que integra características de las redes neuronales probabilísticas (PNNs) [Celik and Muneer, 2013]. La diferencia fundamental con las RBFs reside en que la matriz de pesos puede ser calculada de forma analítica sin necesidad de entrenamiento. Esto hace que su proceso de entrenamiento sea muy rápido (sólo precisa de una iteración) [Alavi et al., 2011]. Además únicamente requieren de tres parámetros para su configuración y presentan un nivel de precisión muy elevado gracias a la aplicación del criterio de riesgo bayesiano [Bolstad, 2004].

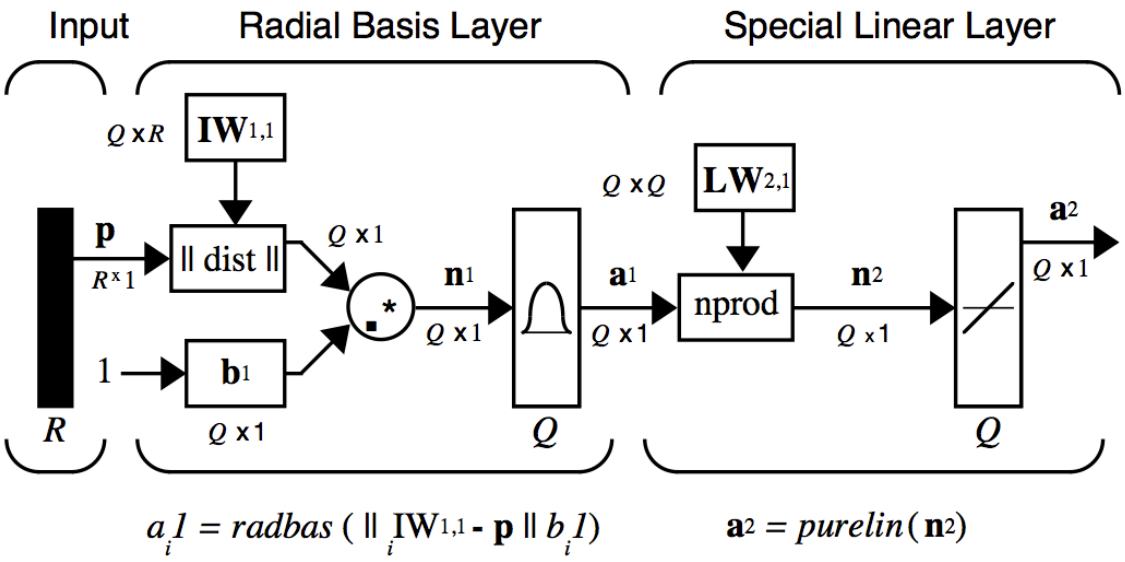


Figura 1.16: Red neuronal de regresión generalizada. Fuente: [Hagan et al., 1996].

La figura 1.16 muestra un esquema de la estructura de este tipo de redes. Se observa que se compone de dos capas [Wasserman, 1993, Cigizoglu and Alp, 2006]:

- La primera capa recibe el valor de los parámetros de entrada y actúa como una capa con funciones de base radial. Tiene tantas neuronas como pares entrada-objetivo en

p. Los sesgos toman el valor de $0.8326/\sigma$, siendo σ elegida por el usuario como la amplitud máxima. Representa la distancia entre un vector de entrada y el vector de pesos de una neurona y, normalmente, se asigna $\sigma = 0.5$. El valor de entrada a la función de base radial será el producto de la entrada ponderada más el sesgo. De esta forma, si el vector de pesos de una neurona es igual al vector de entradas (son traspuestos), la entrada ponderada a la función de base radial será 0 y la respuesta de la neurona será 1. En cambio, si el vector de pesos de la neurona es una distancia igual a σ respecto del vector de entradas, la entrada ponderada será igual a $n_{ij}^1 = \sqrt{-\log(0.5)} = 0.8326$ y, por lo tanto, la respuesta de la neurona será σ.

- La segunda capa también tiene tantas neuronas como pares de vectores de entrada-salida, pero los valores de entrada de la función de transferencia, que es lineal, se obtienen mediante el producto escalar de cada fila de $\mathbf{LW}^2$ por el vector de entradas en la capa $\mathbf{a}^1$. $\mathbf{LW}^k$ es la matriz de pesos de la capa k-ésima. Todos los elementos del vector $\mathbf{n}^2$ se normalizan dividiendo por la suma de los elementos de $\mathbf{a}^1$.

Cuanto mayor sea la amplitud σ, mayor será el área en torno al vector de entradas donde las neuronas de la primera capa responderán con salidas significativas. En cambio, si el valor de σ es demasiado pequeño, la función de base radial resultará muy escalonada, por lo que la neurona con el vector de pesos más próximo al de las entradas tendrá una respuesta mucho mayor que la de las otras neuronas. La red tenderá a responder con el vector de respuestas correspondiente al vector de entradas más próximo. Por otro lado, cuanto mayor sea σ, más suave será la pendiente de la función de base radial.

1.8.3. Redes neuroborrosas (ANFIS)

Las redes neuroborrosas combinan la capacidad de aprendizaje de las redes adaptativas junto con la flexibilidad de los modelos borrosos. Se componen de los siguientes elementos:

1. Entrada: contiene al vector de entradas o estimadores del modelo.
2. Etapa de fuzzyficación: convierte la entrada para que pueda ser usada por el modelo borroso.
3. Capa de reglas: desarrollan los procesos de inferencia borrosa.
4. Consecuentes: respuestas del sistema de inferencia.
5. Etapa de desfuzzyficación: transforma la respuesta borrosa en un valor exacto.

La incorporación de los métodos de aprendizaje de las redes adaptativas permite a estos modelos extraer patrones del conjunto de entrenamiento. Por otro lado, al incorporar el

sistema de inferencia borrosa, la respuesta de las neuronas de la red no es tan rígida como la que se obtiene al utilizar funciones de transferencia.

Uno de los modelos de esta clase más extendido es el modelo ANFIS (*"Adaptative-Network-Based Fuzzy Inference System"*) propuesto en [Jang, 1993].

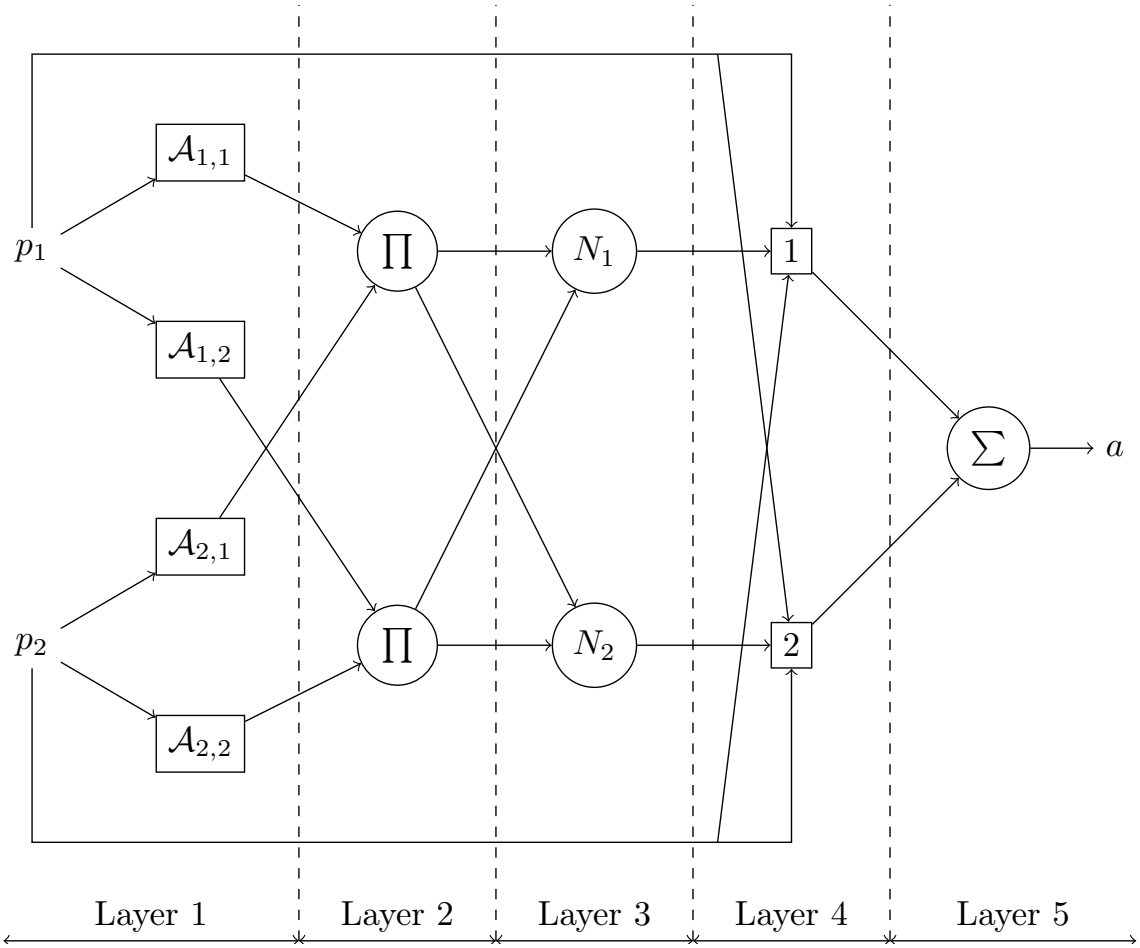


Figura 1.17: Esquema de red ANFIS con dos entradas, dos conjuntos borrosos, dos reglas y una salida. Adaptado de [Fombellida García, 2013].

El modo de inferencia borroso que se utiliza en este caso es el modelo Sugeno-Tsukamoto [Gupta et al., 1979]. Un sistema ANFIS con dos entradas o estimadores ($\mathbf{p} = [p_1, p_2]$), una única respuesta o salida (a) y dos reglas borrosas, se representa en la figura 1.17. Como se puede observar, el modelo se compone de cinco capas:

- La primera capa contiene nodos fijos con las funciones de pertenencia a los conjuntos borrosos $\mathcal{A}_{i,j}$. La salida de cada una de las neuronas de dicha capa es el valor de la

función de pertenencia a dicho conjunto:

$$a_k^1 = \mu_{\mathcal{A}_{i,j}}(p_i). \tag{1.119}$$

Las funciones de pertenencia más empleadas son las de campana y la gaussiana. Los parámetros que fijan estas funciones se denominan *"parámetros antecedentes"*.

- La segunda capa contiene tantos nodos adaptativos como reglas de inferencia se determinen. Normalmente se definen tantas reglas como conjuntos borrosos asociados a cada estimador. Éstas se modelan como el producto de los valores de los grados de pertenencia a los conjuntos borrosos:

$$a_l^2 = \prod_{k=1}^{m} a_k^2 = \prod_{i=1}^{n} \mu_{\mathcal{A}_{i,j}}(p_i) = w_l. \tag{1.120}$$

- Se incluye una tercera capa de normalización de las respuestas de la capa anterior, de forma que:

$$a_l^3 = \overline{w_l} = \frac{w_l}{\sum_{l=1}^{m} w_l}. \tag{1.121}$$

- La cuarta capa se compone de dos nodos fijos, que reciben como entradas las respuestas de la capa predecesora, o pesos normalizados, y los estimadores iniciales $\mathbf{p}$. La respuesta de la capa se calcula según:

$$a_l^4 = \overline{w_l} f_l(\mathbf{p}) = \overline{w_l}\mathbf{b}^T(\mathbf{p}, 1), \tag{1.122}$$

donde $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, \ldots, b_{n+1}\}$ es el conjunto de *"parámetros consecuentes"*.

- La quinta y última capa del modelo está formada por tantos nodos adaptativos como respuestas se pidan del modelo. Su misión es desfuzzyficar la respuesta del modelo. La salida final se evalúa como:

$$a_o^5 = \sum_{l=1}^{m} a_l^4 = \frac{\sum_{l=1}^{m} w_l f_l(\mathbf{p})}{\sum_{l=1}^{m} w_l}. \tag{1.123}$$

Para calcular los valores de los parámetros antecedentes y consecuentes, se debe aplicar un método de entrenamiento, que suele ser un híbrido entre el método del gradiente y el método de los mínimos cuadrados.

El entrenamiento de un sistema ANFIS consta de dos fases:

1. Entrenamiento hacia adelante: en esta fase se inicializan los valores de los parámetros de las funciones de pertenencia de la primera capa del modelo y se ajusta, por el método de los mínimos cuadrados, el valor de los parámetros consecuentes (en función del conjunto de respuestas).

2. Propagación de errores hacia atrás: el error generado por la respuesta del modelo es propagado hacia atrás mediante el método del gradiente, para reajustar el valor de los parámetros antecedentes.

El coste computacional del método de los mínimos cuadrados es bastante elevado, por lo que en ocasiones éste se sustituye por el método del gradiente también para el cálculo de los parámetros consecuentes.

Aunque es un modelo relativamente reciente, en los últimos años algunos autores ya lo han empleado con éxito para la modelización de la irradiancia solar [Sen et al., 2004, Rahoma, 2011, Sumithira and Kumar, 2012].

1.9. Modelos de albedo

Salvo que se disponga de dispositivos de apantallamiento (como el descrito en el apartado 6.8 para el dispositivo MK6) que bloqueen la irradiancia reflejada por el terreno y otros elementos del entorno, o se disponga de medidas precisas de irradiancia de albedo realizadas con albedómetros, la irradiancia solar difusa registrada por el piranómetro será la suma de la irradiancia solar difusa procedente del cielo y la irradiancia reflejada. En esta sección se evalúan cuatro modelos para la reflectancia aparente de albedo del terreno.

1.9.1. Modelo de Iqbal (isótropo constante)

Éste es el modelo más sencillo y supone un valor constante para el albedo del terreno independiente de cualquier otro parámetro. Como criterio general se toma que:

$$\rho = 0.2. \tag{1.124}$$

Sin embargo, existe una notable variación de este valor con el tipo de entorno y condiciones atmosféricas, como la presencia de nieve sobre el terreno, el espectro solar o la altura del Sol sobre el horizonte. También se demuestra que existe una fuerte dependencia de este valor con el contenido de humedad o el tipo de cultivo [Iqbal, 1983]. Diversos autores como Spencer [Spencer and Gaston, 1978], Iqbal [Iqbal, 1983], Saluja y Muneer

[Saluja and Muneer, 1988] o Gueymard [Gueymard, 1993] entre otros han realizado estudios sobre el valor de la reflectancia aparente de distintos tipos de terrenos. Los valores característicos de las superficies más comunes se encuentran reflejados en la tabla 1.7.

Tabla 1.7: Reflectancias aparentes comunes. Fuente: [Iqbal, 1983, Muneer, 2004].

Descripción del entorno	ρ [-]	**Descripción del entorno**	ρ [-]
Césped seco	$[0.15, 0.25]$	Hielo derretido sin nieve	$[0.46, 0.67]$
Césped fresco	0.26	Ladrillo	$[0.11, 0.74]$
Césped húmedo sin Sol	$[0.14, 0.26]$	Cemento	$[0.09, 0.35]$
Césped húmedo con Sol	$[0.33, 0.37]$	Asfalto	$[0.09, 0.18]$
Nieve recién caída	0.82	Mármol blanco	0.56
Nieve húmeda polvo	0.65	Madera	0.22
Nieve húmeda semi-polvo	0.56	Aluminio	0.85
Nieve húmeda gruesa	0.47	Acero galvanizado	0.35
Nieve compacta	$[0.66, 0.80]$	Acero oxidado	0.08
Nieve derretida	0.35	Cobre	0.74
Hielo sin nieve	$[0.4, 0.5]$	Pintura acrílica exteriores	$[0.46, 0.70]$

1.9.2. Modelo de Gueymard (isótropo con variación estacional)

Es una modificación del modelo isótropo constante, que sigue considerando una reflectancia isótropa pero como función polinómica de tercer grado de la latitud del lugar, ajustada para cada mes del año [Gueymard, 1993]. El conjunto de 12 funciones así descrito, permite estimar el valor de reflectancia aparente. En [Kambezidis et al., 1994], los autores indican que, estrictamente, no puede emplearse este modelo para evaluar el albedo local, pero aproximaciones realizadas muestran que tiene una precisión equiparable al modelo isótropo constante y se considera que es un modelo adecuado cuando se pretenden evaluar distintas ubicaciones u obtener un valor más preciso de la reflectancia aparente de una determinada zona climática, en ausencia de otras medidas.

Para latitudes geográficas entre 20° y 60°, este modelo propone la expresión:

$$\rho = a_0 + a_1\phi_g + a_2\phi_g^2 + a_3\phi_g^3, \tag{1.125}$$

siendo ϕ_g la latitud geográfica del lugar en grados y los valores de las constantes a_i con $i \in \{0, 1, 2, 3\}$ obtenidos por regresión lineal a partir de mediciones en Norte América en

[Gueymard, 1993], y que se muestran en la tabla 1.8.

Tabla 1.8: Valores de los coeficientes a_i para el modelo de reflectancias isótropa con variación estacional. Fuente: [Gueymard, 1993].

Mes	$\mathbf{a_0}$	$\mathbf{a_1}$	$\mathbf{a_2}$	$\mathbf{a_3}$
1	1.025	−6.612E-2	1.560E-3	−9.880E-6
2	−0.225	1.350E-2	0	0
3	1.025	−6.612E-2	1.560E-3	−9.880E-6
4	1.020	−5.650E-2	1.100E-3	−5.000E-6
5	1.545	−8.675E-2	1.600E-3	−7.500E-6
6	1.575	−9.075E-2	1.775E-3	−1.000E-5
7	1.545	−9.200E-2	1.925E-3	−1.250E-5
8	0.500	−1.600E-2	1.780E-4	0
9	1.545	−9.200E-2	1.925E-3	−1.250E-5
10	1.830	−1.135E-1	2.400E-3	−1.500E-5
11	1.020	−5.650E-2	1.100E-3	−5.000E-6
12	1.960	−1.253E-1	2.700E-3	−1.667E-5

Para latitudes menores de 30º, en [Gueymard, 1993] se propone la expresión:

$$\rho = -0.18 + 0.024\phi_g - 0.0004\phi_g^2. \tag{1.126}$$

1.9.3. Modelo de Kambezidis (anisótropo)

El modelo anisótropo presentado en [Nkemdirim, 1972, Arnfield, 1975, Arnfield, 1988, Kambezidis et al., 1994] considera que la reflectancia aparente del terreno es una función exponencial del ángulo cenital según:

$$\rho = a \exp\left(b\theta_{zs}\right), \tag{1.127}$$

donde a y b son coeficientes determinados empíricamente y que varían según sea el periodo de tiempo considerado, por la mañana o por la tarde. Dicho criterio se ha adoptado en este caso en función del ángulo acimutal, y sus valores se recogen en la tabla 1.9.

Cabe destacar que este modelo produce una alta fluctuación del valor de irradiancia reflejada horaria. Además, el valor promedio es considerablemente superior a la estimada por los modelos isótropos descritos anteriormente.

Tabla 1.9: Coeficientes a y b del modelo anisótropo. Fuente: [Kambezidis et al., 1994].

Ángulo acimutal	**a [-]**	**b [deg.$^{-1}$]**
$\gamma \leq 0$	0.244	0.00526
$\gamma > 0$	0.212	0.00891

1.9.4. Modelo de Gueymard (anisótropo semifísico)

En [Gueymard, 1987], Gueymard presenta un completo modelo de irradiancia para superficies inclinadas de tipo anisótropo. En la sección 1.6.4 se exponen las expresiones empleadas por este autor para la estimación de las irradiancias difusa y reflejada. En este punto se describen las consideraciones que realiza sobre la reflectancia. En su estudio de este parámetro continúa con las hipótesis de Ineichen [Ineichen, 1983], que considera que la reflectancia aparente del terreno, depende significativamente de la irradiancia directa incidente sobre éste. Así Gueymard propone un modelo de reflectancia aparente en el que ésta tiene una componente debida a la irradiancia directa y otra debida a la difusa según:

$$\rho = f_b \rho_b k_b + \rho_d \left(1 - k_b\right), \tag{1.128}$$

siendo f_b un coeficiente que determina si existe irradiancia directa o no sobre el terreno (por condiciones atmosféricas o por obstáculos en el entorno) y que toma los valores discretos $f_b = \{0, 1\}$, ρ_b es la reflectancia correspondiente a la irradiancia directa, k_b es fracción directa y ρ_d es la reflectancia correspondiente a la irradiancia difusa.

Para la reflectancia debida a la irradiancia directa, Gueymard propone la expresión:

$$\rho_b = \rho_n + F\left(f_{ab}, f_{af}\right) |\cos \Delta\gamma| \exp\left(-1.77 - 1.53h' - 3.61h'^2\right), \tag{1.129}$$

donde ρ_n es la reflectancia púramente isótropa debido a la irradiancia directa normal a una superficie, $F\left(f_{ab}, f_{af}\right)$ es una función que describe el carácter semi-isótropo de las superficies próximas y que está definida en la ecuación (1.130), $\Delta\gamma$ es el ángulo acimutal relativo de la superficie de estudio y h' es la elevación corregida relativa de los terrenos que producen la irradiancia de albedo, y que se describe mediante la ecuación (1.132).

$$F(f_{ab}, f_{af}) = \delta_{\Delta\gamma} f_{af} + \left(1 - \delta_{\Delta\gamma}\right) f_{ab}, \tag{1.130}$$

siendo f_{ab} y f_{af} los coeficientes de anisotropía que describen el incremento de reflectancia hacia atrás (*"backward"*) y hacia delante (*"forward"*). El efecto de dichos coeficientes se puede observar en la figura 1.18. Para césped, el autor afirma que se verifica que $f_{ab} + f_{af} = 2$, pero para otro tipo de superficies no tiene por qué cumplirse. La tabla 1.10 muestra los

valores de estos coeficientes de anisotropía para distintos materiales comunes. $\delta_{\Delta\gamma}$ es un coeficiente que toma el valor 1 si $\cos\Delta\gamma > 0$ y 0 en caso contrario.

$$\Delta\gamma = |\gamma_s - \gamma_p|. \tag{1.131}$$

$$h' = 0.01h = 0.01\left(90 - \theta'_{zs}\right). \tag{1.132}$$

El ángulo θ'_{zs} es el ángulo de incidencia de la irradiancia solar o ángulo cenital sobre la superficie reflectante.

Tabla 1.10: Coeficientes del modelo de Gueymard. Fuente: [Gueymard, 1987].

Superficie	$\mathbf{f_{ab}}$	$\mathbf{f_{af}}$	$\rho_\mathbf{d} - \rho_\mathbf{n}$
Césped	1	1	0.046
Nieve fresca	0	2	0.046
Campo arado	1	0	0.023
Cemento	0.25	0.25	0.012

Las reflectancias normal (ρ_n) y difusa (ρ_d), aunque ambas de carácter isótropo, están relacionadas por los coeficientes de anisotropía y la integración del $\cos\Delta\gamma$ dando lugar a:

$$\rho_d = \rho_n + 0.023\left(f_{ab} + f_{af}\right). \tag{1.133}$$

La tabla 1.10 recoge en su última columna los valores de estas diferencias para las superficies más comunes estudiadas por Gueymard. Hay que tener en cuenta que el valor de ρ_d es el equivalente al de la reflectancia aparente (ρ) dado por los otros modelos.

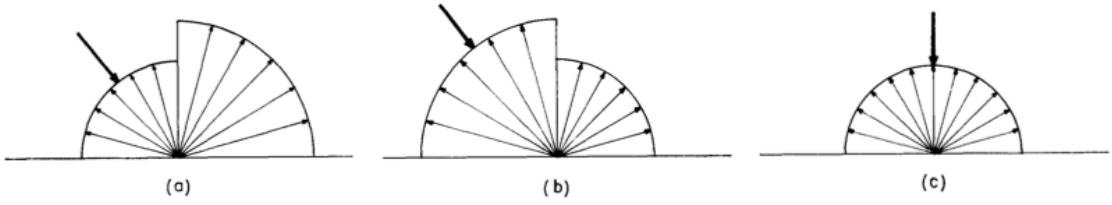


Figura 1.18: Patrones de radiación reflejada por superficies aproximadamente isótropas. (a) Reflexión hacia adelante aumentada. (b) Reflexión hacia atrás aumentada. (c) Reflexión isótropa con iluminación cenital. Adaptado de [Gueymard, 1987].

Capítulo 2

Corrección de las medidas de irradiancia difusa

2.1. Introducción

En este capítulo se analiza el factor necesario para corregir las medidas tomadas mediante anillo de sombra debido a la influencia que éste ejerce sobre la propia medida. Este factor se expresa entonces como la relación entre la medida corregida y la medida directa tomada por el equipo, siguiendo la expresión:

$$f_c = \frac{D_c(\theta_{zp}, \gamma_p)}{D_{uc}(\theta_{zp}, \gamma_p)}, \tag{2.1}$$

donde D_c es la medida de irradiancia difusa corregida y D_{uc} es la medida sin corregir.

El anillo influye en la medida en el sentido en que evita la incidencia de irradiancia directa en el sensor y, por lo tanto, permite la medida directa en éste, de la suma de irradiancia difusa y reflejada (la irradiancia de albedo puede suprimirse si se instalan los equipos de protección correspondientes), supone una obstrucción en el ángulo de visión del sensor, en función de su ángulo de inclinación. La fracción de bóveda celeste observada, así como la proporción de la misma que oculta el anillo u otros obstáculos en el horizonte, se analiza mediante el denominado *"factor de visión del cielo"* que se describe en la primera sección de este capítulo. Por otro lado, una vez determinada la obstrucción del campo de visión del sensor, se debe cuantificar la cantidad de irradiancia que el obstáculo ha impedido que llegue al mismo. Si se considera una distribución isótropa de la irradiancia difusa en la atmósfera, sólo será necesario un análisis geométrico, que sólo se ha encontrado desarro-

llado para el plano horizontal y/o inclinado en la dirección ecuatorial, mientras que aquí se expone un análisis generalizado para cualquier orientación e inclinación del sensor. Al factor que determina esta corrección se le denomina *"factor de corrección geométrico o isótropo"*. No obstante, se sabe que la distribución de la radiancia difusa no es homogénea, especialmente en los días despejados con cielos claros. Es necesario realizar una corrección que también tenga en cuenta los efectos anisótropos de la distribución de radiancia, como los que se producen en la región circunsolar o en las proximidades del límite del horizonte. Se determina así el *"factor de corrección total"*. Varios autores han determinado expresiones para cuantificar este último factor, pero nuevamente sólo describen dichos modelos para el caso de sensores en el plano horizontal o inclinado en la dirección ecuatorial. Se proponen entonces las expresiones de dichos modelos generalizadas para cualquier inclinación y orientación del sensor de medida.

2.2. Factor de visión del cielo

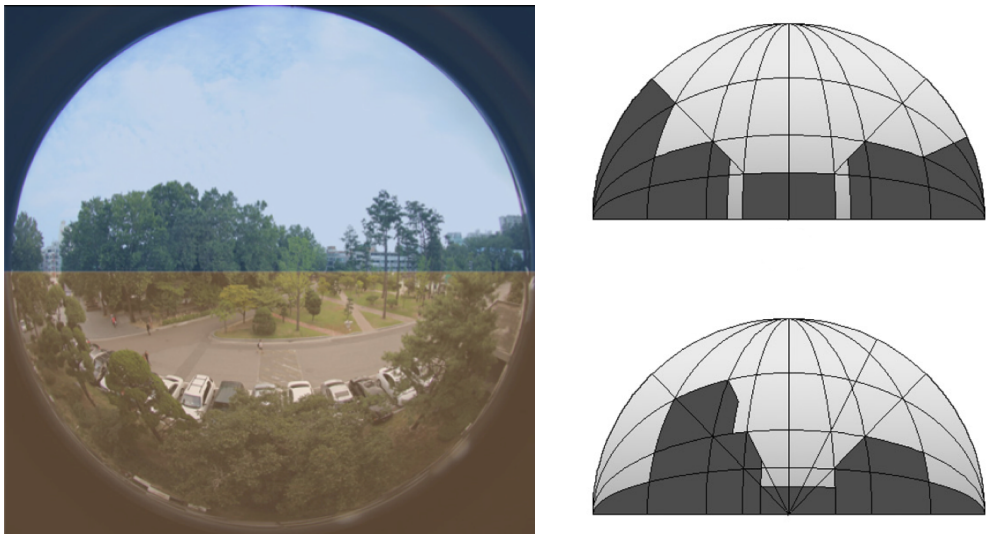
A la hora de evaluar la irradiancia incidente sobre una superficie, es necesario definir la fracción de cielo que ésta observa. Se entiende que una superficie horizontal observa la bóveda celeste completa, mientras que una superficie inclinada observará una parte proporcional. La parte complementaria observada por dicha superficie inclinada será el terreno circundante, que emitirá irradiancia reflejada o de albedo. Así, a la proporción de ángulo sólido de cielo observado por una determinada superficie se le denomina *"factor de visión del cielo"* [Rakovec and Zakšek, 2012]. Los modelos isótropos de Liu & Jordan y de Tian et al. (descritos en las secciones 1.5.1 y 1.5.2 respectivamente) en el fondo, son definiciones del factor de visión del cielo para horizontes libres de obstáculos y teniendo en cuenta el ángulo de incidencia de la irradiancia sobre la superfice. Únicamente se diferencian en cómo consideran dicha proporción observada (sobre la proyección en la superficie inclinada, o sobre la superficie esférica de la semi-esfera observada).

Por otro lado, en [Ivanova, 2013, Ivanova, 2014] se introduce el concepto de *"factor de visión anisótropo"*. Éste se define como la proporción entre la irradiancia difusa de fondo de un cielo anisótropo parcialmente obstruido (por la presencia de obstáculos en el horizonte) incidente en una superficie inclinada, respecto de la irradiancia difusa de fondo medida en el plano horizontal con un cielo anisótropo sin obstrucciones. Para su cálculo se hace uso de proyecciones estereográficas. Una proyección estereográfica es la proyección de una esfera en un plano (véase la figura 2.1). Así, si se proyecta la bóveda celeste en un plano horizontal, se obtiene un círculo unitario (de radio la unidad y área π). Considerando una distribución uniforme de radiancia de fondo, el factor de visión del cielo de un segmento del cielo se corresponde con la proporción de la proyección estereográfica de dicho segmento respecto a π. Otros autores, como [Casares et al., 2014], experimentan con otro tipo de

proyecciones, como la polar, la lambertiana o la ortogonal. Casares et al. además ofrecen una expresión unificada independiente del tipo de proyección, para facilitar el tratamiento matemático.

El factor de visión anisótropo completa al factor de visión del cielo clásico en dos sentidos:

1. Considera efectos de anisotropía. En las formulaciones deducidas en [Ivanova, 2013, Ivanova, 2014] la anisotropía se evalúa a partir del modelo de Muneer (descrito en el apartado 1.6.8).
2. Permite evaluar horizontes con obstáculos mediante la integración de las proyecciones estereográficas de los obstáculos correspondientes.



(a) Fotografía en proyección esférica desde un paramento vertical.

(b) Ejemplos de análisis y descomposición de proyecciones estereográficas.

Figura 2.1: Ejemplos de toma y análisis de proyecciones estereográficas. Fuente: [Yoon et al., 2014, Ivanova, 2014].

La caracterización del factor de visión del cielo, resulta fundamental para determinar el potencial fotovoltaico en sistemas como los BIPV, como se muestra en diversos trabajos como por ejemplo [Papadakis et al., 2001, Compagnon, 2004, Yoon et al., 2014].

En nuestro caso, al medir la irradiancia solar difusa mediante un piranómetro, inclinado, orientado, y sombreado, el factor de visión del cielo juega un papel fundamental para corregir la medida tomada. Esta medida está distorsionada por el hecho de que un obstáculo, el anillo de sombra, impide que llegue parte de la irradiancia difusa al sensor. Esta proporción de la irradiancia difusa depende de la fracción de cielo observado por el sensor

debido a su propia inclinación, y a la proporción del segmento de cielo oculto por el anillo. Además, debe tenerse en cuenta que la irradiancia incidente sobre el plano depende del coseno del ángulo de incidencia. Bajo estas consideraciones se deriva el factor de corrección geométrico, que resulta precisamente, ser el inverso de dicho ratio. Este factor debe corregirse para tener en cuenta las condiciones anisótropas del cielo, dando lugar al factor de corrección total.

2.3. Factor de corrección geométrico

El factor de corrección geométrico o isótropo extrapola el valor de irradiancia difusa medido por un piranómetro con anillo de sombra al que mediría con un dispositivo ideal de ancho nulo salvo en la región circunsolar. El campo de visión de un piranómetro plano es de 2π sr menos la región oculta por el anillo o banda de sombreamiento, x. Si se considera despreciable el reflejo interno que pudiera generar dicho elemento, se define el factor de corrección geométrico, f_{cg}, como:

$$f_{cg} = \frac{D_c}{D_{uc}} = \frac{2\pi}{2\pi - x} = \frac{1}{1 - \dfrac{x}{2\pi}} = \frac{1}{1 - S}, \tag{2.2}$$

siendo S la fracción de irradiancia difusa isótropa bloqueada por el anillo. Por definición, dicha fracción puede expresarse como:

$$S = \frac{D_a(\theta_{zp}, \gamma_p) + R_{ga}(\theta_{zp}, \gamma_p)}{D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p)}, \tag{2.3}$$

donde el subíndice a indica las componentes de irradiancia incidentes sobre el anillo. La componente difusa, D, es la irradiancia procedente del cielo y la componente reflejada, R, es la irradiancia procedente del suelo.

El diferencial de irradiancia incidente sobre una franja diferencial de la bóveda celeste puede expresarse como:

$$dD_a + dR_{ga} = I_{sky} \cos\theta_{sp} V \cos\delta_s d\omega + I_g \cos\theta_{sp} V \cos\delta_s d\omega, \tag{2.4}$$

siendo θ_{sp} el ángulo entre los vectores directores de la banda del anillo (si éste se encuentra en la posición correcta, debería situarse en el plano de la eclíptica) y de la superficie del sensor, V es el ángulo transversal de la franja estudiada observada por el propio sensor (véase la figura 2.2) e I es la radiancia. El subíndice sky hace referencia a la irradiancia procedente de la bóveda celeste y el subíndice g a la procedente del terreno.

Si se supone isótropa la radiancia procedente del cielo, entonces se demuestra que la irradiancia global sobre un plano horizontal, $G(0)$, se puede calcular mediante:

$$G(0) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{sky} \cos\theta \sin\theta d\theta d\gamma = \pi I_{sky}. \tag{2.5}$$

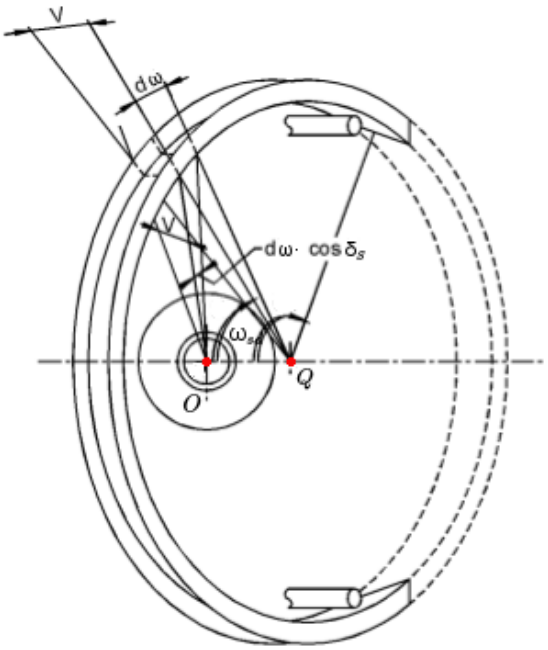


Figura 2.2: Vista en planta de un anillo de sombra genérico.

Ahora, si suponemos que esta radiancia, tanto proveniente del cielo (I_{sky}) como reflejada del suelo (I_g), tienen un carácter isótropo, se puede establecer la relación:

$$I_g = \frac{\rho G(0)}{\pi} = \frac{\rho(D(0)/k_d)}{\pi} = \frac{\rho}{k_d} I_{sky}. \tag{2.6}$$

Introduciendo (2.6) en (2.4) e integrando adecuadamente obtenemos el numerador de la ecuación (2.3):

$$\begin{aligned} D_a(\theta_{zp}, \gamma_p) + R_{ga}(\theta_{zp}, \gamma_p) = V I_{sky} \cos\delta_s \left(\int_{\omega_2}^{\omega_3} \cos\theta_{sp} d\omega + \int_{\omega_4}^{\omega_5} \cos\theta_{sp} d\omega \right) \\ + \frac{\rho}{k_d} V I_{sky} \cos\delta_s \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos\theta_{sp} d\omega + \int_{\omega_5}^{\omega_6} \cos\theta_{sp} d\omega \right), \end{aligned} \tag{2.7}$$

donde ω_i, con $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, son los límites de integración que se fijan en función de la orientación e inclinación del plano del sensor y cuya descripción detallada se realiza en el apartado 2.3.2. Es necesario definir 6 límites en la expresión generalizada pues el plano del sensor, el plano horizontal y el plano del anillo pueden generar hasta 6 ángulos horarios de intersección respecto del centro del sensor, O, no siempre simétricos con el plano meridiano.

El denominador de la expresión (2.3) se obtiene aplicando el modelo de distribución isótropa de la radiancia, detallado en el apartado 1.5.1, y de acuerdo con las ecuaciones (1.9), (1.16) y (1.11) podemos determinar:

$$\begin{aligned} D(\theta_{zp},\gamma_p)+R(\theta_{zp},\gamma_p) = {} & I_{sky}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{0}^{\theta_\gamma}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma' \\ & + I_{sky}\int_{\pi/2}^{3\pi/2}\int_{0}^{\pi/2}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma' \\ & + \frac{\rho}{k_d} I_{sky}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{\theta_\gamma}^{\pi/2}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma'. \end{aligned} \tag{2.8}$$

$$D(\theta_{zp},\gamma_p)+R(\theta_{zp},\gamma_p) = I_{sky}\pi\left(\frac{1+\cos\theta_{zp}}{2}+\frac{\rho}{k_d}\frac{1-\cos\theta_{zp}}{2}\right). \tag{2.9}$$

Al realizar el cociente de (2.7) entre (2.8) el valor de la radiancia I_{sky} puede eliminarse de la expresión (2.3). El factor de corrección geométrico queda entonces expresado únicamente en función de los ángulos de inclinación, θ_{zp}, y orientación, γ_p, del sensor, el ángulo transversal de la banda del anillo, V, la reflectancia aparente del terreno circundante, ρ, y la fracción difusa horizontal, k_d.

2.3.1. Ángulo transversal del anillo

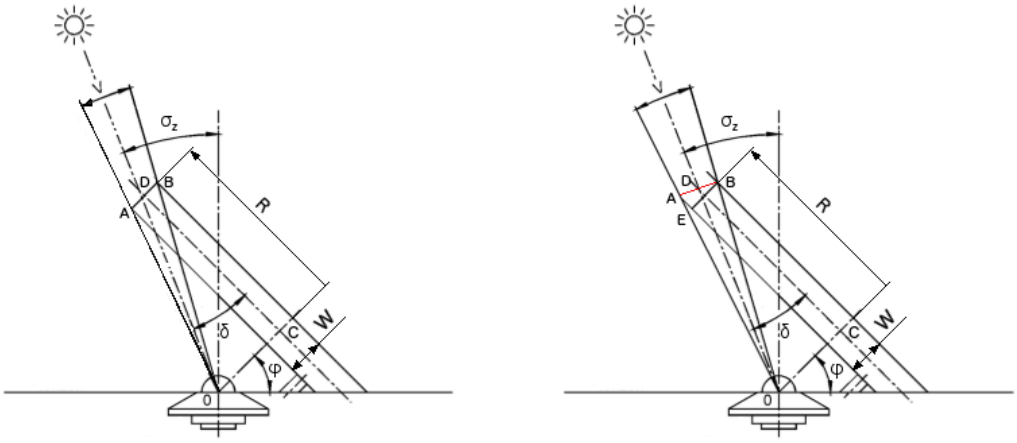
Se denomina ángulo transversal del anillo a aquel que corresponde al de la visual del espesor de la banda del anillo de sombra por parte del sensor correspondiente. Este ángulo, que puede observarse representado en las figuras 2.2 y 2.3, depende de la sección del propio anillo, por lo que se puede distinguir dos casos principales:

Perfil en I o banda plana: es el perfil más común dado que la sección transversal del anillo es un rectángulo de ancho e_a despreciable en comparación con la altura del mismo ($W_a >> e_a$).

Según la figura 2.4 podemos deducir que el ángulo transversal para este caso es:

$$V_I = 2\frac{V_I}{2} \approx 2\tan\frac{V_I}{2} \approx 2\frac{\frac{W_a}{2}\cos\delta_s}{\frac{R_a}{\cos\delta_s}+\frac{W_a}{2}\sin\delta_s}, \tag{2.10}$$

siendo W_a el ancho de la banda del anillo, R_a el radio promedio del mismo ($R_a = R_{a,int} + e_a/2 \approx R_{a,int}$) y δ_s la declinación solar. Como el valor máximo de la declinación solar $|\delta_s| \leq 23^o27'$, el segundo sumando del denominador de (2.10) es



(a) Perfil en I. (b) Perfil en U.

Figura 2.3: Esquema del ángulo transversal del anillo de sombra observado por el sensor.

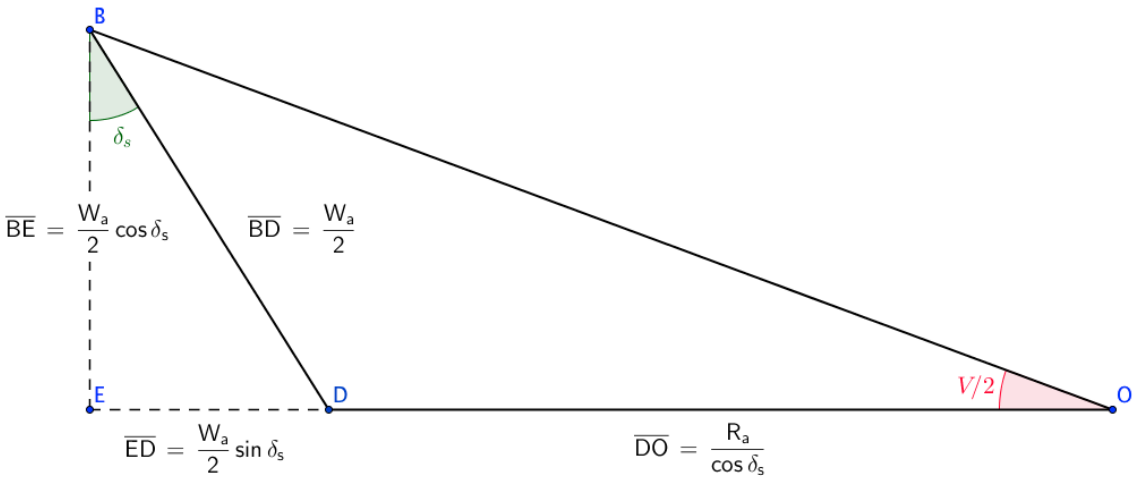


Figura 2.4: Esquema geométrico del perfil en I.

despreciable respecto al primero, con lo que la expresión queda:

$$V_I \approx 2\frac{\frac{W_a}{2}\cos\delta_s}{\frac{R_a}{\cos\delta}} = \frac{W_a}{R_a}\cos^2\delta_s = \psi\cos^2\delta_s, \tag{2.11}$$

donde ψ es el ratio entre el ancho, W_a, y el radio, R_a, del anillo y es un factor de referencia a la hora del diseño del mismo pues cuanto mayor sea éste, menor será la frecuencia de cambios necesaria para el anillo, pero mayor será la aberración introducida por el mismo.

Perfil en U: es un perfil que, como su propio nombre indica, tiene forma de U teniendo la abertura hacia el exterior. Fue introducido por algunos fabricantes de anillos de sombra [Kipp and Zonen, 2014] pues se comprueba que permite disminuir la inestabilidad del factor de corrección geométrico al generar un ángulo transversal, V, prácticamente constante a lo largo de todo el año e independiente de la declinación solar, δ_s, siempre y cuando la longitud de los labios o alas, s_U, cumpla determinadas condiciones.

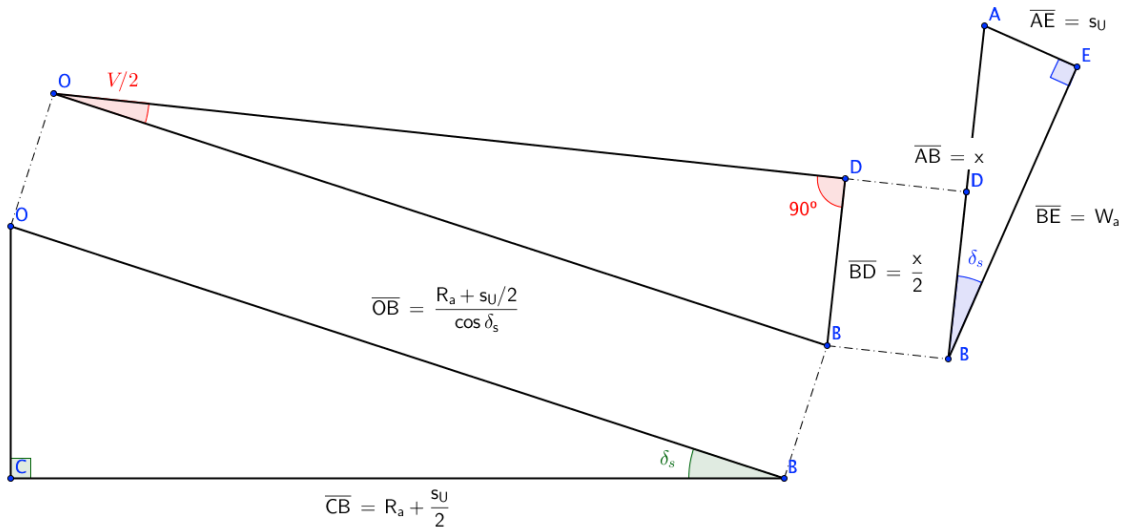


Figura 2.5: Esquema geométrico del perfil en U.

En este caso, analizando la figura representativa 2.5, el ángulo transversal visto por el sensor, V_U, se puede definir mediante:

$$V_U = 2\frac{V_U}{2} \approx 2\sin\frac{V_U}{2} = \frac{\sqrt{W_a^2 + s_U^2}\cos\delta_s}{R_a + \frac{s_U}{2}}. \tag{2.12}$$

Si el diseño del perfil en U es correcto se debe verificar que se cumple la condición:

$$\frac{s_U}{W_a} \geq \tan\delta_s \Rightarrow \frac{s_U}{W_a} \geq 0.4338, \tag{2.13}$$

para poder aprovechar durante todo el año el ancho virtual generado por el ala del anillo de longitud s_U. Si esta condición se verifica, se puede simplificar la ecuación (2.12) en los siguientes términos:

$$V_U \approx \frac{\dfrac{W_a}{\cos\delta_s}\cos\delta_s}{R_a + \dfrac{W_a \tan\delta_s}{2}} \approx \frac{W_a}{R_a} \approx \psi, \tag{2.14}$$

pues al ser $|\delta_s| \leq 23^o27'$, se puede despreciar el segundo sumando respecto al primero en el denominador. Como se puede observar, esta expresión del ángulo transversal es más estable que la dada para el perfil en I por (2.11), al ser independiente de la declinación solar, δ_s.

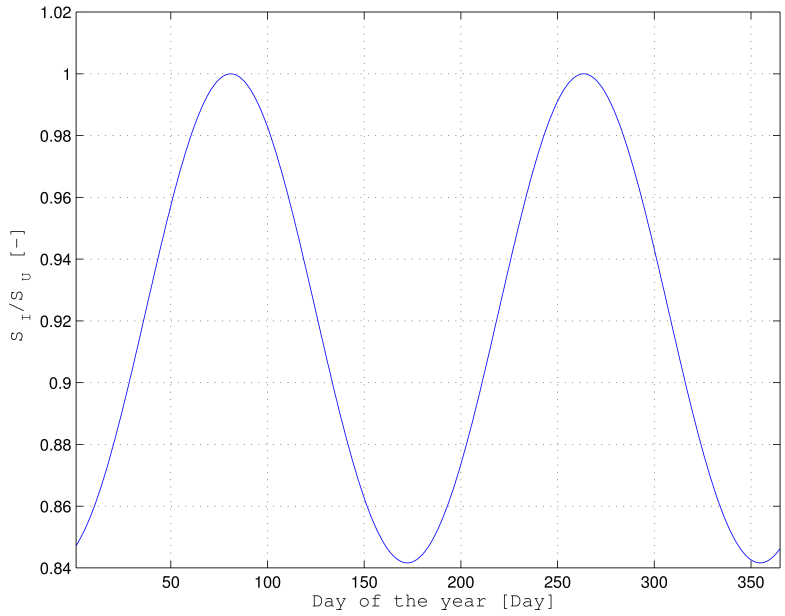


Figura 2.6: Cociente entre las fracciones sombreadas perfil en I respecto del perfil en U.

La relación de las fracciones sombreadas entre los dos tipos de anillo es:

$$\frac{S_I}{S_U} = \cos^2\delta_s, \tag{2.15}$$

relación que aparece representada gráficamente en la figura 2.6 y donde podemos apreciar claramente que las máximas diferencias tienen lugar en los solsticios de las estaciones de verano e invierno, siendo la fracción sombreada por el anillo en I hasta un 16 % menor que la de un anillo en U para la misma relación ψ.

2.3.2. Límites de integración

Los límites de integración ω_i con $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ corresponden con los ángulos horarios, medidos en el plano del anillo (plano de la eclíptica), con centro el del anillo, Q_i, y que constituyen las intersecciones más restrictivas entre tres planos, a saber:

- El plano del anillo.
- El plano del sensor (sobre el que apoya el piranómetro correspondiente).
- El plano horizontal.

Así, es preciso definir: la intersección del anillo con el plano del sensor, la intersección del anillo con el plano horizontal y la intersección del plano del sensor con el plano horizontal. Mientras que las dos últimas resultan prácticamente triviales, para el cálculo de la intersección entre el plano del sensor y el plano del piranómetro se precisa un análisis geométrico más profundo ya que las expresiones utilizadas por la mayoría de autores sólo son válidas para el caso particular de que el piranómetro esté inclinado en la dirección ecuatorial (eje Norte-Sur).

Intersección entre el plano del piranómetro y el plano horizontal

Para un ángulo de inclinación del piranómetro $\theta_{zp} \neq 0$, en coordenadas horizontales, la intersección con el plano horizontal queda definida por:

$$\gamma_{1a} = \gamma_p - \frac{\pi}{2}, \tag{2.16}$$

$$\gamma_{2a} = \gamma_p + \frac{\pi}{2}. \tag{2.17}$$

Dichos ángulos los podemos expresar en coordenadas horarias o ecuatoriales mediante la aplicación de la matriz de cambio de base (A.31) quedando:

$$\omega_{1a} = \arcsin -\frac{\cos \gamma_p}{\cos \delta_s}, \tag{2.18}$$

$$\omega_{2a} = \pi - \arcsin \frac{\gamma_p}{\cos \delta_s}. \tag{2.19}$$

Sólo existe un caso particular de esta intersección, que se produce cuando el sensor está en el propio plano horizontal y ambos planos son coincidentes. En este caso, el ángulo acimutal γ_p puede tomar cualquier valor.

Intersección entre el plano del anillo y el plano horizontal

La intersección entre el plano del anillo, Π_r, y el plano horizontal, Π_0, ha de ser la misma que la intersección entre el plano de la eclíptica y el plano horizontal, que se obtiene de definir un ángulo cenital $\theta_{zs} = 90^{\text{o}}$ en la ecuación (A.29), quedando entonces:

$$\omega_{1b} = -\omega_{sd} = -|-\tan\phi_g \tan\delta_s|, \tag{2.20}$$

$$\omega_{2b} = \omega_{sd} = +|-\tan\phi_g \tan\delta_s|. \tag{2.21}$$

Cuando se alcanza cierta latitud geográfica, es posible que en determinados periodos del año, el plano del anillo no llegue a intersectar nunca con el plano horizontal, es decir:

$$|-\tan\phi_g \tan\delta_s| > 1. \tag{2.22}$$

En estos casos, se debe aplicar:

$$\omega_{sd} = \begin{cases} 0 & \text{si } \tan\phi_g \tan\delta_s < -1, \\ \pi & \text{si } \tan\phi_g \tan\delta_s > 1. \end{cases} \tag{2.23}$$

Intersección entre el plano del anillo y el plano del sensor

El plano del sensor, Π_p, puede definirse a partir de su vector director $\mathbf{p}$ y un punto de referencia O, que será el centro del propio sensor:

$$\Pi_p : p_x(x - O_x) + p_y(y - O_y) + p_z(z - O_z) = 0, \tag{2.24}$$

siendo:

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta_{zp}\cos\gamma_p \\ -\sin\theta_{zp}\sin\gamma_p \\ \cos\theta_{zp} \end{pmatrix}. \tag{2.25}$$

$$O = \begin{pmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{2.26}$$

Para expresar todos los términos en coordenadas horizontales, las coordenadas de un punto cualquiera del anillo, $\mathbf{r}'$, se deben transformar de coordenadas horarias a horizontales mediante la matriz (A.32) y el vector desplazamiento $\overline{QO}$ definido desde el centro del

anillo, Q, al centro del sensor, O:

$$\begin{aligned}
\mathbf{r} &= \mathbf{M}_{\mathbf{y}'}\mathbf{r}' + \overline{QO}, \\
\begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \text{sign}(\phi_g)\sin\phi_g & 0 & \cos\phi_g \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sign}(\phi_g)\cos\phi_g & 0 & \sin\phi_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_a\cos\omega \\ -R_a\sin\omega \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -R_a\tan\delta_s\cos\phi_g \\ 0 \\ R_a\tan\delta_s\sin\phi_g \end{pmatrix}, \\
\begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} &= R_a \begin{pmatrix} \text{sign}(\phi_g)\sin\phi_g\cos\omega - \cos\phi_g\tan\delta_s \\ -\sin\omega \\ \text{sign}(\phi_g)\cos\phi_g\cos\omega + \sin\phi_g\tan\delta_s \end{pmatrix}.
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Sustituyendo (2.27) en (2.24) obtenemos finalmente la ecuación de la intersección entre ambos elementos:

$$\begin{aligned}
&\sin\theta_{zp}\cos\gamma_p R_a(\text{sign}(\phi_g)\sin\phi_g\cos\omega - \cos\phi_g\tan\delta_s) \\
&\quad + \sin\theta_{zp}\sin\gamma_p R_a\sin\omega + \cos\theta_{zp}R_a(\text{sign}(\phi_g)\cos\phi_g\cos\omega + \sin\phi_g\tan\delta_s) = 0.
\end{aligned} \tag{2.28}$$

Si el radio del anillo es no nulo ($R_a \neq 0$) y $\cos\phi_g \neq 0 \Rightarrow |\phi_g| \neq 90^o$, entonces podemos escribir la ecuación (2.28) en la forma:

$$A\cos\omega + B\sin\omega = C, \tag{2.29}$$

siendo A, B y C definidos en las siguientes expresiones:

$$A = \tan\phi_g\sin\theta_{zp}\cos\gamma_p + \cos\theta_{zp}, \tag{2.30}$$

$$B = \frac{\sin\theta_{zp}\sin\gamma_p}{\cos\phi_g}, \tag{2.31}$$

$$C = \tan\phi_g\tan\delta_s\cos\theta_{zp} + \tan\delta_s\sin\theta_{zp}\cos\gamma. \tag{2.32}$$

La ecuación (2.29) puede resolverse aplicando el cambio de variable: $\lambda = \cos\omega$, quedando entonces la siguiente resolución:

$$A\lambda + B\sqrt{1-\lambda^2} = C \tag{2.33}$$

$$-\frac{A}{B}\lambda + \frac{C}{B} = \sqrt{1-\lambda^2} \tag{2.34}$$

$$\frac{A^2}{B^2}\lambda^2 - \frac{2AC}{B^2}\lambda + \frac{C^2}{B^2} = 1 - \lambda^2 \tag{2.35}$$

$$\frac{A^2+B^2}{B^2}\lambda^2 - \frac{2AC}{B^2}\lambda + \frac{C^2-B^2}{B^2} = 0 \tag{2.36}$$

$$(A^2+B^2)\lambda^2 - 2AC\lambda + (C^2-B^2) = 0, \tag{2.37}$$

resultando una ecuación de segundo grado en función de λ, cuya solución es:

$$\lambda = \frac{AC \pm B\sqrt{A^2+B^2-C^2}}{A^2+B^2}, \tag{2.38}$$

por lo que las dos posibles intersecciones entre el anillo y el plano del piranómetro son:

$$|\omega_{1c}| = \arccos \frac{AC + B\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2}, \tag{2.39}$$

$$|\omega_{2c}| = \arccos \frac{AC - B\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2}. \tag{2.40}$$

El signo de ω_{ic}, con $i \in \{1, 2\}$, se determina mediante:

$$\omega_{ic} = \begin{cases} -|\omega_{ic}| & \text{si } (A > 0 \cup B > 0) \cap (A \geq B), \\ +|\omega_{ic}| & \text{en otro caso.} \end{cases} \tag{2.41}$$

Podría darse el caso particular de que el sensor estuviese en un plano paralelo al del anillo ($\theta_{zp} = \theta_{zr} = \pi/2 - \phi_g$ y $\gamma_p = -\pi$), y por lo tanto la intersección de ambos planos no se produciría. Esta situación provoca que $A^2 + B^2 - C^2 < 0$, y λ no puede tomar una solución real en (2.38). Ante tal particularidad debemos adoptar el siguiente criterio:

$$\omega_{1c} = \begin{cases} 0 & \text{si } \tan\phi_g \tan\delta_s < 0, \\ -\pi & \text{si } \tan\phi_g \tan\delta_s > 0. \end{cases} \tag{2.42}$$

$$\omega_{2c} = \begin{cases} 0 & \text{si } \tan\phi_g \tan\delta_s < 0, \\ \pi & \text{si } \tan\phi_g \tan\delta_s > 0. \end{cases} \tag{2.43}$$

2.3.3. Reglas generales para la definición de los límites

Los límites de integración quedan entonces definidos como las condiciones más restrictivas de las tres intersecciones definidas anteriormente. Además, debemos tener en cuenta que el anillo puede atravesar los planos horizontal y del sensor hasta 2 veces, por lo que es preciso definir hasta 6 límites. La tabla 2.1 recoge las reglas generalizadas para la elección de los 6 límites de integración a aplicar en la ecuación (2.7). Obsérvese que ω_{ia} no interviene en ningún caso, pues se verifica que:

$$\omega_{1a} \leq \omega_{1c} \text{ y } \omega_{2a} \geq \omega_{2c}, \forall \omega_i \in [-\pi, \pi], \tag{2.44}$$

por lo que:

$$\text{máx}(\omega_{1a}, \omega_{1c}) = \omega_{1c} \text{ y } \text{mín}(\omega_{2a}, \omega_{2c}) = \omega_{2c}, \forall \omega_i \in [-\pi, \pi]. \tag{2.45}$$

Para el caso de sensores colocados en planos verticales orientados según las direcciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste, los límites de integración se recogen en la tabla 2.2.

Tabla 2.1: Reglas generalizadas para el cálculo de los límites de integración.

Límite	$\omega_{\mathbf{1c}} \leq \omega_{\mathbf{2c}}$	$\omega_{\mathbf{1c}} > \omega_{\mathbf{2c}}$
ω_1	ω_{1c}	$-\pi$
ω_2	$\text{máx}(\omega_{1b}, \omega_{1c})$	$\text{mín}(\omega_{2b}, \omega_{2c})$
ω_3	0	ω_{2c}
ω_4	0	ω_{1c}
ω_5	$\text{mín}(\omega_{2b}, \omega_{2c})$	$\text{máx}(\omega_{1b}, \omega_{1c})$
ω_6	ω_{2c}	π

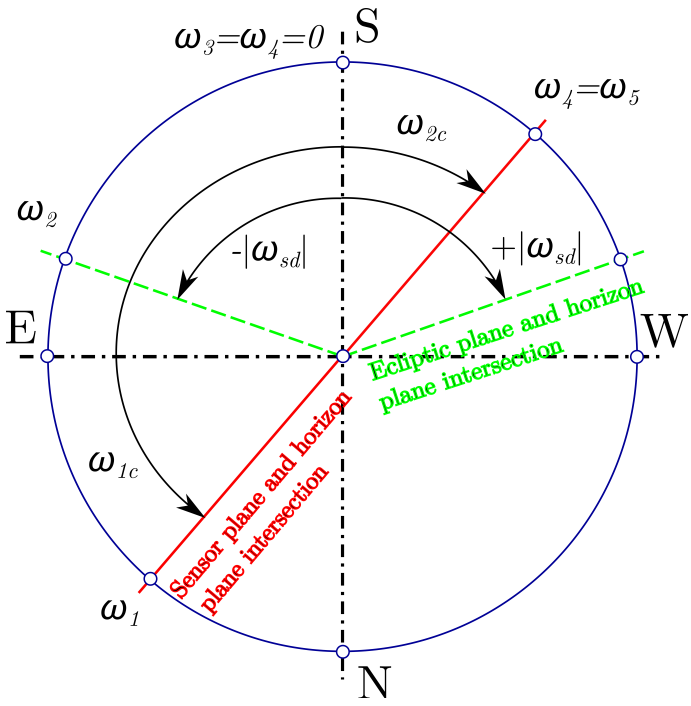


Figura 2.7: Ejemplo de límites de integración para un plano vertical cualquiera.

Tabla 2.2: Límites de integración para sensores verticales.

Límite	Norte	Sur	Este	Oeste
ω_1	$-\pi$	$-\pi/2$	$-\pi$	0
ω_2	$\text{mín}(\omega_{2b}, -\pi/2)$	$\text{máx}(\omega_{1b}, -\pi/2)$	$\text{máx}(\omega_{1b}, -\pi)$	0
ω_3	$-\pi/2$	0	0	0
ω_4	$\pi/2$	0	0	0
ω_5	$\text{máx}(\omega_{1b}, \pi/2)$	$\text{mín}(\omega_{2b}, \pi/2)$	0	$\text{mín}(\omega_{2b}, \pi)$
ω_6	π	$\pi/2$	0	π

2.3.4. Factor de corrección geométrico para un sensor colocado en el plano horizontal

Para el caso particular de que el sensor del dispositivo de sombreamiento se ubicase en el plano horizontal, caso típico en la medida de irradiancia difusa, se encuentra que $\theta_{zp} = 0$, y γ_p puede ser un ángulo cualquiera. Así $\theta_{sp} = \theta_{zs}$ y los límites de integración resultarían:

$$\omega_1 = \omega_{1c} = \omega_{1b} = -|-\tan\phi_g \tan\delta_s| = -\omega_{sd}, \tag{2.46}$$

$$\omega_2 = \omega_{1c} = \omega_{1b} = -|-\tan\phi_g \tan\delta_s| = -\omega_{sd}, \tag{2.47}$$

$$\omega_3 = 0, \tag{2.48}$$

$$\omega_4 = 0, \tag{2.49}$$

$$\omega_5 = \omega_{2c} = \omega_{2b} = +|-\tan\phi_g \tan\delta_s| = \omega_{sd}, \tag{2.50}$$

$$\omega_6 = \omega_{2c} = \omega_{2b} = +|-\tan\phi_g \tan\delta_s| = \omega_{sd}. \tag{2.51}$$

Entonces, la expresión (2.7) queda simplificada a:

$$\begin{aligned} D_a(\theta_{zp}, \gamma_p) + R_{ga}(\theta_{zp}, \gamma_p) &= VI_{sky}\cos\delta_s \int_{-\omega_{sd}}^{\omega_{sd}} \cos\theta_{zs} d\omega \\ &= 2VI_{sky}\cos\delta_s \left(\omega_{sd}\sin\phi_g \sin\delta_s + \sin\omega_{sd}\cos\phi_g\cos\delta_s\right). \end{aligned} \tag{2.52}$$

De forma análoga, si se sutituyen estas particularidades en (2.8) se obtiene:

$$D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p) = I_{sky}\frac{\pi}{2}\left(1 + 1^2\right) = \pi I_{sky}, \tag{2.53}$$

con lo que el factor de corrección geométrico o isótropo queda finalmente:

$$f_{cg} = \frac{1}{1-S} = \frac{\pi}{\pi - 2V\cos\delta_s(\omega_{sd}\sin\phi_g\sin\delta_s + \sin\omega_{sd}\cos\phi_g\cos\delta_s)}. \tag{2.54}$$

Si el anillo está formado por una banda plana o de sección I, el factor de corrección geométrico coincide con la expresión dada por Drummond para la corrección isótropa del anillo de sombreamiento [Drummond, 1956]:

$$f_{cg} = \frac{\pi}{\pi - 2\psi \cos^3 \delta_s (\omega_{sd} \sin \phi_g \sin \delta_s + \sin \omega_{sd} \cos \phi_g \cos \delta_s)}. \tag{2.55}$$

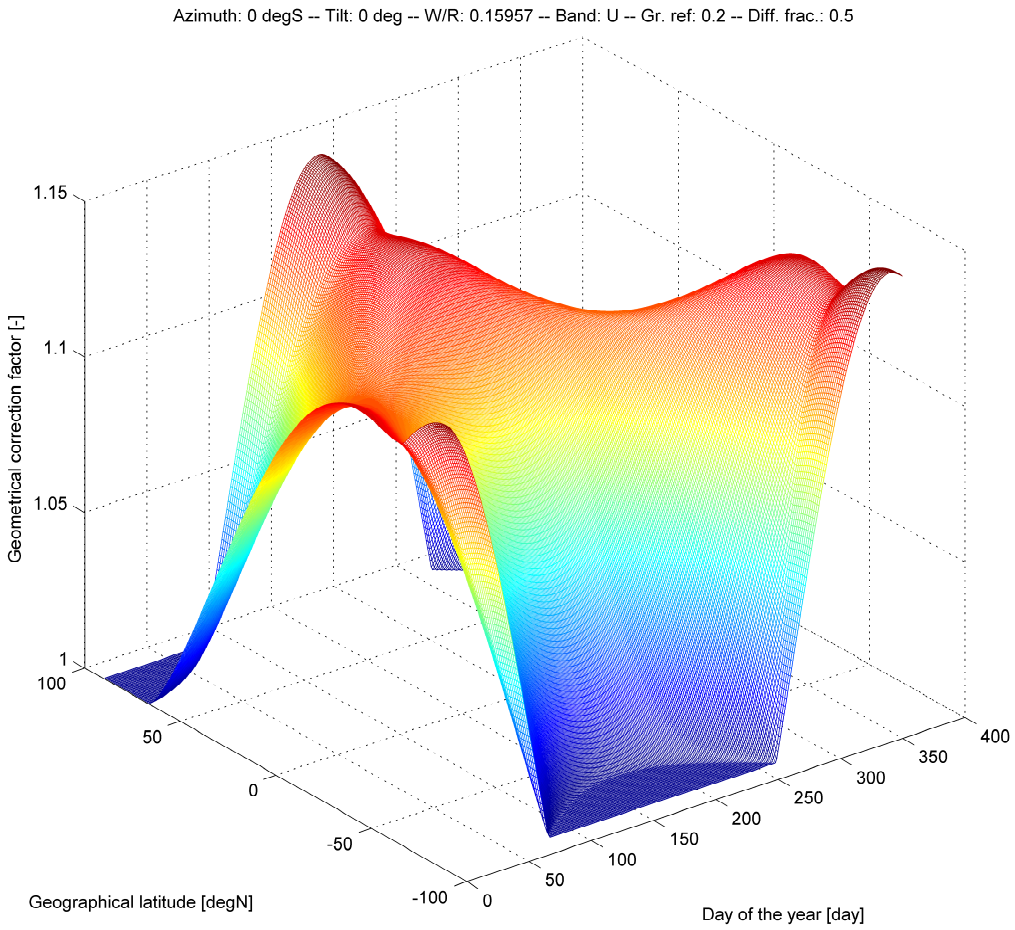


Figura 2.8: Factor de corrección geométrico para un sensor horizontal.

2.3.5. Factor de corrección geométrico para un sensor inclinado en la dirección ecuatorial

Después de la de sobre el plano horizontal, la siguiente medida más común de la irradiancia solar difusa es sobre planos inclinados un ángulo $\theta_{zp} \neq 0$ en la dirección ecuatorial, es decir,

con $\gamma_p = 0$. De forma análoga a como se ha procedido en la sección anterior para el análisis del factor de corrección geométrico para un sensor colocado sobre el plano horizontal, podemos realizar el análisis para este caso.

Igualando $\gamma_p = 0$ en la expresión (A.44), se obtiene que:

$$\begin{aligned}\cos\theta_{sp} = &\sin\phi_g \sin\delta_s \cos\theta_{zp} - \cos\phi_g \sin\delta_s \sin\theta_{zp} \\ &+ \cos\phi_g \cos\delta_s \cos\omega_s \cos\theta_{zp} + \sin\phi_g \cos\delta_s \cos\omega_s \sin\theta_{zp},\end{aligned} \tag{2.56}$$

y aplicando las relaciones trigonométricas de la diferencia de ángulos, obtenemos:

$$\cos\theta_{sp} = \sin(\phi_g - \theta_{zp}) \sin\delta_s + \cos(\phi_g - \theta_{zp}) \cos\delta_s \cos\omega_s. \tag{2.57}$$

El término $\phi_g - \theta_{zp}$, resultado de agrupar términos en las expresiones anteriores, se puede denominar latitud equivalente, ϕ'_g, indicando que, para este caso, se puede realizar la analogía de que el sensor se encuentra en el plano horizontal en una latitud equivalente a la latitud geográfica real menos el ángulo cenital de inclinación del propio sensor. Así, sustituyendo ϕ_g por ϕ'_g en las ecuaciones (2.46)-(2.55), el factor de corrección geométrico para un sensor en un plano inclinado en la dirección ecuatorial queda:

$$f_{cg} = \frac{1}{1-S} = \frac{\pi}{\pi - 2V\cos\delta_s(\omega_{sd}\sin\phi'_g\sin\delta_s + \sin\omega_{sd}\cos\phi'_g\cos\delta_s)}, \tag{2.58}$$

y si el anillo es de perfil en I:

$$f_{cg} = \frac{\pi}{\pi - 2\psi\cos^3\delta_s(\omega_{sd}\sin\phi'_g\sin\delta_s + \sin\omega_{sd}\cos\phi'_g\cos\delta_s)}. \tag{2.59}$$

2.3.6. Factor de corrección geométrico para sensores verticales orientados según las direcciones cardinales

El caso que nos ocupa especialmente es el de sensores en planos verticales orientados según las cuatro direcciones cardinales, que es el modo de operación preferente del dispositivo MK6. Para determinar el factor de corrección geométrico o isótropo para cada uno de los cuatro casos correspondientes debemos aplicar las expresiones (2.2)-(2.8) teniendo en cuenta los límites de integración indicados en la tabla 2.2.

Las figuras 2.9, 2.10 y 2.11 representan gráficamente los valores que puede tomar este factor de corrección para cada orientación. Se consideran las características geométricas del dispositivo MK6: ratio ancho/radio del anillo $\psi = W_a/R_a = 0.15957$ y perfil en U, y unas condiciones promedio de operación: reflectancia aparente del entorno $\rho = 0.2$ y fracción difusa $k_d = 0.5$.

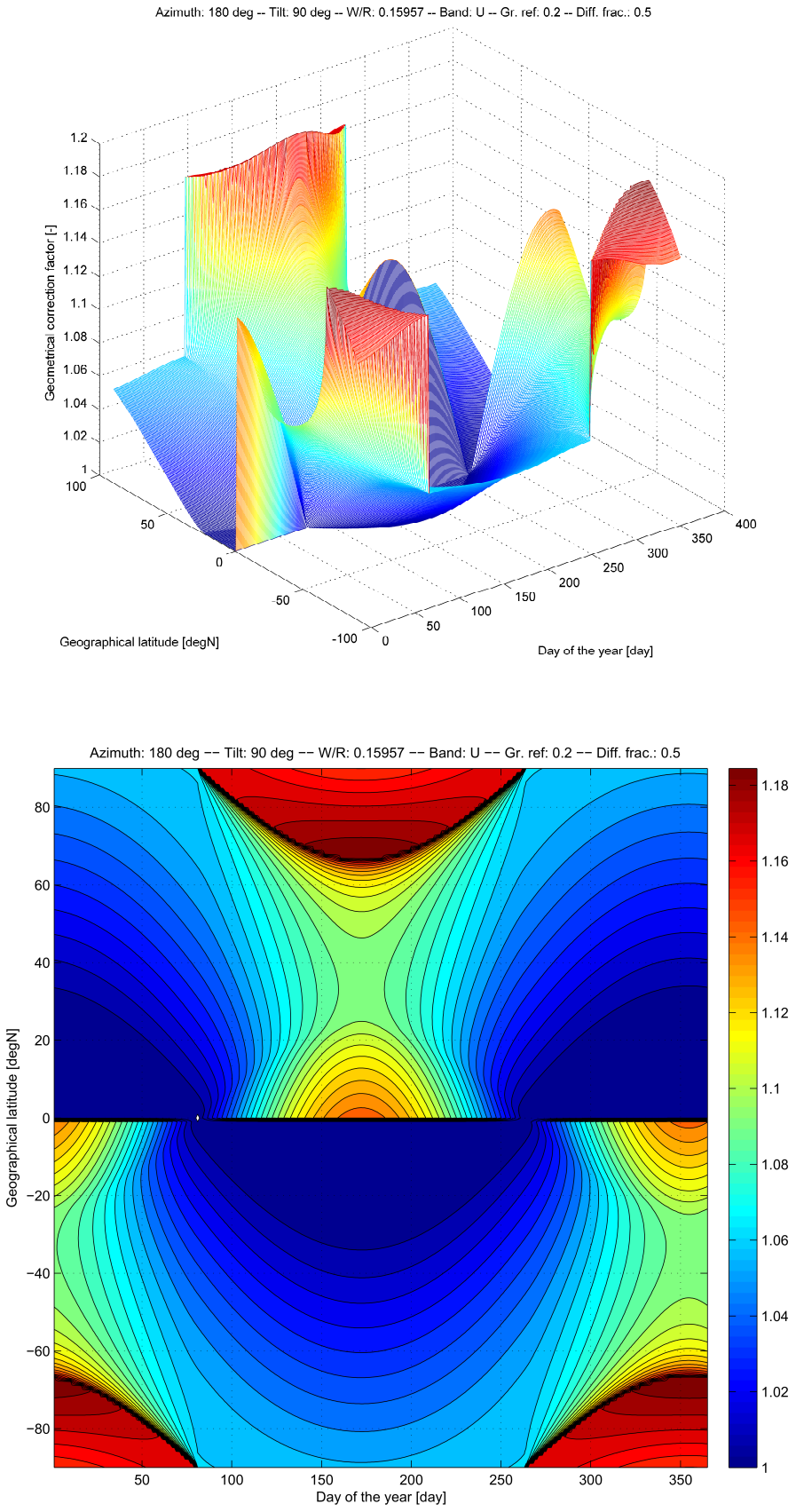


Figura 2.9: Factor de corrección geométrico para un sensor vertical hacia el Norte.

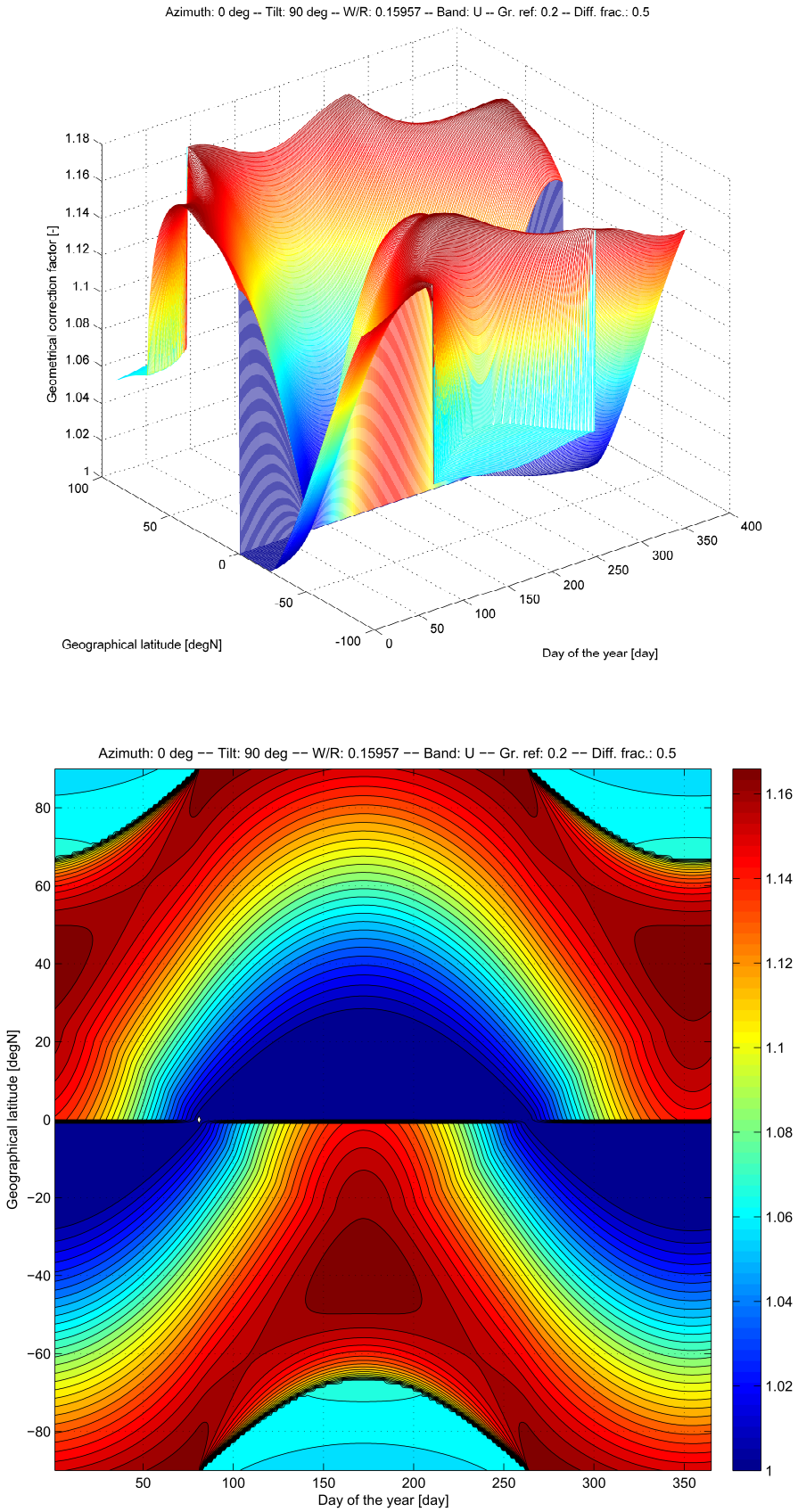


Figura 2.10: Factor de corrección geométrico para un sensor vertical hacia el Sur.

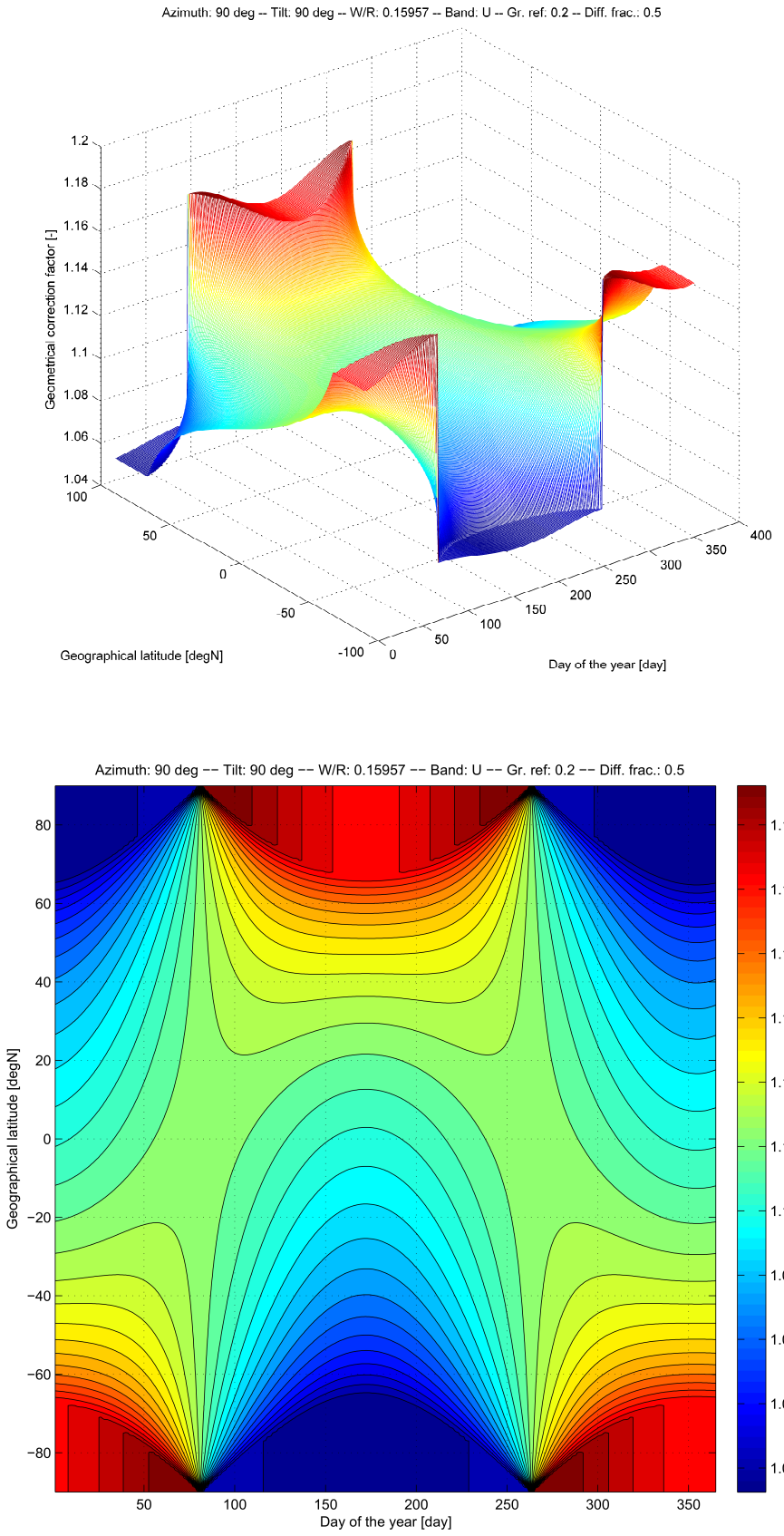


Figura 2.11: Factor de corrección geométrico para un sensor vertical hacia el Este/Oeste.

2.4. Factor de corrección total

En la revisión bibliográfica realizada, que coincide con las revisiones mostradas en trabajos como [Muneer, 2004] o [Sánchez et al., 2012], existen 5 modelos fundamentales para la corrección total de la irradiancia difusa medida mediante un anillo de sombra y que se describen en las siguientes subsecciones.

2.4.1. Correcciones de Batlles et al.

En [Batlles et al., 1995] se proponen dos modelos para la corrección de irradiancia difusa medida mediante anillo de sombra. El primero de los modelos, que denominaremos *"Batlles A"* es una expresión única obtenida por regresión lineal múltiple en función del factor de corrección geométrico, f_{cg}, el índice de brillo, Δ, descrito en la ecuación (3.13), el índice de claridad, ε, de Perez et al.[1] según:

$$\varepsilon = \frac{D(0) + B(n)}{D(0)}, \tag{2.60}$$

y el ángulo cenital del Sol, θ_{zs}, resultando la expresión:

$$f_c = a f_{cg} + b \log \Delta + c \log \varepsilon + d \exp\left(\frac{-1}{\cos \theta_{zs}}\right), \tag{2.61}$$

donde los coeficientes a, b, c y d son parámetros adimensionales que se determinan empíricamente mediante un ajuste por regresión. Los valores correspondientes a dichos parámetros para el dispositivo MK6 se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Parámetros del modelo de corrección de Batlles et al. A.

Parámetro	**Norte** $(90, 180)$	**Sur** $(90, 0)$	**Este** $(90, -90)$	**Oeste** $(90, 90)$
a [-]	1.1152	0.9676	1.0911	1.0762
b [-]	0.0171	0.0501	0.0104	0.0202
c [-]	0.0084	0.1969	−0.0174	−0.0045
d [-]	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

La segunda versión del modelo, que hemos denominado *"Batlles B"*, tiene una estructura análoga al propuesto en Batlles A, pero está particularizado en función de 4 intervalos del

[1] Nótese que el índice de claridad de Perez et al. empleado por Batlles et al. toma la expresión simplificada propuesta inicialmente por Perez et al. en 1987, independiente del ángulo cenital.

índice de claridad de Perez, ε, según:

$$f_c = \begin{cases} 1.178 f_{cg} + 0.207 \log \Delta + 0.1220 \exp\left(\dfrac{-1}{\cos \theta_{zs}}\right) & \text{si } \varepsilon \leq 3.5, \\ 1.454 f_{cg} + 0.655 \log \Delta + 0.4756 \exp\left(\dfrac{-1}{\cos \theta_{zs}}\right) & \text{si } 3.5 < \varepsilon \leq 8.0, \\ 1.486 f_{cg} + 0.495 \log \Delta & \text{si } 8.0 < \varepsilon \leq 11.0, \\ 1.384 f_{cg} + 0.363 \log \Delta & \text{si } \varepsilon > 11.0. \end{cases} \tag{2.62}$$

Cabe destacar en la expresión (2.62) que el factor de corrección total es independiente de la masa óptica relativa de aire para valores de índice de claridad $\varepsilon > 8.0$. Por otro lado, los valores de los coeficientes dados por el autor son adecuados en términos generales para irradiancia difusa sobre plano horizontal. El propio autor indica que éstos deben calcularse de forma más precisa, mediante un análisis por regresión, en el caso de instalaciones de laboratorio. Así se ha realizado dicho análisis aplicado al dispositivo MK6 y los resultados se muestran en la tabla 2.4 teniendo en cuenta que responden a la expresión generalizada:

$$f_c = a_i f_{cg} + b_i \log \Delta + c_i \exp\left(\frac{-1}{\cos \theta_{zs}}\right), \tag{2.63}$$

siendo los subíndices $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ correspondientes a los cuatro intervalos de ε indicados.

2.4.2. Corrección de LeBaron et al.

El modelo de LeBaron descrito en [LeBaron et al., 1990] combina la expresión obtenida en el modelo isótropo o geométrico con el modelo de distribución de irradiancia de Perez et al. [Perez et al., 1990] para describir los fenómenos anisótropos de la atmósfera. El modelo realiza un ajuste mediante regresión lineal tomando como parámetros, además del factor de corrección geométrico f_{cg}, el ángulo cenital θ_{zs} y los índices de Perez et al. ε y Δ, también según las expresiones (3.12) y (3.13) respectivamente. Con estos cuatro parámetros realiza una división de los datos en 256 casos posibles correspondientes a la combinación de cuatro intervalos para cada uno de los parámetros (véase la tabla 2.5).

No siempre se dispone de datos para la casuística completa determinada por este modelo. En tales casos se toma como factor de corrección total el valor promedio del factor de corrección geométrico en el intervalo correspondiente.

La tabla 2.6 muestra los valores del factor de corrección dados por el autor, mientras que las tablas análogas 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10 muestran los coeficientes optimizados para el

Tabla 2.4: Parámetros del modelo de corrección de Batlles et al. B.

Parámetro	**Norte** $(90, 180)$	**Sur** $(90, 0)$	**Este** $(90, -90)$	**Oeste** $(90, 90)$
a_1 [-]	1.1097	0.9141	1.1065	1.0670
b_1 [-]	0.0145	0.0762	−0.0084	0.0072
c_1 [-]	0.0623	1.0372	−0.3023	0.0144
a_2 [-]	1.1470	0.8605	1.0608	1.1136
b_2 [-]	0.0070	−0.0466	0.0155	−0.0166
c_2 [-]	−0.2464	0.2997	−0.0947	−0.5877
a_3 [-]	1.1399	0.7753	1.0441	1.1377
b_3 [-]	0.0154	−0.1408	0.0047	0.0708
c_3 [-]	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
a_4 [-]	1.1463	0.9496	1.1008	1.1579
b_4 [-]	0.0400	−0.0299	0.0442	0.0853
c_4 [-]	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 2.5: Intervalos de los parámetros del modelo de corrección de LeBaron.

Parámetro	**Intervalo 1**	**Intervalo 2**	**Intervalo 3**	**Intervalo 4**
Áng. cenital θ_{zs} [º]	$[0, 35)$	$[35, 50)$	$[50, 60)$	$[60, 90]$
Corr. geom. f_{cg} [-]	$[1.000, 1.068)$	$[1.068, 1.100)$	$[1.100, 1.132)$	$[1.132, \infty)$
Índice claridad ε [-]	$[0.000, 1.253)$	$[1.253, 2.134)$	$[2.134, 5.980)$	$[5.980, \infty)$
Índice brillo Δ [-]	$[0.000, 0.120)$	$[0.120, 0.200)$	$[0.200, 0.300)$	$[0.300, \infty)$

dispositivo MK6 para cada uno de sus sensores. Las valores en rojo indican que no existían datos para poder realizar la regresión y, por tanto, se adopta como coeficiente de corrección total, el valor promedio del coeficiente de corrección geométrico.

Tabla 2.6: Factores de corrección propuestos por LeBaron. Fuente: [Muneer, 2004].

$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.173	$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.182
$[f_{cg}]_2$	1.051	1.104	1.115	1.163	$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	1.128	1.159
$[f_{cg}]_3$	1.069	1.082	1.119	1.140	$[f_{cg}]_3$	1.076	1.088	1.131	1.129
$[f_{cg}]_4$	1.047	1.063	1.074	1.030	$[f_{cg}]_4$	1.060	1.085	1.103	1.156
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.173	$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.248
$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	1.117	1.173	$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	1.117	1.221
$[f_{cg}]_3$	1.161	1.161	1.147	1.168	$[f_{cg}]_3$	1.135	1.148	1.176	1.197
$[f_{cg}]_4$	1.076	1.078	1.104	1.146	$[f_{cg}]_4$	1.092	1.119	1.143	1.182
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.156	$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.238
$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	1.117	1.156	$[f_{cg}]_2$	1.051	1.160	1.207	1.230
$[f_{cg}]_3$	1.051	1.082	1.117	1.156	$[f_{cg}]_3$	1.169	1.191	1.193	1.210
$[f_{cg}]_4$	1.187	1.167	1.139	1.191	$[f_{cg}]_4$	1.150	1.133	1.180	1.156
$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.181	$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.156
$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	0.990	1.104	$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	1.117	1.156
$[f_{cg}]_3$	1.015	1.016	0.946	1.027	$[f_{cg}]_3$	1.051	1.082	1.117	1.156
$[f_{cg}]_4$	0.925	0.967	0.977	1.150	$[f_{cg}]_4$	1.089	1.194	1.216	1.064
$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.176	$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.191
$[f_{cg}]_2$	1.051	1.095	1.130	1.162	$[f_{cg}]_2$	1.051	1.105	1.143	1.168
$[f_{cg}]_3$	1.073	1.089	1.115	1.142	$[f_{cg}]_3$	1.085	1.093	1.117	1.156

Continúa en la página siguiente.

Continuación de la página anterior.

$[f_{cg}]_4$	1.058	1.076	1.117	1.156	$[f_{cg}]_4$	1.069	1.082	1.117	1.156
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.211	$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.238
$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	1.186	1.194	$[f_{cg}]_2$	1.051	1.148	1.195	1.230
$[f_{cg}]_3$	1.086	1.130	1.168	1.177	$[f_{cg}]_3$	1.132	1.160	1.183	1.210
$[f_{cg}]_4$	1.074	1.102	1.118	1.174	$[f_{cg}]_4$	1.118	1.116	1.150	1.185
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.237	$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.232
$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	1.203	1.212	$[f_{cg}]_2$	1.051	1.206	1.210	1.238
$[f_{cg}]_3$	1.080	1.195	1.211	1.185	$[f_{cg}]_3$	1.144	1.178	1.226	1.216
$[f_{cg}]_4$	1.140	1.098	1.191	1.181	$[f_{cg}]_4$	1.117	1.155	1.178	1.167
$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.217	$[f_{cg}]_1$	1.051	1.082	1.117	1.156
$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	1.120	1.180	$[f_{cg}]_2$	1.051	1.082	1.117	1.156
$[f_{cg}]_3$	1.182	1.115	1.081	1.111	$[f_{cg}]_3$	1.051	1.082	1.117	1.156
$[f_{cg}]_4$	1.057	1.119	1.133	1.033	$[f_{cg}]_4$	1.024	1.025	1.162	1.142

Tabla 2.7: Factores de corrección del modelo de LeBaron calculados para el Norte.

$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_2$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_2$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_3$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_3$	1.106	–	–	–
$[f_{cg}]_4$	1.093	–	–	–	$[f_{cg}]_4$	1.124	–	–	–
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–

Continúa en la página siguiente.

Continuación de la página anterior.

$[f_{cg}]_2$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_2$	1.164	–	–	–
$[f_{cg}]_3$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_3$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_4$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_4$	1.018	–	–	–
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_2$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_2$	1.185	–	–	–
$[f_{cg}]_3$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_3$	1.147	–	–	–
$[f_{cg}]_4$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_4$	1.018	–	–	–
$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_2$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_2$	1.208	–	–	–
$[f_{cg}]_3$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_3$	1.296	–	–	–
$[f_{cg}]_4$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_4$	1.277	–	–	–
$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_2$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_2$	1.143	–	–	–
$[f_{cg}]_3$	1.125	–	–	–	$[f_{cg}]_3$	1.138	–	–	–
$[f_{cg}]_4$	1.114	–	–	–	$[f_{cg}]_4$	1.143	–	–	–
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_2$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.176	–	–	–
$[f_{cg}]_3$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.151	–	–	–
$[f_{cg}]_4$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.177	–	–	–
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_2$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.179	–	–	–
$[f_{cg}]_3$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.185	–	–	–

Continúa en la página siguiente.

Continuación de la página anterior.

$[f_{cg}]_4$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.187	–	–	–
$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_2$	1.296	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.018	–	–	–
$[f_{cg}]_3$	1.284	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.272	–	–	–
$[f_{cg}]_4$	1.018	–	–	–	$[f_{cg}]_1$	1.221	–	–	–

Tabla 2.8: Factores de corrección del modelo de LeBaron calculados para el Sur.

$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.012	$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.191
$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	0.927	$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.078
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196

Continúa en la página siguiente.

Continuación de la página anterior.

$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.012
$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.075
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.147	1.196	$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.106	$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.203
$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.014	$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.215	1.185
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.222	1.196
$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.195	1.058
$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	0.969
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_1$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_2$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.290	$[f_{cg}]_3$	1.053	1.083	1.116	1.196
$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.196	$[f_{cg}]_4$	1.053	1.083	1.116	1.104

Tabla 2.9: Factores de corrección del modelo de LeBaron calculados para el Este.

$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.199	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.201	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.181	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.212	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.271	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.252	1.117	1.141
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.079	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.165	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.064	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.148	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.164	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.031	1.208	1.141
$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.292	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.197	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.249	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.197	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.223	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.171	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.241	1.329	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.243	1.218	1.141
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$

Continúa en la página siguiente.

Continuación de la página anterior.

$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.056	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.048	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.148	1.119	1.141
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.139	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.127	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.001	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.178	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.020	1.194	1.141
$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.172	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.169	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.075	1.202	1.141

Tabla 2.10: Factores de corrección del modelo de LeBaron calculados para el Oeste.

$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.192	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.220	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.108	1.203	1.141
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141

Continúa en la página siguiente.

Continuación de la página anterior.

$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.125	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.106	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_1$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_3$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.047	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.270	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.325	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.081	1.374	1.141
$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_1$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.236	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.205	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.209	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.220	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.215	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.149	1.221	1.141
$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_2$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.294	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.153	1.270	1.141
$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_3$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.190	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.214	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.207	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.295	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.251	1.266	1.141

Continúa en la página siguiente.

Continuación de la página anterior.

$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_2$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$	$[\varepsilon]_4$ $[\Delta]_4$	$[\theta_{zs}]_1$	$[\theta_{zs}]_2$	$[\theta_{zs}]_3$	$[\theta_{zs}]_4$
$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_1$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.134	1.141	$[f_{cg}]_2$	1.065	1.082	1.117	1.141
$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.328	1.141	$[f_{cg}]_3$	1.065	1.082	1.272	1.141
$[f_{cg}]_4$	1.065	1.082	1.117	1.141	$[f_{cg}]_4$	1.065	1.218	1.321	1.141

2.4.3. Corrección de Muneer & Zhang

Dado que la mayor parte de las correcciones totales planteadas son de tipo empírico, Muneer y Zhang tratan de hacer el ejercicio de obtener un modelo semi-teórico para el cálculo del factor de corrección total [Muneer and Zhang, 2002]. El modelo obtenido por los autores está parametrizado en función del índice de claridad k_t y el índice de distribución de radiancia b según:

$$f_c = \frac{1}{1-S}, \tag{2.64}$$

donde S es la fracción de irradiancia difusa total (isótropa y anisótropa) interceptada por el anillo de sombreamiento, y que se determina mediante la expresión (2.3). El procedimiento es análogo al dado para la corrección geométrica o isótropa con la particularidad de que los autores utilizan en este caso dos índices de distribución de radiancia, b_1 y b_2, en función de si se trata del cuadrante que contiene al Sol en la bóveda celeste (cuadrante 1), o el cuadrante opuesto (cuadrante 2) respectivamente:

$$\begin{cases} \dfrac{2b_1}{\pi(3+2b_1)} = 0.382 - 1.11k_t & \text{si } k_t > 0.2, \\ b_1 = 1.68 & \text{si } k_t \leq 0.2. \end{cases} \tag{2.65}$$

$$\begin{cases} \dfrac{2b_2}{\pi(3+2b_2)} = 0.166 - 0.105k_t & \text{si } k_t > 0.2, \\ b_2 = 1.68 & \text{si } k_t \leq 0.2. \end{cases} \tag{2.66}$$

O de forma explícita:

$$b_1 = \begin{cases} \dfrac{3.600 - 10.46k_t}{6.97k_t - 0.400} & \text{si } k_t > 0.2, \\ 1.68 & \text{si } k_t \leq 0.2. \end{cases} \tag{2.67}$$

$$b_2 = \begin{cases} \dfrac{1.565 - 0.989k_t}{0.66k_t + 0.957} & \text{si } k_t > 0.2, \\ 1.68 & \text{si } k_t \leq 0.2. \end{cases} \tag{2.68}$$

La radiancia anisótropa procedente del cielo posee una expresión dependiente del cuadrante en el que nos encontremos:

$$I_{sky} = \begin{cases} I_{sky,1} = I_z \dfrac{1 + b_1 \cos\theta}{1 + b_1} & \text{si es del cuadrante 1,} \\ I_{sky,2} = I_z \dfrac{1 + b_2 \cos\theta}{1 + b_2} & \text{si es del cuadrante 2.} \end{cases} \tag{2.69}$$

De esta forma, la irradiancia difusa anisótropa incidente sobre un plano de inclinación θ_{zp} y orientación γ_p sería:

$$\begin{aligned} D(\theta_{zp}, \gamma_p) = &\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_0^{\pi/2} I_{sky,2} \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma + \int_{\gamma_2}^{\gamma_3} \int_0^{\pi/2} I_{sky,1} \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma \\ &+ \int_{\gamma_3}^{\gamma_4} \int_0^{\pi/2} I_{sky,2} \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma + \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_0^{\theta_\gamma} I_{sky,2} \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma \\ &+ \int_{\gamma_2}^{\gamma_3} \int_0^{\theta_\gamma} I_{sky,1} \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma + \int_{\gamma_3}^{\gamma_4} \int_0^{\theta_\gamma} I_{sky,2} \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma, \end{aligned} \tag{2.70}$$

siendo γ_i con $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ los límites de integración definidos en la tabla 2.11 y θ_γ el límite de integración indicado en la expresión (1.11), que es función del ángulo γ.

Tabla 2.11: Límites de integración de la expresión del denominador de S en el modelo de corrección de Muneer & Zhang (coordenadas horizontales).

Límite	$\theta_{zp} \neq 0\,\&\,\lvert\gamma_p\rvert \leq \pi/2$	$\theta_{zp} \neq 0\,\&\,\lvert\gamma_p\rvert > \pi/2$	$\theta_{zp} = 0$
γ_1	$\gamma_p - \pi/2$	$\lvert\gamma_p\rvert - \pi/2$	$-\pi$
γ_2	$\text{máx}(\gamma_p - \pi/2, -\pi/2)$	$\text{máx}(\lvert\gamma_p\rvert - \pi/2, \pi/2)$	$-\pi/2$
γ_3	$\text{mín}(\gamma_p + \pi/2, \pi/2)$	$\text{mín}(\lvert\gamma_p\rvert + \pi/2, 3\pi/2)$	$+\pi/2$
γ_4	$\gamma_p + \pi/2$	$\lvert\gamma_p\rvert + \pi/2$	$+\pi$

De forma análoga, la irradiancia reflejada incidente sobre el plano, $R(\theta_{zp}, \gamma_p)$, dada una reflectancia aparente ρ y una fracción difusa k_d, se puede expresar como:

$$\begin{aligned} R(\theta_{zp}, \gamma_p) = &\frac{\rho}{k_d} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_{\pi/2}^{\pi - \theta_\gamma} I_{sky,2} \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma + \frac{\rho}{k_d} \int_{\gamma_2}^{\gamma_3} \int_{\pi/2}^{\pi - \theta_\gamma} I_{sky,1} \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma \\ &+ \frac{\rho}{k_d} \int_{\gamma_3}^{\gamma_4} \int_{\pi/2}^{\pi - \theta_\gamma} I_{sky,2} \cos\xi_p \sin\theta d\theta d\gamma, \end{aligned} \tag{2.71}$$

siendo γ_i, con $i \in \{1,2,3,4\}$, los límites de integración definidos en la tabla 2.11 y ξ_p el ángulo formado por un punto cualquiera de la bóveda observada, de coordenadas horizontales (θ, γ) y la normal al plano del sensor (véase la ecuación (A.42)).

La fracción de irradiancia (isótropa y anisótropa) interceptada por el anillo de sombreamiento, se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$D_a(\theta_{zp}, \gamma_p) = VI_z \cos\delta_s \left(\int_{\omega_4}^{\omega_5} \frac{1+b_1\cos\theta_{za}}{1+b_1} \cos\theta_{ap} d\omega + \int_{\omega_6}^{\omega_7} \frac{1+b_1\cos\theta_{za}}{1+b_1} \cos\theta_{ap} d\omega \right) + VI_z \cos\delta_s \left(\int_{\omega_3}^{\omega_4} \frac{1+b_2\cos\theta_{za}}{1+b_2} \cos\theta_{ap} d\omega + \int_{\omega_7}^{\omega_8} \frac{1+b_2\cos\theta_{za}}{1+b_2} \cos\theta_{ap} d\omega \right), \tag{2.72}$$

$$R_a(\theta_{zp}, \gamma_p) = VI_z \frac{\rho}{k_d} \cos\delta_s \left(\int_{\omega_2}^{\omega_3} \frac{1+b_1\cos\theta_{za}}{1+b_1} \cos\theta_{ap} d\omega + \int_{\omega_8}^{\omega_9} \frac{1+b_1\cos\theta_{za}}{1+b_1} \cos\theta_{ap} d\omega \right) + VI_z \frac{\rho}{k_d} \cos\delta_s \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{1+b_2\cos\theta_{za}}{1+b_2} \cos\theta_{ap} d\omega + \int_{\omega_9}^{\omega_{10}} \frac{1+b_2\cos\theta_{za}}{1+b_2} \cos\theta_{ap} d\omega \right), \tag{2.73}$$

que es una modificación de la expresión deducida para el factor de corrección geométrico o isótropo, modificando la expresión de la radiancia, que depende del índice de distribución de radiancia, b. De hecho, si $b_1 = b_2 = 0$, la expresión (2.7) y la suma de las expresiones (2.72) y (2.73) son idénticas. I_{gr} es la radiancia procedente del terreno, que se puede calcular como:

$$I_{gr} = \frac{\rho}{k_d} I_{sky} = \frac{\rho}{k_d} I_z i_r(\theta), \tag{2.74}$$

siendo la radiancia cenital I_z:

$$I_z = \frac{D(0)}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \frac{1+b_1\cos\theta}{1+b_1} \cos\theta \sin\theta d\theta d\gamma + \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \int_0^{\pi/2} \frac{1+b_2\cos\theta}{1+b_2} \cos\theta \sin\theta d\theta d\gamma}. \tag{2.75}$$

En las ecuaciones (2.72) y (2.73), el ángulo θ_{za} corresponde con el ángulo cenital del anillo de sombra y θ_{ap} es el ángulo cenital formado entre el punto del anillo objeto de estudio y la normal al sensor, caracterizada por el ángulo cenital θ_{zp} y el ángulo acimutal γ_p.

Como se ha visto en las expresiones (2.72) y (2.73), es necesario definir diez límites para la integración definida de la radiancia interceptada por el anillo, en función del cuadrante observado en cada parte diferencial de ángulo horario $d\omega$. La expresión de dichos límites se muestra en la tabla 2.12. Nótese que en dicha tabla se utiliza la misma nomenclatura que la empleada para el factor de corrección geométrico y, por lo tanto, ω_{1b} y ω_{2b} son los ángulos horarios de las intersecciones del plano del anillo con el plano horizontal, mientras que ω_{1c} y ω_{2c}, constituyen las intersecciones entre el plano del anillo y el plano del sensor.

Tabla 2.12: Límites de integración de la expresión del numerador de S en el modelo de corrección de Muneer & Zhang (coordenadas horarias).

Límite	$\omega_{\mathbf{1c}} \leq \omega_{\mathbf{2c}}$	$\omega_{\mathbf{1c}} > \omega_{\mathbf{2c}}$
ω_1	ω_{1c}	$-\pi$
ω_2	$\text{mín}[\text{máx}(\omega_{1c}, -\pi/2), \text{máx}(\omega_{1b}, \omega_{1c})]$	$\text{mín}[\text{mín}(\omega_{2b}, -\pi/2), \omega_{2c}]$
ω_3	$\text{máx}(\omega_{1b}, \omega_{1c})$	$\text{mín}(\omega_{2b}, \omega_{2c})$
ω_4	$\text{máx}[\text{máx}(\omega_{1b}, -\pi/2), \omega_{1c}]$	$\text{máx}[\text{mín}(\omega_{2c}, -\pi/2), \text{mín}(\omega_{2b}, \omega_{2c})]$
ω_5	0	ω_{2c}
ω_6	0	ω_{1c}
ω_7	$\text{mín}[\text{mín}(\omega_{2b}, \pi/2), \omega_{2c}]$	$\text{mín}[\text{máx}(\omega_{1c}, \pi/2), \text{máx}(\omega_{1b}, \omega_{1c})]$
ω_8	$\text{mín}(\omega_{2b}, \omega_{2c})$	$\text{máx}(\omega_{1b}, \omega_{1c})$
ω_9	$\text{máx}[\text{mín}(\omega_{2c}, \pi/2), \text{mín}(\omega_{2b}, \omega_{2c})]$	$\text{máx}[\text{máx}(\omega_{1b}, \pi/2), \omega_{1c}]$
ω_{10}	ω_{2c}	π

2.4.4. Corrección de Steven

El modelo propuesto por Steven en 1984 [Steven, 1984] está especialmente diseñado para días claros, donde los efectos de la anisotropía del cielo se dan con mayor profusión. La corrección planteada por el autor se basa en un modelo de superposición de la radiancia difusa isótropa y la radiancia anisótropa procedente de la región circunsolar. Consiste en multiplicar la fracción S, de irradiancia difusa oculta por el anillo de sombra, por un coeficiente de anisotropía A_S, independiente de la corrección geométrica:

$$f_c = \frac{1}{1 - SA_S}, \tag{2.76}$$

donde A_S puede calcularse mediante la expresión:

$$A_S = 1 - s_c\xi_c + \frac{s_c}{f}, \tag{2.77}$$

siendo s_c la ponderación de la componente circunsolar y ξ_c el ángulo de dicha región. Ambos coeficientes se obtienen mediante un análisis de regresión de los valores de A_S en función de la irradiancia difusa de referencia y la irradiancia difusa medida sin corrección:

$$\frac{D_{ref} - D_{uc}}{SD_{ref}} = s_c\frac{1}{f} + (1 - s_c\xi_c)\,, \tag{2.78}$$

donde D_{ref} es el valor de referencia calculado a partir del modelo de composición de componentes de la irradiancia:

$$D_{ref}(\theta_{zp}, \gamma_p) = G(\theta_{zp}, \gamma_p) - B(\theta_{zp}, \gamma_p) - R(\theta_{zp}, \gamma_p). \tag{2.79}$$

La variable f es, según la definición del autor:

$$f = \omega_{sd} \sin\phi_g \sin\delta_s + \cos\phi_g \cos\delta_s \sin\omega_{sd} = \int_0^{\omega_{sd}} \cos\theta_{zs} d\omega_s = \frac{1}{2} \int_{-\omega_{sd}}^{\omega_{sd}} \cos\theta_{zs} d\omega_s, \quad (2.80)$$

expresión que se corresponde con la integración del coseno del ángulo de incidencia de la irradiancia difusa sobre una superficie horizontal, a lo largo de la mitad del recorrido del Sol en la bóveda, o lo que es lo mismo, la mitad de la longitud de la banda del anillo que interfiere en la bóveda observada. Queda entonces invalidada esta expresión para piranómetros en planos distintos del horizontal, por ser una expresión particular. Se propone entonces, en base al desarrollo expuesto en la sección 2.3, utilizar esta otra:

$$f' = \frac{1}{2} \int_{\omega_2}^{\omega_3} \cos\theta_{sp} d\omega_s + \frac{1}{2} \int_{\omega_4}^{\omega_5} \cos\theta_{sp} d\omega_s, \quad (2.81)$$

calculándose los límites ω_1 y ω_2 según la tabla 2.2 y el ángulo θ_{sp} según la expresión (A.44).

Tras realizar el procedimiento indicado, en la tabla 2.13 se recogen los valores calculados de los parámetros s_c y ξ_c para cada uno de los lóbulos del dispositivo MK6.

Tabla 2.13: Parámetros del modelo de corrección de Steven.

Parámetro	**Norte** $(90, 180)$	**Sur** $(90, 0)$	**Este** $(90, -90)$	**Oeste** $(90, 90)$
s_c [-]	1.0000	0.1194	0.6208	0.0092
$s_c\xi_c$ [-]	0.0000	0.6035	0.9189	-0.5759

Capítulo 3

Índices de claridad y clasificación de los tipos de cielo

3.1. Introducción

Uno de los aspectos clave en la definición y modelización de la irradiancia solar, especialmente de la componente difusa, es caracterizar el tipo de cielo. El problema reside en definir, mediante una variable numérica o índice, un concepto tan abstracto como *"cielo despejado"* o *"cielo completamente cubierto"* y todas las posibles clases intermedias que se puedan definir, tales como *"parcialmente despejado"*, *"cielo intermedio"*, *"parcialmente cubierto"*, etc. No existe a día de hoy un criterio unificado para realizar tal definición. Para dar una solución, algunos autores han definido los denominados *"índices de claridad"*, una serie de parámetros que clasifican los tipos de cielo en intervalos dentro de la escala definida por los valores mínimo y máximo de dicho índice. Por otro lado, la Comisión Internacional de Luminancia (CIE), ofrece una clasificación en 15 tipos de cielo (versión revisada en 2004) en función de la distribución espacial de la radiancia [CIE, 2004]. A cada tipo de cielo le asigna unos coeficientes característicos de la función gradiente de radiancia y la función indicatriz, pero no indica un índice estandarizado para determinar a priori el tipo de cielo, dificultando su identificación.

En este capítulo, en primer lugar, se realiza una revisión de los índices de claridad más utilizados en la actualidad y las clasificaciones de tipos de cielo que proponen. En total se analizan 9 índices. A continuación se exponen los modelos que relacionan los dos índices más extendidos, y de particular interés para nuestro caso de estudio, que son el índice

de claridad y la fracción difusa. Finalmente, se analizan los procedimientos para la determinación del tipo de cielo Estándar CIE a partir de diversas medidas de radiancia e irradiancia difusa.

3.2. Índices de claridad

3.2.1. Fracción difusa

Uno de los criterios convencionales para la definición del tipo de cielo es el empleo de la fracción difusa horizontal, definida ésta como el cociente de la irradiancia difusa sobre un plano horizontal respecto de la irradiancia global:

$$k_d = \frac{D(0)}{G(0)}. \tag{3.1}$$

Cuanto mayor es el valor de la fracción difusa, mayor es el grado de nubosidad del cielo. Así se puede dividir el valor de la fracción difusa en tantos intervalos como se quiera, desde $k_d = 0$ que correspondería a un cielo completamente despejado, hasta $k_d = 1$ que correspondería a un cielo completamente cubierto. Normalmente se toman 5 intervalos, tal y como detalla la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Clasificación de cielos según el valor de fracción difusa.

Descripción del cielo	**Intervalo de k_d**
Completamente despejado	$[0.0, 0.2)$
Despejado	$[0.2, 0.4)$
Intermedio	$[0.4, 0.6)$
Cubierto	$[0.6, 0.8)$
Completamente cubierto	$[0.8, 1.0]$

3.2.2. Fracción directa

De forma complementaria a la fracción difusa, puede emplearse como estimador de las condiciones del cielo la fracción directa horizontal, definida como el cociente de la irradiancia

directa sobre un plano horizontal, respecto de la irradiancia global:

$$k_b = \frac{B(0)}{G(0)} = \frac{B(n)\cos\theta_{zs}}{G(0)}. \tag{3.2}$$

Cuanto mayor es el valor de la fracción directa, mayor es el grado de claridad del cielo. Así se puede dividir el valor de la fracción directa en tantos intervalos como se quiera, desde $k_b = 0$, que correspondería a un cielo completamente cubierto, hasta $k_b = 1$, que correspondería a un cielo completamente despejado. Normalmente se toman 5 intervalos, tal y como detalla la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Clasificación de cielos según el valor de fracción directa.

Descripción del cielo	**Intervalo de** k_b
Completamente despejado	$[0.8, 1.0]$
Despejado	$[0.6, 0.8)$
Intermedio	$[0.4, 0.6)$
Cubierto	$[0.2, 0.4)$
Completamente cubierto	$[0.0, 0.2)$

3.2.3. Función de claridad

Uno de los índices de claridad más extensamente utilizados es la denominada *"función de claridad"* definida como:

$$F = \frac{G(0) - B(0)}{B_{ext}(0)} = \frac{G(0) - B(n)\cos\theta_{zs}}{B_{sc}\varepsilon_0\cos\theta_{zs}}. \tag{3.3}$$

Existe una relación entre F y el índice de claridad k_t que toma la forma general de:

$$F = k_t[1 - f(k_t)], \tag{3.4}$$

siendo $f(k_t)$ una función determinada mediante distintos criterios [Muneer, 2004]. Se establecen 4 tipos de cielo en función de su valor, que se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Clasificación de cielos según el valor de la función de claridad.

Descripción del cielo	**Intervalo de F**
Completamente despejado	$[0.61, 1.00]$
Despejado	$[0.51, 0.61)$
Intermedio	$[0.18, 0.51)$
Completamente cubierto	$[0.00, 0.18)$

3.2.4. Índice de claridad

El índice de claridad se define como el cociente de la irradiancia global sobre plano horizontal respecto de la irradiancia solar extraterrestre sobre el mismo plano:

$$k_t = \frac{G(0)}{B_{ext}(0)} = \frac{G(0)}{B_{sc}\varepsilon_0 \cos\theta_{zs}}. \tag{3.5}$$

La diferencia entre ambos valores se debe a la transmisividad de la atmósfera, que será más pequeña cuanto mayor sea la nubosidad existente o la turbidez atmosférica. De forma análoga a la clasificación que se establecía mediante el valor de la fracción difusa o de la fracción directa, se puede dividir el valor del índice de claridad en tantos intervalos como se desee, entre un valor mínimo correspondiente a un cielo totalmente cubierto, hasta un valor máximo, correspondiente a un cielo completamente despejado. La tabla 3.4 muestra la clasificación típica en 5 intervalos.

Tabla 3.4: Clasificación de cielos según el valor del índice de claridad.

Descripción del cielo	**Intervalo de k_t**
Completamente despejado	$[0.8, 1.0]$
Despejado	$[0.6, 0.8)$
Intermedio	$[0.4, 0.6)$
Cubierto	$[0.2, 0.4)$
Completamente cubierto	$[0.0, 0.2)$

Nótese que los intervalos en este caso son completamente opuestos a los fijados en la clasificación según la fracción difusa y análogos a la directa.

3.2.5. Índice de claridad de Batlles et al.

En 1998, Batlles et al. introducen un criterio que tiene en cuenta la altura solar y los valores de irradiancia global y difusa [Batlles et al., 1998], definiendo dos índices:

$$k_{tt} = -0.3262 - 0.0032h_s + 0.6843\log(h_s), \tag{3.6}$$

$$k_k = 1.0827 - 0.3893\log(h_s), \tag{3.7}$$

estando en ambas ecuaciones la altura solar h_s medida en [º]. Este criterio sólo permite identificar cielos despejados, siendo aquellos que verifiquen:

$$k_t > k_{tt} \cup k_d < k_k. \tag{3.8}$$

3.2.6. Índice de claridad de Klucher

En [Klucher, 1979] el autor desarrolla un modelo para estimar el valor de irradiancia en superficies inclinadas e indica una función de modulación que actúa como índice de claridad definido según:

$$F' = 1 - \left[\frac{D(0)}{G(0)}\right]^2 = 1 - k_d^2. \tag{3.9}$$

La clasificación de cielos utilizando este índice es análoga al de la función de claridad, detallado en la tabla 3.3.

3.2.7. Índices de claridad y brillo de Perez et al.

Inicialmente, los autores propusieron un índice definido como:

$$k_t' = \frac{k_t}{1.031\exp\left(\dfrac{-1.4}{0.9 + 9.4/m}\right) + 0.1}, \tag{3.10}$$

siendo m la masa óptica relativa de aire definida en (A.14). Si $k_t' \geq 0.7$ se identifican cielos despejados.

Posteriormente, en [Perez et al., 1987] los autores introducen por primera vez dos índices para determinar las condiciones del cielo: el *"índice de claridad"* (ε) y el *"índice de brillo o luminosidad"* (Δ). El índice de claridad trata de evaluar las condiciones de nubosidad mediante la proporción de radiación difusa incidente sobre el plano horizontal respecto a

la radiación directa sobre ese mismo plano. El índice de brillo o luminosidad, en cambio, cuantifica el espesor de las nubes o concentración de aerosoles en la atmósfera.

Como primera definición del índice de claridad de Perez et al. se propone la expresión:

$$\varepsilon = \frac{D(0) + B(n)}{D(0)}. \tag{3.11}$$

No obstante, la expresión (3.11) es revisada y en [Perez et al., 1990] se propone la siguiente:

$$\varepsilon = \frac{\dfrac{D(0) + B(n)}{D(0)} + k\theta_{zs}^3}{1 + k\theta_{zs}^3}, \tag{3.12}$$

siendo k un coeficiente que toma el valor $k = 1.041$ si el ángulo cenital θ_{zs} está dado en [rad], o $k = 5.535\text{E-}6$ si θ_{zs} se expresa en [º]. Se debe tener especial precaución porque en algunas aplicaciones de este índice sólo es válida una de las expresiones, que no tiene por qué coincidir con la más moderna.

El índice de brillo o de luminosidad se define como:

$$\Delta = \frac{mD(0)}{B_{ext}(n)}, \tag{3.13}$$

siendo $B_{ext}(n)$ la irradiancia normal a nivel extraterrestre ($B_{ext}(n) = B_{sc}\varepsilon_0$) y m la masa óptica de aire definida en [Kasten, 1993], y que proporciona una precisión del 99.6 % para ángulos cenitales de hasta 89º. Su expresión se detalla en (A.14). También es posible emplear la expresión alternativa propuesta por [Gueymard, 1993] y descrita en (A.15). Para la corrección por la presión barométrica local se recomienda utilizar la ecuación (A.17) en ausencia de otras observaciones.

Para ambos índices, Perez et al. determinan una clasificación de los tipos de cielo mediante la definición de una serie de intervalos, los cuales pueden verse en las tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5: Clasificación de cielos según el valor del índice de claridad de Perez et al.

Descripción del cielo	**Intervalo de ε**
Completamente despejado	$[6.200, \infty)$
Despejado	$[2.800, 6.200)$
Intermedio	$[1.500, 2.800)$
Cubierto	$[1.065, 1.500)$
Completamente cubierto	$[1.000, 1.065)$

Tabla 3.6: Claridad del cielo según el valor del índice de brillo de Perez et al.

Descripción del cielo	**Intervalo de Δ**
Cielo muy oscuro	< 0.1
Cielo medio	$[0.1, 0.3)$
Cielo brillante	$[0.3, 0.48)$
Cielo muy brillante	≥ 0.48

3.2.8. Índice de nebulosidad de Perraudeau

Perraudeau et al. proponen un índice de nebulosidad FP en [Perraudeau and Chauvel, 1986, Kambezidis et al., 1998] que representa el grado de cobertura del cielo por nubes. Se describen 5 tipos de cielo según los intervalos indicados en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Clasificación de cielos según el valor del índice de nebulosidad de Perraudeau.

Descripción del cielo	**Intervalo de FP**
Cielo azul (despejado)	$[0.90, 1.00]$
Intermedio	$[0.70, 0.90)$
Intermedio azul	$[0.20, 0.70)$
Intermedio cubierto	$[0.05, 0.20)$
Completamente cubierto	$[0.00, 0.05)$

El valor del índice FP se determina según:

$$FP = \frac{1 - k_d}{1 - k_{d0}}, \tag{3.14}$$

siendo k_{d0} la fracción difusa calculada para un cielo completamente despejado según:

$$k_{d0} = \frac{G_{clear}(0)}{G_{clear}(0) + B(0)}, \tag{3.15}$$

siendo $G_{clear}(0)$ la irradiancia solar global estimada para un día despejado en [W·m^{-2}], calculada en función de la altura solar h_s en [º] mediante:

$$\begin{aligned} G_{clear}(0) = &\left(0.5528 + 0.8785h_s - 0.01322h_s^2 + 0.0003434h_s^3\right) \\ &(6.9731 + 4.2496\text{E-}2h_s - 8.5375\text{E-}4h_s^2 - 8.6088\text{E-}5h_s^3 \\ &+ 1.9848\text{E-}6h_s^4 - 1.6222\text{E-}8h_s^5 + 4.7823\text{E-}11h_s^6). \end{aligned} \tag{3.16}$$

La irradiancia directa normal al plano horizontal se puede determinar en función del factor de turbidez de Linke, T_L, mediante:

$$B(0) = B_{ext}(0)\exp(-k_p m T_L), \tag{3.17}$$

siendo k_p el coeficiente adimensional definido como:

$$k_p = \frac{1}{6.557 + 1.7513m - 0.1202m^2 + 0.0065m^3 - 0.00013m^4}. \tag{3.18}$$

3.2.9. Índice de cielo de Igawa

El índice del cielo se define por:

$$Si = \frac{G(0)}{G_{st}} + \sqrt{Cle}, \tag{3.19}$$

donde G_{st} es la irradiancia global estándar considerando un factor de turbidez de Linke de 2.5 en la expresión de irradiancia global de un cielo claro de Kasten:

$$G_{st} = 0.84\frac{B_{sc}}{m}\exp(-0.0675m), \tag{3.20}$$

siendo B_{sc} la constante solar extraterrestre, fijada en $B_{sc} = 1\,367$ W·m^{-2}, y m la masa de aire relativa definida en (A.14).

Cle es el índice de no nubosidad o *"cloudless index"* definido por la expresión:

$$Cle = \frac{1 - k_d}{1 - Ces}, \tag{3.21}$$

donde k_d es la fracción difusa y Ces es la fracción de nubosidad estándar, dada por el siguiente ajuste de regresión polinómica, con respecto a la masa óptica relativa de aire:

$$Ces = 0.01299 + 0.07698m - 0.003857m^2 + 0.0001054m^3 - 0.000001031m^4. \tag{3.22}$$

Además, Igawa et al. simplifican los 15 tipos de cielos estándar propuestos por la CIE a los cinco más comunes, definidos en función del índice de cielo Si según la tabla 3.8, y que pueden relacionarse con los parámetros k_c y Cle, tal y como se muestra en la figura 3.1. El parámetro k_c se define como:

$$k_c = \frac{G(0)}{G_{st}}. \tag{3.23}$$

Tabla 3.8: Tipos de cielo según el modelo de Igawa et al. [Igawa et al., 2004].

Tipo de cielo	**Índice de cielo Si**
Cielo claro	$Si \geq 1.7$
Cielo bastante claro	$1.7 \geq Si > 1.5$
Cielo intermedio	$1.5 \geq Si > 0.6$
Cielo parcialmente cubierto	$0.6 \geq Si > 0.3$
Cielo totalmente cubierto	$Si \leq 0.3$

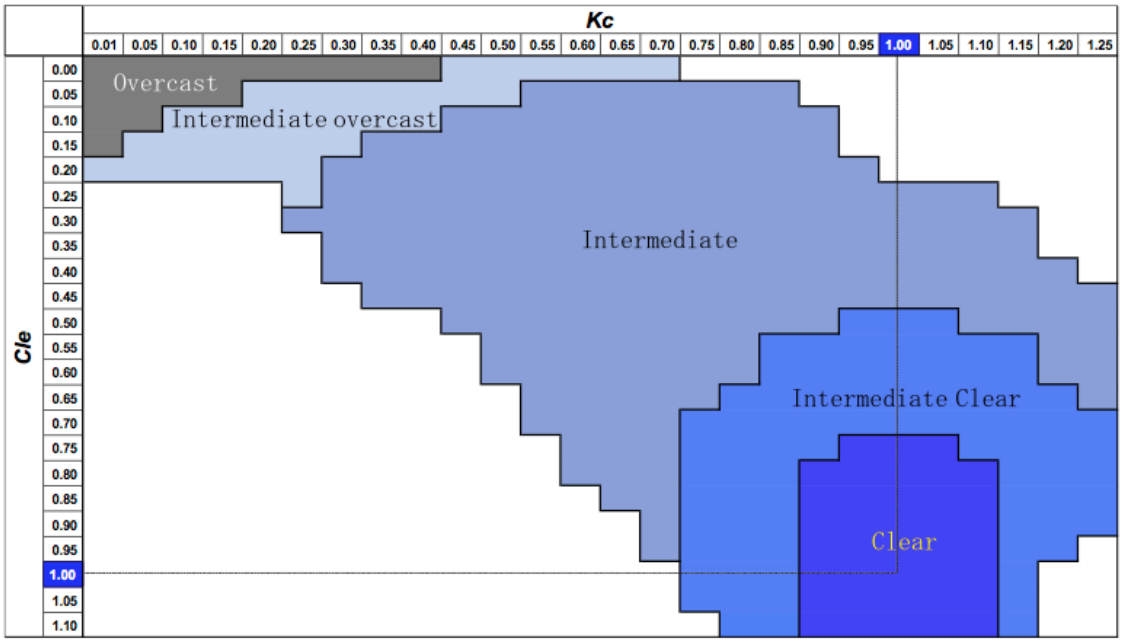


Figura 3.1: Clasificación de cielos simplificada. Fuente: [Igawa, 2014].

3.3. Relación entre el índice de claridad y la fracción difusa

Existen multitud de correlaciones no lineales entre el valor de fracción difusa k_d, y el índice de claridad k_t. Éstas permiten estimar el valor de la componente difusa de la irradiancia en el plano horizontal conociendo únicamente el valor de la irradiancia global horizontal, cuya medida es más extendida en estaciones de observación meteorológica de todo el mundo. A continuación se presentan cinco de los modelos más empleados en la bibliografía. Todos los modelos expuestos coinciden en observar que la distribución de valores debe estudiarse en base a tres tramos del índice de claridad. Para valores bajos de k_t la fracción difusa es próxima a la unidad y prácticamente independiente del valor del índice de claridad. De forma análoga, pero anti-simétrica, ocurre para valores muy elevados de dicho índice, donde la fracción difusa oscila normalmente entre 0.1 y 0.4. En el rango intermedio de k_t, usualmente considerado como $(0.2, 0.7)$, se produce una relación lineal con pendiente negativa. Los puntos críticos en los que difieren los modelos presentados, básicamente, es en la modelización de los cambios de definición de la función. Dada la dificultad para expresar unívocamente los límites de los intervalos de k_t, los autores se esfuerzan en ofrecer una expresión única para los tres rangos lo más precisa posible.

Modelo de Boland et al.: los autores suponen que la función que mejor ajusta la correlación es de tipo exponencial [Boland et al., 2001, Boland et al., 2008]:

$$k_d = \frac{1}{1 + \exp(a_0 + a_1 k_t)}, \tag{3.24}$$

siendo a_i coeficientes adimensionales que se deben ajustar en el modelo. Para las medidas tomadas, y tras aplicar un proceso de validación cruzada con $k = 10$, los valores de dichos coeficientes son $a_0 = -6.5978 \pm 0.0014$ y $a_1 = 10.5241 \pm 0.0023$ respectivamente[1]. Su aplicación puede verse en la figura 8.6.

Modelo de Erbs: en [Erbs et al., 1982] se propone como ajuste una función definida en tres intervalos según los valores del índice de claridad k_t:

$$k_d = \begin{cases} 1.0 - 0.099 k_t & \text{si } k_t \leq 0.22, \\ 0.9511 - 0.160 k_t + 4.388 k_t^2 - 16.638 k_t^3 + 12.336 k_t^4 & \text{si } 0.22 < k_t \leq 0.80, \\ 0.165 & \text{si } k_t > 0.80. \end{cases} \tag{3.25}$$

Su implementación se muestra en la figura 8.7.

Modelo de Muneer & Saluja: estable una relación polinómica de tercer orden descrita en [Muneer and Saluja, 1986]:

$$k_d = a_0 + a_1 k_t + a_2 k_t^2 + a_3 k_t^3, \forall k_t > 0.2, \tag{3.26}$$

[1] Para garantizar un ajuste robusto, además se ha realizado la Transformación Homogénea propuesta por el autor en [Badescu, 2008].

donde los coeficientes a_i, adimensionales, deben ajustarse en función de la localización de estudio. Nuevamente se han calculado para las medidas tomadas, obteniéndose los valores $a_0 = 0.2722$, $a_1 = 6.1926$, $a_2 = -15.4435$ y $a_3 = 9.4678$, con una incertidumbre en todos los casos menor que ± 0.0015. Puede observarse el ajuste realizado en la figura 8.8.

Modelo de Orgill & Hollands: tal vez sea el modelo más extendido en este aspecto y se define también como una función a trozos en tres intervalos en función del valor de k_t [Orgill and Hollands, 1977] con la particularidad de que cada tramo es lineal (véase la figura 8.9):

$$k_d = \begin{cases} 1.0 - 0.249k_t & \text{si } k_t \leq 0.35, \\ 1.557 - 1.84k_t & \text{si } 0.35 < k_t \leq 0.75, \\ 0.177 & \text{si } k_t > 0.75. \end{cases} \tag{3.27}$$

Modelo de Reindl et al.: este modelo descrito en [Reindl et al., 1990a] es una versión del modelo de Orgill & Hollands que establece una función lineal para cada uno de los tres intervalos para el valor de k_t:

$$k_d = \begin{cases} 1.02 - 0.249k_t & \text{si } k_t \leq 0.30, \\ 1.45 - 1.67k_t & \text{si } 0.30 < k_t \leq 0.78, \\ 0.147k_t & \text{si } k_t > 0.78. \end{cases} \tag{3.28}$$

Obsérvese en la figura 8.10 que su ajuste es significativamente mejor que el obtenido mediante el modelo de Orgill & Hollands original.

3.4. Tipos de cielo: el Estándar CIE (2004)

La CIE [CIE, 2004] propone un modelo, descrito en esta Tesis en el apartado 1.7.2, para evaluar la radiancia y la luminancia del cielo mediante una función gradiente en comparación con la magnitud cenital. Los coeficientes a, b, c, d y e del citado modelo se agrupan en dos conjuntos de seis grupos que recogen a y b por un lado, para caracterizar la función gradiente de radiancia (véase la figura 3.2) y c, d y e por otro lado, para caracterizar la función indicatriz (véase la figura 3.3). En total se pueden dar hasta 36 combinaciones diferentes o tipos de cielo. Sin embargo, el modelo estándar, simplifica dichas 36 combinaciones a 15 tipos de cielo (en su versión revisada de 2004), que son los comúnmente utilizados por éste y otros modelos derivados. Dichos tipos de cielo y los valores de los coeficientes asociados se muestran en la tabla 3.9. La elección de estos 15 tipos de cielo respecto de las 36 combinaciones posibles se ha realizado atendiendo a los cielos observados con mayor frecuencia por término medio en todo el mundo.

Tabla 3.9: Coeficientes del modelo CIE Cielo General Estándar [CIE, 2004].

Tipo	**Breve descripción**	**a**	**b**	**c**	**d**	**e**
01-I.1	Cielo cubierto estándar CIE	4.0	−0.70	0.0	−1.0	0.00
02-I.2	Cielo cubierto con gradiancia escalonada y leve brillo circunsolar	4.0	−0.70	2.0	−1.5	0.15
03-II.1	Cielo cubierto con gradiancia moderada y uniformidad acimutal	1.1	−0.80	0.0	−1.0	0.00
04-II.2	Cielo cubierto con gradiancia moderada y leve brillo circunsolar	1.1	−0.80	2.0	−1.5	0.15
05-III.1	Cielo cubierto con niebla o ventoso, con luminancia uniforme	0.0	−1.00	0.0	−1.0	0.00
06-III.2	Parcialmente nuboso, sin gradiancia lumínica cenital y leve brillo circ.	0.0	−1.00	2.0	−1.5	0.15
07-III.3	Parcialmente nuboso, sin gradiancia lumínica cenital pero con región circunsolar brillante	0.0	−1.00	5.0	−2.5	0.30
08-III.4	Parcialmente nuboso, sin gradiancia lumínica cenital pero con corona solar	0.0	−1.00	10.0	−3.0	0.45
09-IV.2	Parcialmente nuboso con Sol oculto	−1.0	0.55	2.0	−1.5	0.15
10-IV.3	Parcialmente nuboso con región circunsolar brillante	−1.0	−0.55	5.0	−2.5	0.30
11-IV.4	Cielo azulado y corona solar distintiva	−1.0	−0.55	10.0	−3.0	0.45
12-V.4	Cielo claro o despejado estándar CIE. Muy leve turbidez atmosférica	−1.0	−0.32	10.0	−3.0	0.45
13-V.5	Cielo claro estándar CIE. Ligeramente turbio	−1.0	−0.32	16.0	−3.0	0.30
14-VI.5	Cielo despejado, con ligera turbidez y una ancha corona solar	−1.0	−0.15	16.0	−3.0	0.30
15-VI.6	Cielo azulado turbio con corona solar ancha	−1.0	−0.15	24.0	−2.8	0.15

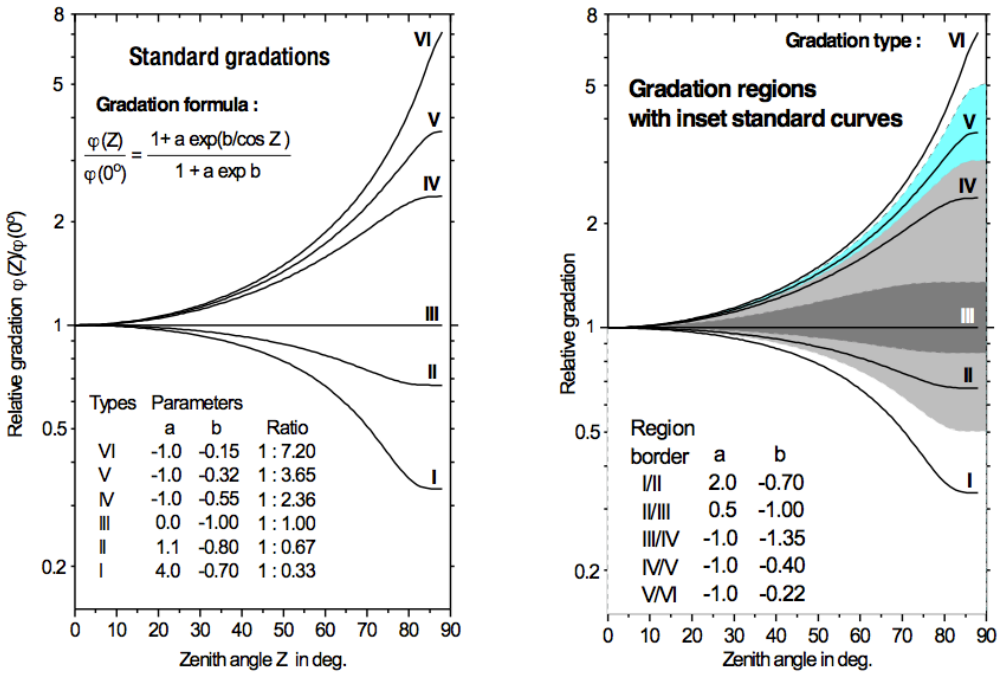


Figura 3.2: Funciones gradiente CIE. Fuente: [Perez and Darula, 1998].

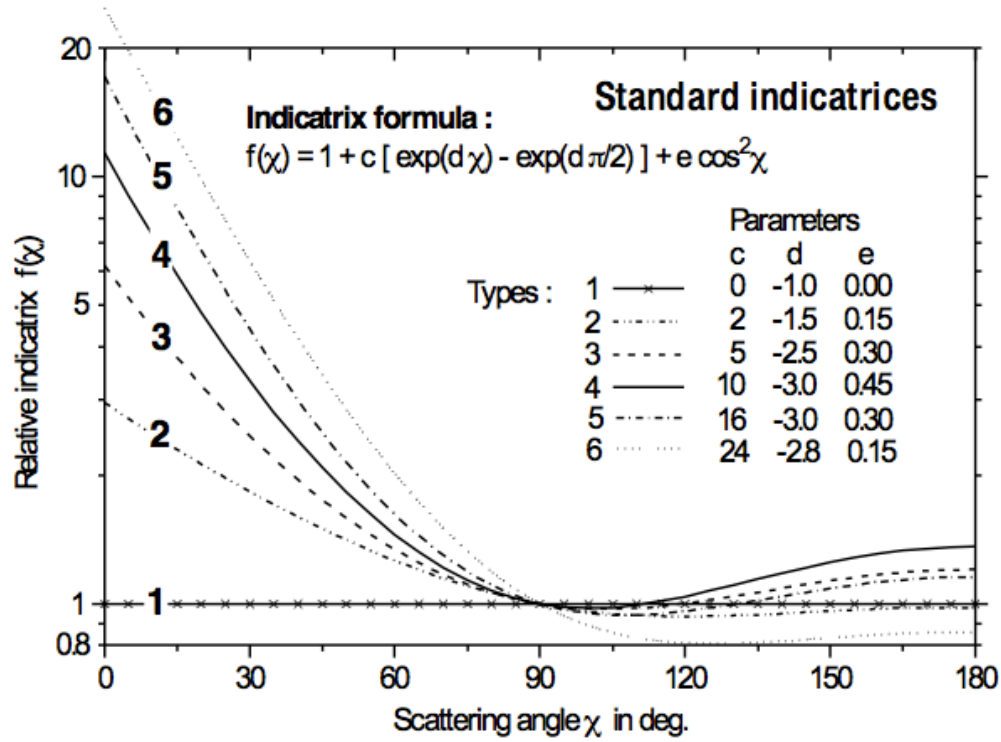


Figura 3.3: Funciones indicatrices CIE. Fuente: [Perez and Darula, 1998].

Sin embargo, no existe un procedimiento universalmente aceptado para determinar la clasificación de un cielo bajo determinados índices estadísticos. En [Badescu, 2008, Li et al., 2010, Li et al., 2013, Li et al., 2014] se proponen los siguientes procedimientos:

1. Mediante el análisis de las radiancias (o luminancias) relativas a la radiancia (o luminancia) difusa horizontal, en diferentes puntos, tal y como propone Tregenza en [Tregenza, 1999]. Idealmente se debe realizar un escaneo completo de la bóveda celeste (usualmente se registran 145 puntos de luminancia) y comparar su distribución con los valores obtenidos por los distintos tipos de cielo. En la actualidad se considera que este método es el más apropiado para realizar la clasificación de cielos [Li et al., 2014], pero también es el más costoso computacionalmente y requiere el uso de equipos muy sofisticados (véase el apartado B.4.1).

2. Una variante del método anterior consiste en comparar los valores teóricos obtenidos por las funciones gradiente $g(\theta)$ e indicatriz de difusión $f(\xi)$, con valores observados. La función gradiente se puede determinar a partir de medidas de radiancia o luminancia en al menos dos puntos del cielo, localizados uno en el plano del meridiano solar y otro perpendicular al mismo. Para la función indicatriz de difusión, es necesario conocer la radiancia o luminancia en puntos de con diferentes ángulos de elevación.

3. Mediante la caracterización de los tipos de cielo a través de los índices de claridad apropiados, Kittler et al. en [Kittler et al., 1997] determinaron un procedimiento gráfico (véase la figura 3.4) para identificar el tipo de cielo para elevaciones solares menores de 30° a partir del ratio entre la luminancia cenital, L_z, y la luminancia difusa en el plano horizontal, $D_v(0)$. El mayor inconveniente de este procedimiento reside en que, precisamente está limitado por ángulos de elevación solar pequeños. Como se aprecia en la figura 3.4 a partir del límite fijado de altura solar, las curvas características de cada tipo de cielo se cruzan, imposibilitando la identificación. Otros autores han propuesto otros índices, como se ha visto en la exposición de los índices de claridad del primer apartado de este capítulo, pero no se ha llegado a un consenso, y los rangos que deberían caracterizar los tipos de cielo dependen fuertemente de las condiciones locales.

   En [Li et al., 2013] se plantea un algoritmo de caracterización basado en el método expuesto por Kittler et al., pero añadiendo la información ofrecida por el parámetro de turbidez luminosa para alturas solares superiores a 35°. Este parámetro es especialmente útil para realizar la distinción de cielos en condiciones despejadas o parcialmente nubosas.

4. Finalmente, en [Li et al., 2014] se propone utilizar medidas de iluminancia o irradiancia sobre superficies verticales para realizar la identificación del tipo de cielo. Los autores consideran que el cociente entre la irradiancia difusa vertical en una

superficie enfrentada al Sol, respecto de la opuesta, puede identificar con claridad grupos de cielos en base al ángulo formado por la superficie expuesta al Sol y la posición del astro, θ_{sp}. Una vez identificado el grupo, salvo para el V, la identificación del tipo de cielo puede realizarse a partir del ratio entre la irradiancia difusa vertical y la irradiancia difusa horizontal para el ángulo θ_{sp}. Para el análisis del grupo V (que contiene los tipos de cielo 13 y 14) debe emplearse únicamente los valores de irradiancia difusa vertical con menor valor de θ_{sp}.

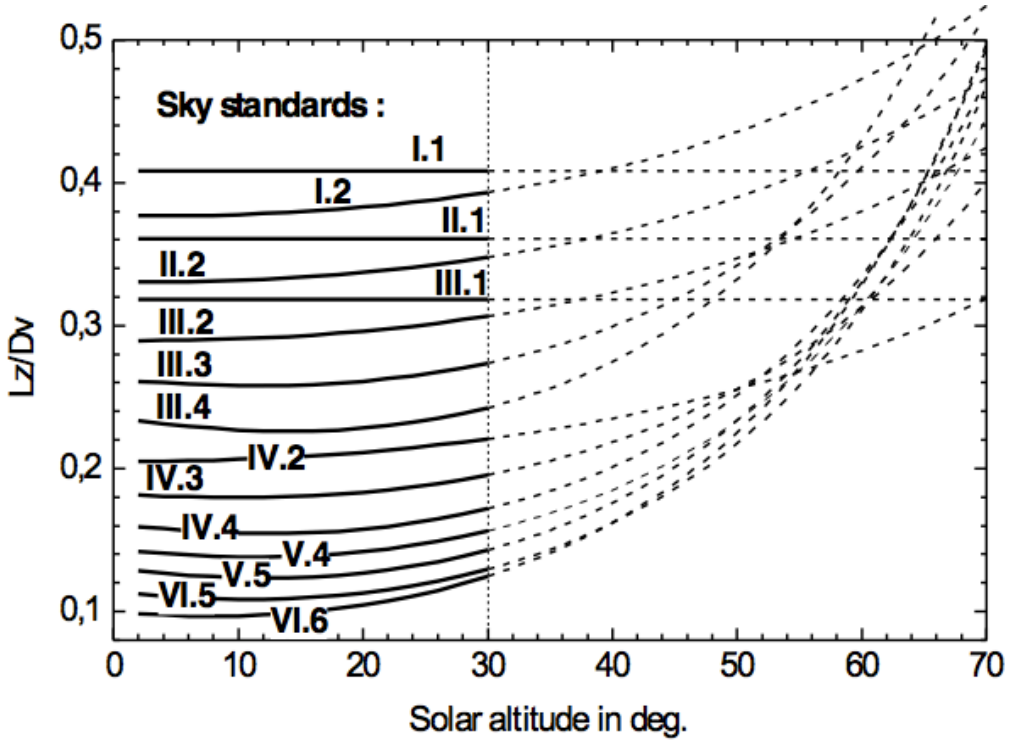


Figura 3.4: Tipos de cielo CIE estándar. Fuente: [Markou et al., 2007].

PARTE II: MEDIDA DE LA IRRADIANCIA

Descripción de la estación radiométrica y las características de las medidas tomadas. Caracterización del albedo. Desarrollo de un prototipo de estación radiométrica multidireccional y cálculo de la corrección total para sus medidas.

Capítulo 4

Campaña de medidas y gestión de los datos

4.1. Introducción

Para el desarrollo de los estudios expuestos en esta Tesis, se ha realizado una campaña de medidas que abarca desde septiembre del año 2014 hasta abril del año 2015. Estas observaciones se han incorporado a una base de datos del grupo de investigación SWIFT, que dispone de registros de la Agencia Española de Meteorología (AEMET) desde el año 1999 y de registros propios desde hace más de 3 años para algunas variables climáticas. Los datos han sido tomados en la micro-red radiométrica SWIFT, compuesta por las estaciones SWIFT0001 y SWIFT0002. La toma de datos se ha realizado según los estándares y procedimientos recomendados por la OMM, NREL y AEMET. El diseño de la base de datos ha seguido las formas normales pero se han aplicado las desnormalizaciones adecuadas para optimizar su rendimiento. Se describe así mismo en este capítulo el preprocesamiento de los datos y el cálculo de las incertidumbres de las medidas de irradiancia.

4.2. Micro-red radiométrica SWIFT

La Red Radiométrica Nacional posee únicamente 4 estaciones en la Comunidad Autónoma de Castilla y León, de las cuales sólo 3 miden valores de irradiancia solar. Con el objetivo de disponer de información más fiable del potencial solar en la región, el grupo de investi-

gación SWIFT de la Universidad de Burgos ha comenzado la creación de una micro-red de estaciones radiométricas equipadas con diversa instrumentación. La figura 4.1 muestra la ubicación de las estaciones de la red. Los datos empleados en esta Tesis han sido tomados en la estación SWIFT0001.

4.2.1. Estación SWIFT0001

La estación de medidas radiométricas SWIFT0001 se sitúa en la azotea del edificio A de la Escuela Politécnica Superior de Burgos, Campus de Río Vena, cuyas coordenadas geográficas son 42.351°N y −3.688°E, a una altitud sobre el nivel del mar (incluida la altura del edificio) de 857 m. La instalación incluye un total de 16 equipos de medida, que pueden apreciarse en la figura 4.3 y que se encuentran enumerados en la tabla 4.1. La instalación de los equipos se ha realizado de forma que unos no interfieran con otros y se respeten todas las recomendaciones e indicaciones de la OMM indicadas en [WMO, 2013]. La figura 4.2(b) muestra sendas vistas panorámicas del horizonte observado por los equipos de la estación, mostrando que aún estando instalada en un entorno urbano (véase la figura 4.2(a)), los obstáculos en el horizonte son mínimos y en ningún caso superan un ángulo de elevación de 10° (véase la figura 4.2(c)).

Se trata de una estación radiométrica completa, que incorpora sensores para la medida de las principales variables meteorológicas: temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica, agura precipitada y velocidad y dirección del viento, así como de las componentes de la radiación solar sobre plano horizontal. Dispone de un seguidor que le permite la medida de irradiancia directa mediante pirheliómetro, y de irradiancia difusa mediante disco solar. También se mide la irradiancia de albedo y la irradiancia global y difusa sobre planos verticales en las direcciones Norte, Sur, Este y Oeste.

Es en esta estación donde se ha instalado el prototipo MK6 [de Simón-Martín et al., 2014] para la medida de irradiancia difusa y reflejada en diversos planos. Su ubicación y montaje puede observarse en la figura 4.3(c). Nótese que ninguna otra estación de la región es capaz de ofrecer observaciones similares, por lo que constituye un notable avance en la caracterización radiométrica de la zona.

Los piranómetros empleados para la medida de las distintas componentes de la irradiancia son de Primera clase y han sido calibrados mediante un patrón Estándar Secundario. La tabla 4.2 recoge los requisitos a verificar para pertenecer a cada clase según la Organización Internacional de Estandarización (ISO) y la OMM. Las mayores diferencias residen en la evaluación de la no linealidad y en la especificación de la sensibilidad espectral. La calibración del instrumento patrón se ha realizado mediante el *"Método alternante"*, descrito en [Vignola et al., 2012], y de los instrumentos de campo mediante el procedimiento



(a)



(b)



(c)

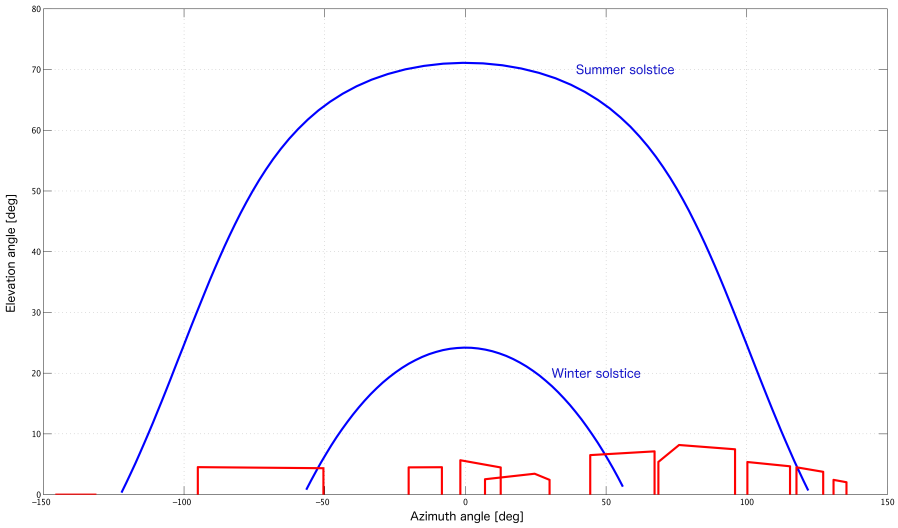
Figura 4.1: Ubicación de las estaciones pertenecientes a la micro-red SWIFT. a) Ubicación en la geografía española, siendo A: SWIFT0002 y B: SWIFT0001. b) Estación SWIFT0001. c) Estación SWIFT0002.



(a) Entorno de la estación urbana SWIFT0001 (ubicada en POS1).



(b) Vistas panorámicas hacia el Norte y hacia el Sur.



(c) Estudio de obstáculos en el horizonte.

Figura 4.2: Estudio de obstáculos de la estación SWIFT0001.

Tabla 4.1: Relación de instrumentos de medida instalados en la estación SWIFT0001.

ID	Uds.	Equipo	Marca/Modelo	Variable
01	1	Sonda de temperatura ambiente en bulbo seco y humedad rel.	VAISALA/HMD50U	Temperatura ambiente y humedad relativa
02	1	Barómetro	Campbell/CS106	Presión atmosférica
03	1	Anemómetro	RM YOUNG/03101	Velocidad de viento
04	1	Veleta	RM YOUNG/03301	Dirección de viento
05	1	Pluviómetro	RM YOUNG/52203	Agua precipitada
06	1	Piranómetro hor.	Hukseflux/SR11	Irradiancia global hor.
07	1	Piranómetro sobre seguidor con disco de sombra	Hukseflux/SR11	Irradiancia difusa hor.
08	1	Pirheliómetro	Hukseflux/DR01	Irradiancia directa
09	1	Piranómetro vertical Norte	Ph. Schenk 8101	Irradiancia global plano vertical dirección Norte
10	1	Piranómetro vertical Sur	Ph. Schenk 8101	Irradiancia global plano vertical dirección Sur
11	1	Piranómetro vertical Este	Ph. Schenk 8101	Irradiancia global plano vertical dirección Este
12	1	Piranómetro vertical Oeste	Ph. Schenk 8101	Irradiancia global plano vertical dirección Oeste
13	1	Albedómetro	SIR SKS-1110	Irradiancia reflejada
14	1	Dispositivo MK6	Fabricación propia	Irradiancia difusa en plano vertical direcciones N, S, E y W
15	1	Seguidor solar	Geónica SunTracker-3000	Accesorio para irradiancia directa y difusa horizontal
16	1	Datalogger	Campbell/CR3000	Almacenamiento datos



Figura 4.3: Estación de medidas radiométricas SWIFT0001. a) Panorámica general de la estación. b) Torre de medida de irradiancia global sobre plano vertical, veleta y anemómetro. c) Torre de medida de irradiancia difusa mediante anillo lobular. d) Pluviómetro y seguidor con disco solar para la medida de irradiancia difusa sobre plano horizontal, irradiancia global horizontal e irradiancia directa con pirheliómetro.

indicado en el apartado B.6.

Tabla 4.2: Clasificación de los piranómetros según la OMM/ISO.

Característica	**Estándar Secundario**	**Primera clase**	**Segunda clase**
Calidad	Muy alta	Alta	Media
Resolución [$\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$]	± 1	± 5	± 10
Estabilidad [%]	± 0.8	± 1.5	± 2
Respuesta coseno [%]	$< \pm 3$	$< \pm 7$	$< \pm 15$
Respuesta acimutal [%]	$< \pm 3$	$< \pm 5$	$< \pm 10$
Respuesta de T [%]	± 2	± 4	± 8
Respuesta inc. [%]	± 0.5	± 2	± 5
No linealidad [%]	$\pm 0.5/\pm 0.2$	$\pm 1/\pm 0.5$	$\pm 3/\pm 2$
Sensibilidad espec. [%]	± 2	± 5	± 10
Tiempo de respuesta (95 % respuesta)	< 15s	< 30 s	< 60 s
Tiempo de respuesta (99 % respuesta)	< 25s	< 1 min	< 4 min
Aplicaciones	Patrones	Estaciones	Otros

4.3. Campaña de medidas

Se ha llevado a cabo una campaña de medidas de variables radiativas y meteorológicas, que abarca **desde el 01 de septiembre de 2014 hasta el 30 de abril de 2015**. Los registros son tomados cada diez minutos y las características del sistema de adquisición y gestión de las medidas recogidas se exponen a continuación.

Para llevar a cabo la campaña de medidas mencionada se ha diseñado un sistema apropiado. Éste se compone los siguientes elementos principales (véase la figura 4.4):

Conjunto de sensores/transductores: el sensor es el elemento sensible a la variable que se desea medir y el transductor transforma la modificación del estado del sensor producida por el valor de la magnitud medida en una señal de salida, normalmente eléctrica y proporcional a la magnitud medida, legible, interpretable y almacenable.

Sistema de adquisición de datos: se compone de un registrador o *"datalogger"*, que es el equipo que realiza la lectura y almacena las señales emitidas por los transductores en campo. Suele incorporar las constantes de calibración de los distintos equipos, pero no realiza ninguna modificación o tratamiento de las medidas.

Sistema de gestión y almacenamiento de datos: base de datos en la cual se vuelcan los registros almacenados en el datalogger, con una estructura adecuada a las necesidades organizativas y de los usuarios finales. También realiza operaciones de preprocesamiento de los datos y asigna los criterios de calidad de los mismos.

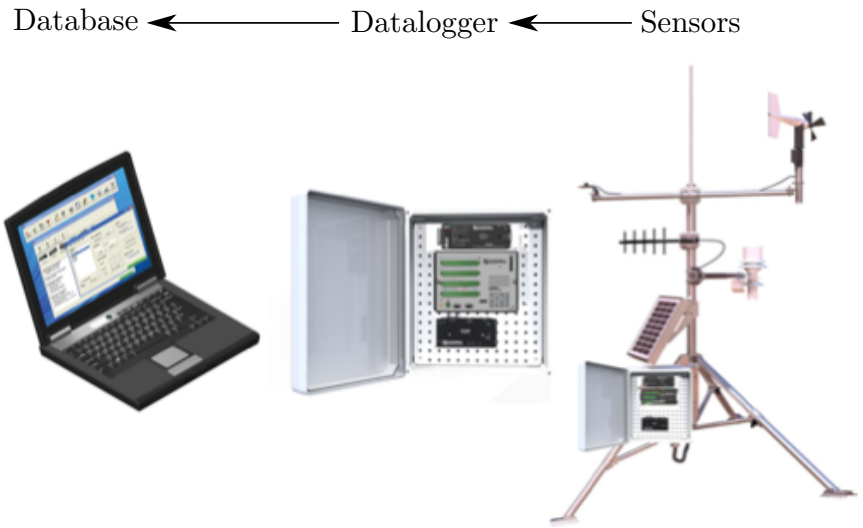
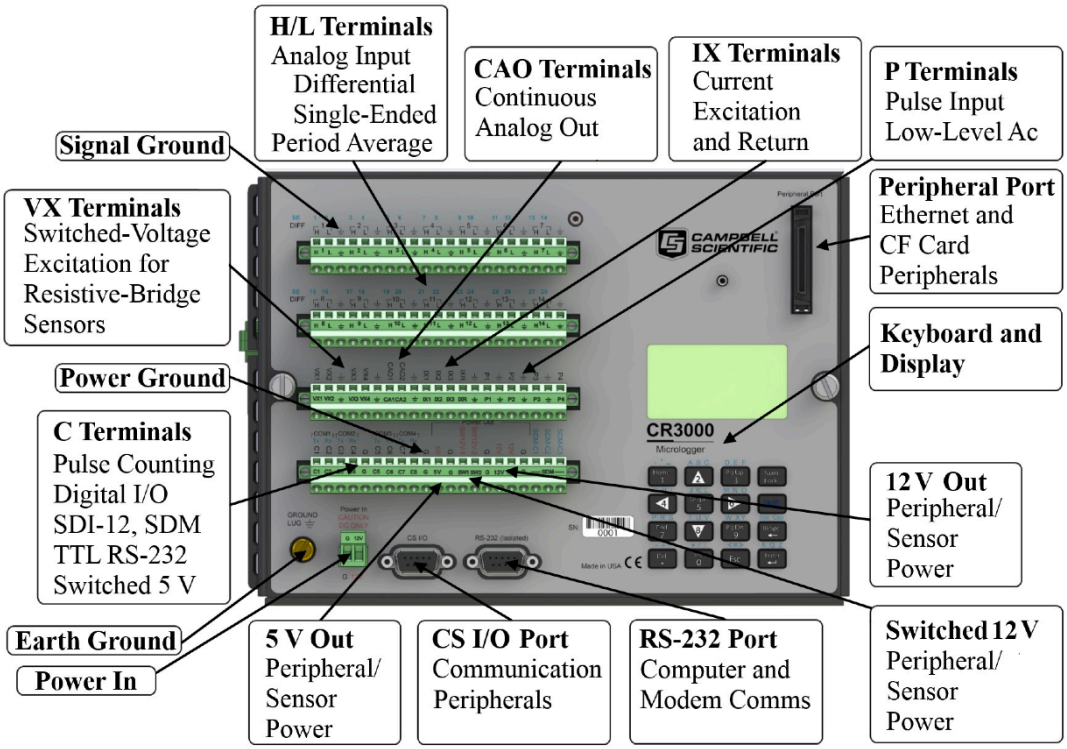


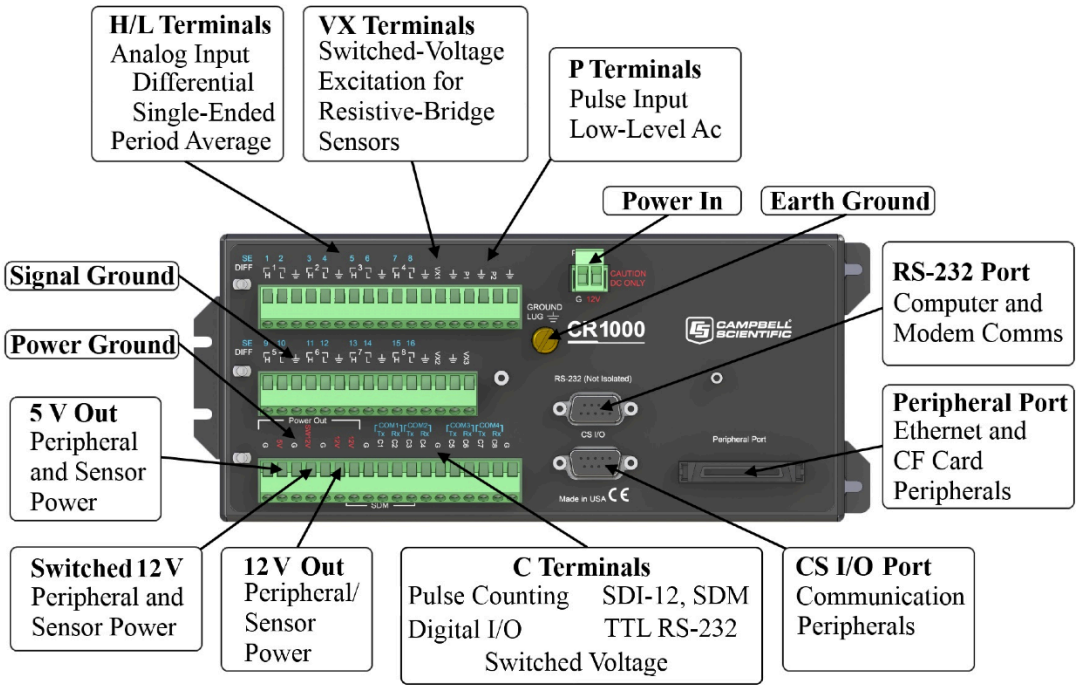
Figura 4.4: Elementos del sistema adoptado para la medida.

4.3.1. Sistema de adquisición de datos

Los datos de los sensores descritos en cada una de las estaciones radiométricas se han tomado mediante dataloggers marca Campbell modelo CR3000 (véase la figura 4.5(a)) y modelo CR1000 (véase la figura 4.5(b)). Cada uno de los sensores se encuentra conectado al datalogger, según sus características (si la señal generada por el transductor es digital o analógica, el nivel de tensión de funcionamiento, la necesidad de un puente de resistencias, etc.). Ambos modelos de datalogger almacenan las señales transmitidas por los sensores con una frecuencia de lectura programada por el usuario, almacenando los datos en una memoria interna. El datalogger dispone de una comunicación por puerto serie COM y puerto Ethernet para el acceso remoto.



(a) CR3000.



(b) CR1000.

Figura 4.5: Esquemas e indicación de puertos de los datalogger empleados.

4.3.2. Registro de medidas

El sistema de adquisición de datos almacena las medidas tomadas en un fichero de extensión ***.dat**, donde cada registro se almacena por renglones, cada campo va separado por comas y cada medida se imprime como una cadena de caracteres entrecomillada.

El sistema se ha programado para generar un fichero mensual identificado como:

"IDEST-AÑO-MES-COD.dat",

siendo **IDEST** el identificador de la estación de medida (**"0001"** para SWIFT0001 y **"0002"** para SWIFT0002) y **COD** el código correspondiente al intervalo temporal de medida, y que puede adoptar los valores de **"10M"** para diez-minutal, **"H"** para horario y **"D"** para diario. Así el archivo *"0001-2014-07-10M.dat"* recoge las medidas diez-minutales de todo el mes de julio de 2014 para la estación SWIFT0001.

Los datos quedan registrados en intervalos diez-minutales, y se calculan como los valores medios de los valores minutales registrados internamente. Un ejemplo de la estructura de un fichero de datos se muestra a continuación:

```
1 "TIMESTAMP","RECORD","Norte_Avg","Sur_Avg","Este_Avg","Oeste_Avg","
    SlrW_DNORT_Avg","SlrW_DSUR_Avg","SlrW_DESTE_Avg","SlrW_DOESTE_Avg","
    SlrW_GLOBAL_Avg","SlrW_DIFUSA_Avg","SlrW_DIRECTA_Avg","SlrkJ_DNORT_Tot","
    SlrkJ_DSUR_Tot","SlrkJ_DESTE_Tot","SlrkJ_DOESTE_Tot","SlrkJ_GLOBAL_Tot","
    SlrkJ_DIFUSA_Tot","SlrkJ_DIRECTA_Tot","BP_mbar_Avg","RH_Avg","Temp_Avg","
    Plu_Tot","WS_WVc(1)","WS_WVc(2)","T_Logger_Avg","Bateria_Avg"
2 "2015-02-02
    02:20:00",158,-0.6361145,-5.088967,-0.4581089,0.1570404,-0.4065817,
    -0.2711127,-0.3219507,-0.3118626,-0.9931684,-0.981921,-0.01561477,
    -1.219745,-0.813338,-0.9658522,-0.9355876,-0.595901,-0.5891526,
    -0.009368864,1086,92.2,0.481,0,1.963,210.6,1.214,13.62
3 "2015-02-02
    02:30:00",159,-0.650879,-5.072444,-0.4706629,0.1067173,-0.3388538,
    -0.2257068,-0.261503,-0.2893352,-0.6994761,-0.6795133,-0.002381933,
    -1.016562,-0.6771205,-0.7845089,-0.8680053,-0.4196856,-0.407708,
    -0.00142916,1086,92,0.523,0,2.235,207.9,1.23,13.62
```

4.4. Criterios de calidad de los datos

De acuerdo con las indicaciones dadas en [CIE, 1994, WMO, 2013, Sengupta et al., 2015, Cess et al., 2000, Muneer, 2004, Badescu, 2008, Vignola et al., 2012, Myers, 2013] y demás bibliografía, para la medida de las distintas variables climáticas y radiativas han de aplicarse diversos criterios de calidad. Estos criterios pueden clasificarse en dos tipos:

Test de coherencia individual: dentro de estos test de calidad se incluyen aquellos criterios en los que la variable permanece dentro de unos límites determinados. Estos límites están definidos por el rango de valores físicamente posibles que pueda tomar.

Test de coherencia temporal: estas prueban eliminan aquellos valores que producen una variación brusca en la serie temporal del parámetro estudiado. La tasa de muestreo y registro de medidas es tal que no existe una razón justificada para que se produzcan cambios superiores a un determinado límite entre dos valores consecutivos. Dicho límite, normalmente expresado como una tasa de variación, dependerá del tipo de variable y el propio criterio del investigador.

Se establecen entonces una serie de niveles de confianza para las observaciones según la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Códigos de calidad de las variables medidas.

Código	Descripción
0	Valor obtenido durante la calibración del equipo.
1	El dato no se ha sometido a ningún proceso de validación.
2	Ha superado el test de los límites (está dentro de escala).
3	Ha superado el test de coherencia temporal (el registro posee fecha y hora válidos).
4	Ha superado el test de coherencia interna.
5	Ha superado el test de coherencia temporal en la serie.
6	Ha superado el test de coherencia espacial.
7	El dato se considera no válido.
8	El dato no fue registrado.
9	El dato ha sido interpolado o es un dato derivado.

Mediante esta metodología, no sólo podemos realizar un adecuado filtrado de datos, sino

que además, en el caso de obtener medidas sospechosas de ser erróneas, podemos detectar rápidamente su causa y evitar una pérdida de gran magnitud en la campaña de medidas.

Específicamente, para las medidas de irradiancia tomadas, los test de coherencia aplicados se indican a continuación.

Irradiancia global

1. Se eliminan los valores correspondientes a una elevación o altura solar $h_s \leq 5^{\text{o}}$.
2. Se eliminan los valores de $G(0) < 0.19$ W·m^{-2}.
3. Se desprecian los valores de irradiancia global mayores que 1.2 veces la constante solar: $G(0) > 1.2B_{sc}$
4. Se rechazan valores que no verifiquen: $G(0)_i \in (0.2G(0)_{i-1}, 2.0G(0)_{i-1})$. Dichos valores se sustituyen por su valor interpolado linealmente: $G(0)_i = (G(0)_{i-1}+G(0)_{i+1})/2$, siempre y cuando: $G(0)_{i+1} \in (0.04G(0)_{i-1}, 4.0G(0)_{i-1})$.

Irradiancia directa

1. Se eliminan los valores correspondientes a una elevación o altura solar $h_s \leq 5^{\text{o}}$.
2. Se desprecian los valores de irradiancia directa medida con el pirheliómetro mayores que la constante solar: $B(n) > B_{sc}$.
3. Se eliminan los valores de $B(n) < 0.19$ W·m^{-2}.
4. Se rechazan los datos que no satisfacen la condición: $B(n)/B_{sc} \geq G(0)/(B_{sc}\cos\theta_{zs}) - 0.5$.
5. Se rechazan valores que no verifiquen: $B(n)_i \in (0.1B(n)_{i-1}, 2.5B(n)_{i-1})$. Dichos valores se sustituyen por su valor interpolado linealmente: $B(n)_i = (B(n)_{i-1} + B(n)_{i+1})/2$, siempre y cuando: $B(n)_{i+1} \in (0.01B(n)_{i-1}, 6.25B(n)_{i-1})$.

Irradiancia difusa

1. Se eliminan los valores correspondientes a una elevación o altura solar $h_s \leq 5^{\text{o}}$.
2. Se rechazan todos los valores de irradiancia difusa mayores que 1.15 veces el correspondiente valor de irradiancia global: $D(0) > 1.15G(0)$.

3. Se desprecian los valores de irradiancia difusa mayores que 0.8 veces la constante solar: $D(0) > 0.8B_{sc}$.

4. Se eliminan los valores de $D(0) < 0.19$ W·m^{-2}.

5. Se rechazan valores que no verifiquen: $D(0)_i \in (0.2D(0)_{i-1}, 2.0D(0)_{i-1})$. Dichos valores se sustituyen por su valor interpolado linealmente: $D(0)_i = (D(0)_{i-1} + D(0)_{i+1})/2$, siempre y cuando: $D(0)_{i+1} \in (0.04D(0)_{i-1}, 4.0D(0)_{i-1})$.

Irradiancia de albedo

1. Se eliminan los valores correspondientes a una elevación o altura solar $h_s \leq 5^{\circ}$.

2. Se eliminan los valores de $R(180) < 0.19$ W·m^{-2}.

3. Se desprecian los valores de irradiancia reflejada mayores que la irradiancia global horizontal: $R(180) > G(0)$.

4. Se rechazan valores que no verifiquen: $R(180)_i \in (0.2R(180)_{i-1}, 2.0R(180)_{i-1})$. Dichos valores se sustituyen por su valor interpolado linealmente: $R(180)_i = (R(180)_{i-1} + R(180)_{i+1})/2$, siempre y cuando: $R(180)_{i+1} \in (0.04R(180)_{i-1}, 4.0R(180)_{i-1})$.

Valores atípicos

Los valores atípicos o *"outliers"* son aquellos que, aún pasando todos los criterios de calidad y coherencia citados anteriormente, presentan un comportamiento anómalo. El problema reside en que su presencia puede afectar negativamente al ajuste de los modelos en dos sentidos: por intentar ajustar mejor a los valores atípicos, el ajuste es peor con los valores normales, y los índices de rendimiento del modelo empeoran significativamente. Para evitar estos inconvenientes se debe adoptar un criterio, comúnmente utilizado en esta y otras disciplinas, para eliminar estos valores de la población de medidas considerada.

Cada dato atípico debería ser analizado con detenimiento para verificar que no exista una explicación lógica de su comportamiento. Los algoritmos de detección y eliminación automática de estos valores, no son siempre muy precisos y podría perderse información valiosa de valores correctos, pero próximos al límite [Muneer, 2004].

En este caso se ha aplicado el criterio estadístico de los cuartiles, en el que se identifican dos tipos de valores atípicos [Montgomery and Peck, 1992, Draper and Smith, 1998, Muneer, 2004, Badescu, 2008]:

- **Valor atípico próximo:** posee altas probabilidades de ser un valor anómalo. Se encuadran aquí todos aquellos valores situados por debajo del primer cuartil menos 1.5 veces la distancia intercuartílica[1], o por encima del tercer cuartil más 1.5 veces la citada distancia.

$$X_i < Q_1 - 1.5IQ = Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1) \text{ o } X_i > Q_3 + 1.5IQ = Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1). \quad (4.1)$$

- **Valor atípico lejano:** tiene muy altas probabilidades de ser un valor anómalo por situarse muy alejado de la mediana de la población de estudio. Estos valores se encuentran por debajo del primer cuartil menos 3 veces la distancia intercuartílica o por encima del tercer cuartil más 3 veces la citada distancia.

$$X_i < Q_1 - 3IQ = Q_1 - 3(Q_3 - Q_1) \text{ o } X_i > Q_3 + 3IQ = Q_3 + 3(Q_3 - Q_1). \quad (4.2)$$

Los valores atípicos que se han detectado en la campaña de medidas representan una proporción inferior al 5 % del conjunto total de datos tomados. El caso contrario sería un síntoma de graves deficiencias en el sistema de medición.

4.5. Incertidumbre de la medida de irradiancia solar

A continuación se expone el cálculo de las incertidumbres de medida de todos los sensores utilizados. El análisis realizado se centra en la evaluación tipo B (véase la sección D.4). Dado que son equipos instalados en campo y no en laboratorio, y las condiciones climáticas son cambiantes, no es posible realizar una evaluación tipo A de las incertidumbres (se considera que cada medida se ha tomado una única vez), dado que no es posible realizar varias observaciones en las mismas condiciones. Como aproximación se tomará la incertidumbre de calibración certificada del equipo [Stoffel et al., 2010].

Ecuación de medida

Dependiendo de las componentes de la irradiancia, las ecuaciones de medida son:

Irradiancia global:

$$G = \frac{V - S_{net} I_{net}}{S_G}. \quad (4.3)$$

Irradiancia difusa:

$$D = f_c \frac{V - S_{net} I_{net}}{S_D}. \quad (4.4)$$

[1] Se define la distancia intercuartílica como la diferencia entre el tercer y el primer cuartil: $IQ = Q_3 - Q_1$.

Nótese que para la medida de irradiancia difusa horizontal, al ser realizada mediante disco solar o bola de sombra con seguidor: $f_c = 1$.

Irradiancia directa:

$$B = \frac{V - S_{net} I_{net}}{S_B}. \tag{4.5}$$

Irradiancia reflejada:

$$R = \frac{V - S_{net} I_{net}}{S_R}. \tag{4.6}$$

Donde V es la tensión de salida del piranómetro o pirheliómetro (irradiancia directa) en [μV], S_{net} es la respuesta del piranómetro para la longitud de onda neta estimada o calculada mediante caracterización de cuerpo negro [$\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$], I_{net} es la irradiancia de longitud de onda neta medida por un pirgeómetro [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] y S_G, S_D, S_B y S_R son las constantes de calibración de los sensores para irradiancia global, difusa, directa y reflejada respectivamente [$\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$].

Obsérvese que todas las variables de las ecuaciones de medida expuestas se han medido o calculado utilizando métodos independientes, por lo que se asume que su coeficiente de correlación es nulo.

Por otro lado, se considera que la componente de irradiancia de longitud de onda neta en la medida, es despreciable respecto al valor de la propia medida, por lo que no será tenida en cuenta en el resto del cálculo de la incertidumbre.

Coeficientes de sensibilidad

Tabla 4.4: Coeficientes de sensibilidad para medidas de irradiancia.

Variable	**Cálculo**	G, B, R	D
Tensión de salida	$c_V = \frac{\partial Y}{\partial V}$	$c_V = \frac{1}{S_Y}$	$c_V = \frac{f_c}{S_Y}$
Constante del sensor	$c_S = \frac{\partial Y}{\partial S_Y}$	$c_S = \frac{-V}{S_Y^2} = \frac{-Y}{S_Y}$	$c_S = \frac{-f_c V}{S_Y^2} = \frac{-f_c Y}{S_Y}$
Medida tomada	$c_Y = \frac{\partial Y}{\partial Y}$	$c_Y = 1$	$c_Y = f_c$

Fuentes de error e incertidumbres estándar

Cada una de las variables de las ecuaciones de medida (4.3), (4.4), (4.5) y (4.6), lleva asociadas una serie de fuentes de error e incertidumbre.

Para la tensión de salida del sensor registrada en el datalogger, las fuentes de error asociadas se muestran en la tabla 4.5 en función de cada uno de los modelos empleados.

En ambos instrumentos, el fondo de escala empleado es la más precisa posible para el rango de la variable medida: $fe = \pm 20$ mV, y dado que poseen una precisión de conversión Analógico/Digital de 16 bits, la incertidumbre por fondo de escala se determina mediante:

$$u_{fe} = \frac{fe}{2^{16+1}} = \frac{20\,000\,\mu\text{V}}{2^{17}} = 0.15\,\mu\text{V}. \tag{4.7}$$

Las pérdidas eléctricas por la longitud de los cables desde el sensor hasta el equipo datalogger se han estimado en $\pm 0.02\,\%$.

Tabla 4.5: Fuentes de error e incertidumbres estándar de la tensión de salida.

Fuente	**Incertidumbre expandida**	**Distr.**	$\mathbf{u_i/u_{std,i}}$
Precisión CR1000	$\pm(0.12\,\% + 22.1\ \mu\text{V})$	Rect.	$\sqrt{3}$
Precisión CR3000	$\pm(0.07\,\% + 4.01\ \mu\text{V})$	Rect.	$\sqrt{3}$
Fondo escala	$0.15\ \mu\text{V}$	Rect.	$\sqrt{3}$
Pérdidas eléctricas	$\pm 0.02\,\%$	Rect.	$\sqrt{3}$
CR1000 $\sum u_i$	$0.14\,\% + 22.11\ \mu\text{V}$	-	-
CR1000 $\sqrt{\sum u_{std,i}^2}$	$\sqrt{4.8\text{E-}7V^2 + 0.018V + 235.8}\ \mu\text{V}$	-	-
CR3000 $\sum u_i$	$0.09\,\% + 4.16\ \mu\text{V}$	-	-
CR3000 $\sqrt{\sum u_{std,i}^2}$	$\sqrt{1.6\text{E-}7V^2 + 1.9\text{E-}3V + 5.37}\ \mu\text{V}$	-	-

La tabla 4.6 muestra las fuentes de error y las incertidumbres asociadas de la respuesta de los sensores. La denominación **Glo §1** corresponde al piranómetro PhSchenk 8101 utilizado para la medida de irradiancia global vertical en la estación SWIFT0001. La denominación **Glo. §2** corresponde al piranómetro Hukseflux modelo SR11 utilizados para la medida de irradiancia global y difusa. La medida de irradiancia directa se ha efectuado mediante un pirheliómetro Hukseflux DR01 y la de irradiancia reflejada mediante un piranómetro de célula de silicio SIR modelo SKS-1110. Los valores mostrados en la tabla corresponden con las especificaciones dadas por los respectivos fabricantes en los manuales y hojas de

calibración de los equipos suministrados.

Tabla 4.6: Fuentes de error e incertidumbres estándar de la constante del sensor.

Fuente	**Glo. §1**	**Glo. §2**	**Difusa**	**Directa**	**Reflejada**	$\mathbf{u_i/u_{std,i}}$
Calibración	±3 %	±1.8 %	±1.8 %	±0.3 %	±4 %	$k = 2$
Resp. coseno	±3 %	0 %	0 %	0 %	±3 %	$\sqrt{3}$
Resp. acimutal	±1 %	0 %	0 %	0 %	±1 %	$\sqrt{3}$
Resp. espectral	±1 %	±0.2 %	±0.2 %	±1 %	±5 %	$\sqrt{3}$
Inclinación	±0.2 %*	±2 %*	±2 %*	±0.5 %	0 %	$\sqrt{3}$
No linealidad	±1 %	±1 %	±1 %	±0.5 %	±0.2 %	$\sqrt{3}$
Resp. temp.	±0.03 %	±2 %	±2 %	±4 %	±0.2 %	$\sqrt{3}$
Estabilidad anual	±1 %	±1 %	±1 %	±1 %	±2 %	$\sqrt{3}$
$\sum u_i$	±10.23 %*	±8.0 %*	±8.0 %*	±7.3 %	±15.4 %	-
$\sqrt{\sum u_{std,i}^2}$	±2.57 %*	±2.04 %*	±2.04 %*	±2.49 %	±4.13 %	-

*En los sensores horizontales no existe esta fuente de error, resultando en estos casos la suma de las incertidumbres expandidas 10.03 % y la combinación de las incertidumbres estandarizadas 2.56 % para el modelo PhSchenk 8101 y 6 % y 1.68 % respectivamente para el modelo Hukseflux SR11.

Finalmente, la tabla 4.7 muestra las fuentes de error e incertidumbres asociadas al propio valor de la medida tomada, usualmente las desviaciones del cero y la respuesta direccional cuando ésta no es evaluada como respuesta coseno y respuesta acimutal en la constante del sensor.

Las desviaciones de la respuesta cero, o *"zero offsets"*, tienen lugar cuando aún existe señal y el sensor no está absorbiendo radiación en la longitud de onda del espectro del equipo. El zero offset A está relacionado con el flujo de energía térmico intercambiado entre el propio sensor, el cristal de la cúpula y el cielo. El zero offset tipo B, en cambio depende de la temperatura del piranómetro [Padovan and Del Col, 2010].

Incertidumbre expandida

Se calcula la incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95 % aplicando la ecuación (D.21) en la que se multiplica a la incertidumbre estándar combinada, u_C, por el factor de cobertura $k_c = 2$ en este caso.

$$U_{0.95} = k_c u_C = k_c \sqrt{c_V^2 u_{std,V}^2 + c_S^2 u_{std,S}^2 + c_Y^2 u_{std,Y}^2}. \tag{4.8}$$

Tabla 4.7: Fuentes de error e incertidumbres estándar de la medida.

Fuente	**Glo. §1** [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	**Glo. §2** [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	**Difusa** [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	**Directa** [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	**Reflejada** [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	$\mathbf{u_i/u_{std,i}}$
Resp. direccional	0	±20	±2	±20	±2	$\sqrt{3}$
Zero offset A	< 1	< 5	< 5	< 1	< 1	$2\sqrt{3}$
Zero offset B	0	±4	±4	0	±3	$\sqrt{3}$
$\sum u_i$	< 1	< 29	< 11	< 21	< 6	-
$\sqrt{\sum u_{std,i}^2}$	< 0.29	< 11.86	< 2.96	11.55	2.10	-

Así, para cada medida de irradiancia se obtiene:

Irradiancia global horizontal (Glo. §2) con datalogger CR1000:

$$U_{0.95} = 2\sqrt{2.83\text{E-}4G^2 + 1.8\text{E-}2\frac{V}{S_{G2}^2} + \frac{235.8}{S_{G2}^2} + 140.66} \leq 4.2\,\%\,(G = 1\,000\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}), \tag{4.9}$$

siendo G la medida de irradiancia global registrada, V es la señal de tensión de salida del sensor ($V \leq 20\text{E}3$ μV) y S_{G2} su respuesta ($S_{G2} \approx 15$ $\mu\mathrm{V{\cdot}W^{-1}{\cdot}m^2}$). Recuérdese que el valor real de la respuesta del equipo se determina en su calibración.

Irradiancia global horizontal (Glo. §2) con datalogger CR3000:

$$U_{0.95} = 2\sqrt{2.82\text{E-}4G^2 + 1.9\text{E-}3\frac{V}{S_{G2}^2} + \frac{5.37}{S_{G2}^2} + 140.66} \leq 4.2\,\%\,(G = 1\,000\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}), \tag{4.10}$$

siendo G la medida de irradiancia global registrada, V es la señal de tensión de salida del sensor ($V \leq 20\text{E}3$ μV) y S_{G2} su respuesta ($S_{G2} \approx 15$ $\mu\mathrm{V{\cdot}W^{-1}{\cdot}m^2}$). Recuérdese que el valor real de la respuesta del equipo se determina en su calibración.

Irradiancia global vertical Glo. §1 (CR3000):

$$U_{0.95} = 2\sqrt{6.61\text{E-}4G^2 + 1.9\text{E-}3\frac{V}{S_{G1}^2} + \frac{5.37}{S_{G1}^2} + 84.1\text{E-}3} \leq 5.2\,\%\,(G = 1\,000\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}), \tag{4.11}$$

siendo G la medida de irradiancia global registrada, V es la señal de tensión de salida del sensor ($V \leq 20\text{E}3$ μV) y S_{G1} su respuesta ($S_{G1} \approx 15$ $\mu\mathrm{V{\cdot}W^{-1}{\cdot}m^2}$). Recuérdese que el valor real de la respuesta del equipo se determina en su calibración.

Irradiancia global vertical Glo. §2 (CR1000):

$$U_{0.95} = 2\sqrt{4.16\text{E-}4G^2 + 1.8\text{E-}2\frac{V}{S_{G2}^2} + \frac{235.8}{S_{G2}^2} + 140.66} \leq 4.8\,\%\,(G = 1\,000\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}), \tag{4.12}$$

siendo G la medida de irradiancia global registrada, V es la señal de tensión de salida del sensor ($V \leq 20\text{E}3$ μV) y S_{G2} su respuesta ($S_{G2} \approx 15$ $\mu\mathrm{V\cdot W^{-1}\cdot m^2}$). Recuérdese que el valor real de la respuesta del equipo se determina en su calibración.

Irradiancia difusa horizontal (CR3000):

$$U_{0.95} = 2\sqrt{2.82\text{E-}4f_c^2D^2 + 1.9\text{E-}3\frac{f_c^2V}{S_D^2} + \frac{5.37f_c^2}{S_D^2} + 8.76f_c^2} \leq 4.6\,\%\,(D = 200\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}), \tag{4.13}$$

siendo D la medida de irradiancia difusa registrada sin corregir, f_c el coeficiente de corrección ($f_c \approx 1$), V es la señal de tensión de salida del sensor($V \leq 20\text{E}3$ μV) y S_D su respuesta ($S_D \approx 15$ $\mu\mathrm{V\cdot W^{-1}\cdot m^2}$). Recuérdese que el valor real de la respuesta del equipo se determina en su calibración.

Irradiancia difusa vertical (CR3000):

$$U_{0.95} = 2\sqrt{4.16\text{E-}4f_c^2D^2 + 1.9\text{E-}3\frac{f_c^2V}{S_D^2} + \frac{5.37f_c^2}{S_D^2} + 8.76f_c^2} \leq 5.6\,\%\,(D = 200\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}), \tag{4.14}$$

siendo D la medida de irradiancia difusa registrada sin corregir, f_c el coeficiente de corrección ($f_c \leq 1.5$), V es la señal de tensión de salida del sensor ($V \leq 20\text{E}3$ μV) y S_D su respuesta ($S_D \approx 15$ $\mu\mathrm{V\cdot W^{-1}\cdot m^2}$). Recuérdese que el valor real de la respuesta del equipo se determina en su calibración.

Irradiancia directa (CR3000):

$$U_{0.95} = 2\sqrt{6.21\text{E-}4B^2 + 1.9\text{E-}3\frac{V}{S_B^2} + \frac{5.37}{S_B^2} + 133.40} \leq 5.5\,\%\,(B = 1\,000\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}), \tag{4.15}$$

siendo B la medida de irradiancia directa registrada, V es la señal de tensión de salida del sensor ($V \leq 50\text{E}3$ μV) y S_B su respuesta ($S_B \approx 25$ $\mu\mathrm{V\cdot W^{-1}\cdot m^2}$). Recuérdese que el valor real de la respuesta del equipo se determina en su calibración.

Irradiancia reflejada (CR1000):

$$U_{0.95} = 2\sqrt{1.71\text{E-}3R^2 + 1.8\text{E-}2\frac{V}{S_R^2} + \frac{235.8}{S_R^2} + 4.41} \leq 3.9\,\%\,(R = 200\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}), \tag{4.16}$$

siendo R la medida de irradiancia reflejada registrada, V es la señal de tensión de salida del sensor ($V \leq 20\text{E}3$ μV) y S_B su respuesta ($S_R \approx 10$ $\mu\mathrm{V\cdot W^{-1}\cdot m^2}$). Recuérdese que el valor real de la respuesta del equipo se determina en su calibración.

Nótese que, de acuerdo a [Reda, 2011, Vignola et al., 2012, Myers, 2013], la incertidumbre debida a la respuesta coseno puede minimizarse si se contempla como función del ángulo cenital θ_{zs}. Así mismo, mediante una monitorización adecuada de la respuesta nocturna de los sensores, es posible minimizar los zero offsets termales. En conjunto, ambas mejoras en la modelización de la incertidumbre de la medida podrían permitir reducir la incertidumbre expandida aproximadamente a la mitad.

Incertidumbre del modelo de composición de las tres componentes

Para la validación del coeficiente de corrección total de las medidas tomadas mediante el dispositivo MK6, se utiliza el modelo de composición de las tres componentes de la irradiancia. En base a la medida de cada parte se calcula la incertidumbre total del modelo de referencia. La ecuación de medida es:

$$Y_{ref} = [D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p)]_{ref} = G(\theta_{zp}, \gamma_p) - B(n)\cos\theta_{sp}. \tag{4.17}$$

Los coeficientes de sensibilidad de la ecuación de medida expuesta son:

$$c_G = \frac{\partial Y_{ref}}{\partial G} = 1. \tag{4.18}$$

$$c_B = \frac{\partial Y_{ref}}{\partial B} = -\cos\theta_{sp}. \tag{4.19}$$

$$c_Y = \frac{\partial Y_{ref}}{\partial Y_{ref}} = 1. \tag{4.20}$$

De esta forma se define la incertidumbre expandida, para un intervalo de confianza del 95 % ($k_c = 2$), como:

$$U_{0.95} = k_c\sqrt{c_G^2 u_{std,G}^2 + c_B^2 u_{std,B}^2 + c_Y^2 u_{std,Y}^2}. \tag{4.21}$$

$$U_{0.95} = 2\sqrt{A + B\cos^2\theta_{sp}}, \tag{4.22}$$

siendo:

$$A = 6.61\text{E-}4G^2 + 1.9\text{E-}3\frac{V_G}{S_{G1}^2} + \frac{5.37}{S_{G1}^2} + 84.1\text{E-}3, \tag{4.23}$$

y

$$B = 6.21\text{E-}4B^2 + 1.9\text{E-}3\frac{V_B}{S_B^2} + \frac{5.37}{S_B^2} + 133.40. \tag{4.24}$$

Nótese que la incertidumbre expandida que se obtendría por este procedimiento, oscila en término medio entre el 15 y el 20 %, pero puede incluso llegar a dar valores superiores al 50 % de la magnitud medida de forma indirecta. Por este motivo, ciertos investigadores desestiman este procedimiento como un método válido para la evaluación de la irradiancia difusa y global sobre una superficie inclinada [Gueymard and Thevenard, 2009].

4.6. Organización y gestión de datos

Una vez las magnitudes deseadas han sido medidas a través de los sensores adecuados, y sus lecturas han quedado registradas en el sistema de adquisición de datos (datalogger), para poder extraer información de dichos datos de forma rápida y eficaz es necesario el diseño de un sistema de organización y gestión de los mismos.

Un *"sistema gestor de bases de datos"* (SGBD) consiste en una colección de datos interrelacionados y un conjunto de programas para acceder a dichos datos. La colección de datos es lo que se denomina usualmente como *"base de datos"*.

La tabla 4.8 es un informe de monitorización del estado del SGBD generado y resume su contenido a fecha de 15 de julio de 2015. Se indican la estructura de tablas, el origen de los datos almacenados y la identificación de las variables.

4.6.1. Modelos de datos y metadatos

En la gestión de datos climáticos y radiativos es preciso un modelo de metadatos, para almacenar este tipo de información, y un modelo de datos para almacenar los valores de las variables registradas. Un modelo de metadatos puede diseñarse en base a un determinado número de tablas interrelacionadas. Dicho número dependerá del grado de detalle deseado. Existen diversos modelos de datos, con sus correspondientes ventajas e inconvenientes. En este caso, se ha optado por el *"modelo por observaciones"*.

Los datos se representan en tablas que recogen, en cada fila, los valores de diferentes elementos observados en una estación en un instante dado. Por ejemplo, los datos diarios pueden almacenarse en una tabla de valores diarios. Cada fila correspondería a una estación determinada y a una hora determinada. En cada columna de una fila se almacenarían los valores de los diferentes elementos observados. Como ventajas destacables de este modelo destacan su elevado rendimiento con aplicaciones en tiempo real y la optimización del almacenamiento. Sin embargo, tiene la desventaja de que es necesario actualizar la estructura de la tabla completa para incorporar un nuevo elemento no incluido durante el diseño de la base de datos. Es el modelo normalmente utilizado en bases de datos climáticas y recomendado por la OMM [WMO, 2003b, WMO, 2003a, WMO, 2007].

4.6.2. Normalización y desnormalización

La estructura de una tabla de una base de datos está sujeta a una serie de reglas o restricciones, conocidas en su conjunto como *"normalización"*. La normalización permite:

Tabla 4.8: Informe de estado del SGBD (15 de julio de 2015).

Tabla	Origen de datos	Variables	Registros	Tamaño [MB]
AEMET-HR	AEMET	1	1 341 081	50.6
AEMET-PLU	AEMET	1	1 039 590	39.6
AEMET-PRES	AEMET	1	50 876	2.5
AEMET-RAD	AEMET	3	515 745	24.6
AEMET-TEMP	AEMET	1	1 340 664	50.6
AEMET-VIENTO	AEMET	2	1 122 745	47.6
AUX-ERRORES	ADM	2	3	≈ 0.0
AUX-VERANO	ADM	3	21	≈ 0.0
ESTACIONES	ADM	5	15	≈ 0.0
CAL-COD	ADM	2	10	≈ 0.0
CAL-ORDER	ADM	4	51	≈ 0.0
SWIFT-CLIMA	SWIFT	7	266 340	17.5
SWIFT-PV	SWIFT	12	74 592	6.5
SWIFT-RAD0	SWIFT	6	240 788	13.5
SWIFT-RADV	SWIFT	18	271 374	20.6
TOTAL	–	68	6 245 774	295.8

ID	Variable	Tabla	ID	Variable	Tabla	ID	Variable	Tabla
101	RGLO	AEMET-RAD	209	GEAST-W	SWIFT-RADV	226	VSOUTH-V	SWIFT-PV
102	RDIR	AEMET-RAD	210	GWEST-W	SWIFT-RADV	227	VEAST-V	SWIFT-PV
103	RDIF	AEMET-RAD	211	GNORTH-KJ	SWIFT-RADV	228	VWEST-V	SWIFT-PV
104	PRES	AEMET-PRES	212	GSOUTH-KJ	SWIFT-RADV	229	CNORTH-A	SWIFT-PV
105	TEMP	AEMET-TEMP	213	GEAST-KJ	SWIFT-RADV	230	CSOUTH-A	SWIFT-PV
106	HR	AEMET-HR	214	GWEST-KJ	SWIFT-RADV	231	CEAST-A	SWIFT-PV
107	DIRV	AEMET-VIENTO	215	DNORTH-W	SWIFT-RADV	232	CWEST-A	SWIFT-PV
108	VELV	AEMET-VIENTO	216	DSOUTH-W	SWIFT-RADV	233	PNORTH-W	SWIFT-PV
109	PLU	AEMET-PLU	217	DEAST-W	SWIFT-RADV	234	PSOUTH-W	SWIFT-PV
201	GLOBAL-W	SWIFT-RAD0	218	DWEST-W	SWIFT-RADV	235	PEAST-W	SWIFT-PV
202	DIFFUSE-W	SWIFT-RAD0	219	DNORTH-KJ	SWIFT-RADV	236	PWEST-W	SWIFT-PV
203	BEAM-W	SWIFT-RAD0	220	DSOUTH-KJ	SWIFT-RADV	237	TEMP-C	SWIFT-CLIMA
204	GLOBAL-KJ	SWIFT-RAD0	221	DEAST-KJ	SWIFT-RADV	238	TEMPL-C	SWIFT-CLIMA
205	DIFFUSE-KJ	SWIFT-RAD0	222	DWEST-KJ	SWIFT-RADV	239	PRES-MBAR	SWIFT-CLIMA
206	BEAM-KJ	SWIFT-RAD0	223	ALBEDO-W	SWIFT-RADV	240	PLU-MM	SWIFT-CLIMA
207	GNORTH-W	SWIFT-RADV	224	ALBEDO-KJ	SWIFT-RADV	241	WD-DEGN	SWIFT-CLIMA
208	GSOUTH-W	SWIFT-RADV	225	VNORTH-V	SWIFT-PV	242	WS-MS	SWIFT-CLIMA

- Limitar la redundancia de datos.
- Limitar la pérdida de datos.
- Limitar las incoherencias entre los datos.

Sin embargo, para mejorar el rendimiento es necesario practicar un proceso denominado como *"desnormalización"*. Ésta genera una mayor eficiencia y permite una mayor agilidad de consultas aunque pierde algunas ventajas de la normalización. En este caso se ha optado por mejorar el rendimiento de la base de datos mediante un *"particionamiento vertical"* de determinadas tablas, generando tablas más estrechas, con objeto de agilizar la consulta de aquellas variables o grupos de variables de mayor interés.

4.6.3. Metadatos de calidad

Es preciso establecer un modelo de metadatos que ofrezca información sobre la calidad de los datos adquiridos. Aunque sí se especifican normalmente los criterios de calidad utilizados en el uso de datos obtenidos experimentalmente, ciertamente no se ha encontrado en la literatura un criterio unificado sobre cómo debe almacenarse esta información. En este caso se ha optado por el siguiente sistema:

- A la base de datos se han añadido dos nuevas entidades (modelo Entidad-Relación) o tablas (modelo relacional): *"CAL-COD"* y *"CAL-ORDER"*. La primera de ellas es un glosario donde se indica el significado de una serie de códigos de calidad de las medidas tomadas. Dichos códigos y descripciones se muestran en la tabla 4.3. La segunda especifica el orden de cada variable medida en la entidad correspondiente.
- A cada registro guardado se ha añadido un nuevo tipo de dato denominado *"CAL"*. Dicho dato es una palabra compuesta por caracteres numéricos y que posee las siguientes características:
  - Tiene tantos caracteres como variables tiene el registro.
  - Cada carácter es un dígito entre 0 y 9 incluidos, que codifican el grado de calidad de los datos (véase la tabla 4.3).
  - Los caracteres están ordenados según el orden de las distintas variables en el registro u observación.
- Para determinar la calidad de un determinado dato, se debe consultar el valor que toma la variable *CAL* en el registro deseado, y tomando **CAL-COD** y **CAL-ORDER**, determinar la calidad correspondiente del dato según el código especificado por el dígito que ocupa la posición correspondiente a la variable deseada, dentro de la palabra *CAL*.

Así, por ejemplo, si $CAL = 6686$, y sabemos, tras una consulta a **CAL-ORDER** que nuestra variable ocupa la posición 2, tiene un código de calidad 6, cuya descripción en **CAL-COD** es que se trata de un dato que ha superado todos los test de coherencia y, por lo tanto, se puede utilizar en cualquier estudio.

El sistema propuesto se caracteriza por su sencillez y concisión, ya que con sólo un atributo adicional en cada entidad, es posible especificar la calidad de todos los atributos de la mencionada entidad.

4.6.4. Modelo Entidad-Relación

La figura 4.6 muestra el diagrama del modelo Entidad-Relación de la base de datos constituida. Consta de 15 entidades diferentes agrupadas en cuatro conjuntos:

Entidades globales: incluye aquellas entidades que pueden establecer relaciones con cualquiera de las demás entidades. Se incluyen aquí:

- **Estaciones:** identifica y caracteriza todas las estaciones de medida del sistema.
- **Aux-Errores:** identifica todos los códigos de error que pueden encontrarse en los registros incluidos en las entidades que recogen medidas. Estos códigos de error no son los códigos de calidad del dato, sino valores codificados de un posible error o alteración en el registro y que pueden ser generados bien automáticamente, bien por el gestor de la base de datos.
- **Aux-Verano:** es una entidad auxiliar que incluye las fechas de inicio y fin de los periodos con adelanto horario en España. Mediante su consulta permite realizar una de las etapas de preprocesamiento de datos consistente en normalizar la referencia horaria de los registros tomados a GMT+0.

Entidades AEMET: incluye todas las entidades que recogen datos proporcionados por la AEMET. Pertenecen a este grupo 6 entidades, resultado de un particionamiento vertical de la entidad original. Estas entidades se han definido en base a las variables medidas: irradiancia (**AEMET-Rad**), presión atmosférica (**AEMET-Pres**), temperatura ambiente (**AEMET-Temp**), humedad relativa (**AEMET-HR**), viento (**AEMET-Viento**) y precipitación (**AEMET-Plu**).

Entidades SWIFT: recoge todas las entidades que incluyen datos procedentes de las estaciones de la micro-red SWIFT. Son 4 entidades, también fruto de un proceso de desnormalización por particionamiento vertical de la entidad original que seguía un modelo de datos por registros, que incluía todos los atributos:

- **SWIFT-Rad0:** incluye todas las medidas, tomadas cada diez minutos, de irradiancia sobre el plano horizontal: irradiancia e irradiación solar global, difusa y directa.
- **SWIFT-RadV:** incluye todos los registros diez-minutales de irradiancia sobre planos inclinados: irradiancia e irradiación global y difusa sobre los planos verticales Norte, Sur, Este y Oeste.
- **SWIFT-PV:** incluye todos los registros diez-minutales de la potencia, tensión y corriente de los módulos fotovoltaicos situados en los planos verticales orientados según las direcciones Norte, Sur, Este y Oeste.
- **SWIFT-Clima:** incluye todas las medidas diez-minutales de temperatura ambiente en bulbo seco, temperatura del datalogger, presión barométrica, humedad relativa, agua precipitada por lluvia y velocidad y dirección del viento.

Entidades CALIDAD: recoge las entidades que permiten determinar la calidad de los atributos almacenados en el resto de entidades (metadatos). Se compone de dos entidades:

- **CAL-COD:** es un glosario de los códigos de calidad (0-9) que pueden poseer los valores almacenados.
- **CAL-ORDER:** incluye el orden asignado a los valores medidos o atributos en cada entidad.

A las entidades basadas en el modelo de datos por valores, como es el caso de las entidades Estaciones, Aux-Errores, Aux-Verano, Cal-Cod y Cal-Order, poseen una única clave primaria cada una, siendo ésta el **ID-EST** (identificador de la estación), **ID-ERROR** (identificador o código del error), **YEAR** (año), **CODIGO** (código del nivel de calidad) e **ID-VAR** (identificador de la variable) respectivamente.

En nuestro caso, para las entidades basadas en el modelo de datos por registros u observaciones, son entidades débiles, cuya entidad identificadora es Estaciones. La relación Estación-Registro es la relación identificadora. Por otro lado, el discriminante o *"clave parcial"* es la fecha completa y hora en la que tiene lugar el registro. Así la clave primaria de los conjuntos de entidades débiles basadas en el modelo de datos por observaciones se forma con:

ID-EST: es el identificador de la estación de medida (clave primaria del conjunto de entidades identificadoras). A cada una de las estaciones disponibles, tanto de la AEMET como de la micro-red SWIFT, se le ha asignado un identificador numérico de 4 cifras y que es único para cada una de ellas.

FECHA: es la fecha, en formato *"yyyy-mm-dd HH:MM:SS"* (*"año-mes-día hora:min:seg"*), con referencia GMT+0, correspondiente a cada registro (discriminante).

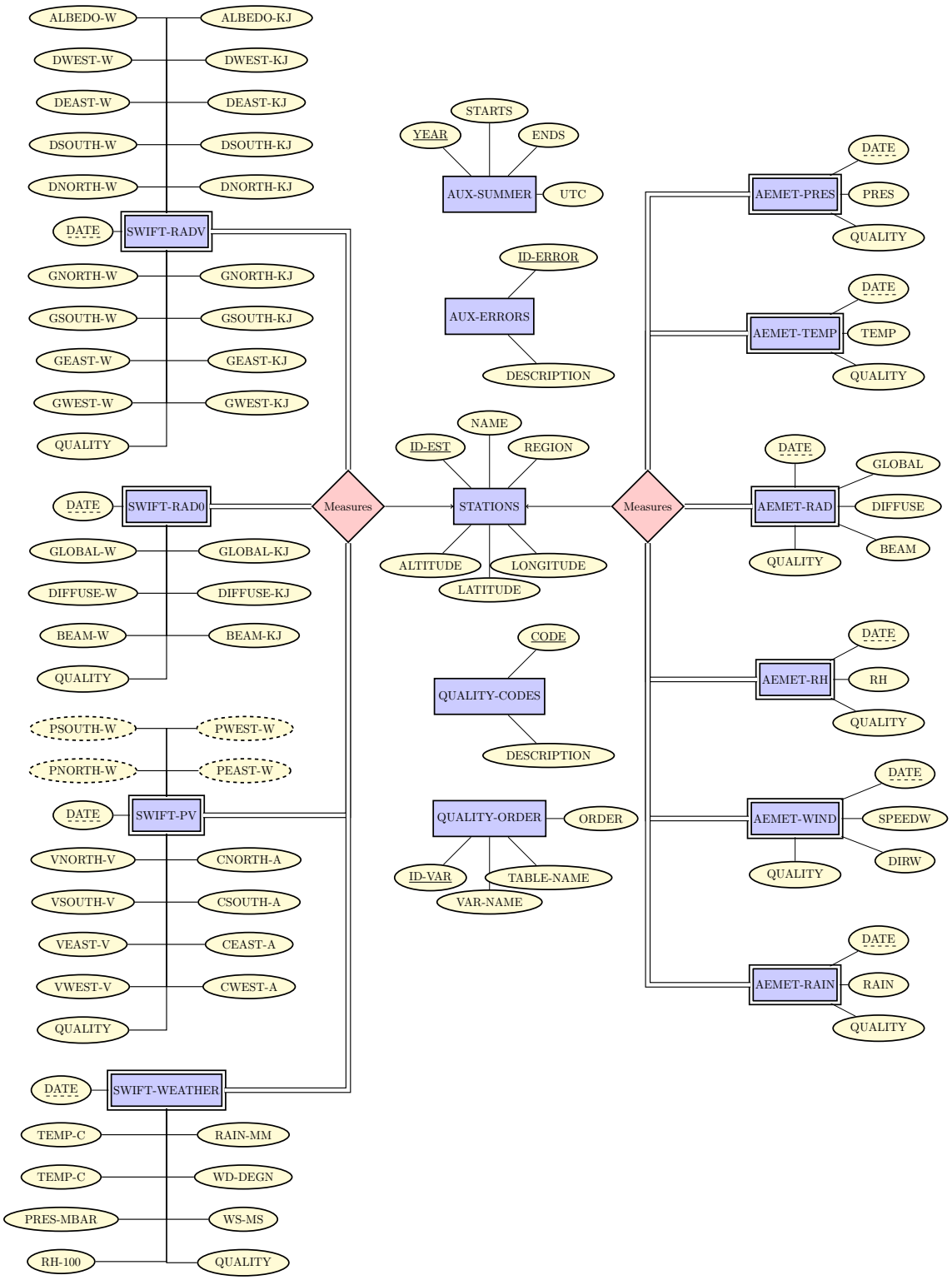


Figura 4.6: Diagrama Entidad-Relación de la base de datos generada.

En el diagrama E-R de la figura 4.6, se ha empleado la notación normalizada, según las directrices dadas en [Silberschatz et al., 2002], y dado que todas las relaciones del modelo de la base de datos son iguales para las diez entidades débiles, se han representado éstas de forma agrupada para mayor claridad del diagrama.

Nótese que la denominación adoptada para los atributos (magnitudes medidas) en las estaciones SWIFT se ha realizado de forma que no sólo identifica la variable medida, sino que también indica la unidad de medida (aunque por simplicidad se ha indicado W en vez de $W \cdot m^{-2}$ para irradiancia y kJ en vez de $kJ \cdot m^{-2}$ para irradiación).

4.6.5. Modelo Relacional

La figura 4.7 muestra el diagrama de esquema de la base de datos creada. Se puede apreciar, que se compone de 13 cuadros o relaciones, que se corresponden con cada una de las entidades definidas en el modelo E-R, y sus atributos listados dentro de él. Cada una de las cabeceras de sus columnas corresponde con los atributos, y se encuentran identificadas con el símbolo **PK** las claves primarias (que al igual que en el modelo E-R, están generadas como la composición de la clave primaria de la entidad identificadora o propietaria, la tabla **ESTACIONES**, y el discriminante, que es el atributo **FECHA**). Las dependencias de clave externa aparecen como flechas desde los atributos clave externa de la relación referenciante a la clave primaria de la relación referenciada.

4.6.6. Preprocesado de datos

Un sistema de gestión de datos como el diseñado en este caso debe disponer de todos los datos posibles, pues puede estar enfocado a múltiples usos presentes y futuros. No obstante, ha sido necesario aplicar una serie de operaciones de preprocesamiento de los datos en bruto, obtenidos directamente del sistema de adquisición de datos. Dichas operaciones son:

Verificación/transformación del sistema de referencia horario: no es conveniente mantener los registros en el formato horario local, pues puede inducir a error en numerosas ocasiones. No existe un criterio unificado en este caso, pero se ha adoptado la decisión de almacenar todos los registros con referencia horaria GMT+0, es decir, según el Meridiano de Greenwich. Nótese que muchas bases de datos radiativas toman como referencia la hora solar verdadera (TSV), pero en este caso no se ha adoptado este criterio dado que el sistema almacena registros de otras variables climáticas. La tabla auxiliar AUX_VERANO incorpora las fechas de adelanto horario adoptadas en España para el periodo estival. Mediante la información extraída

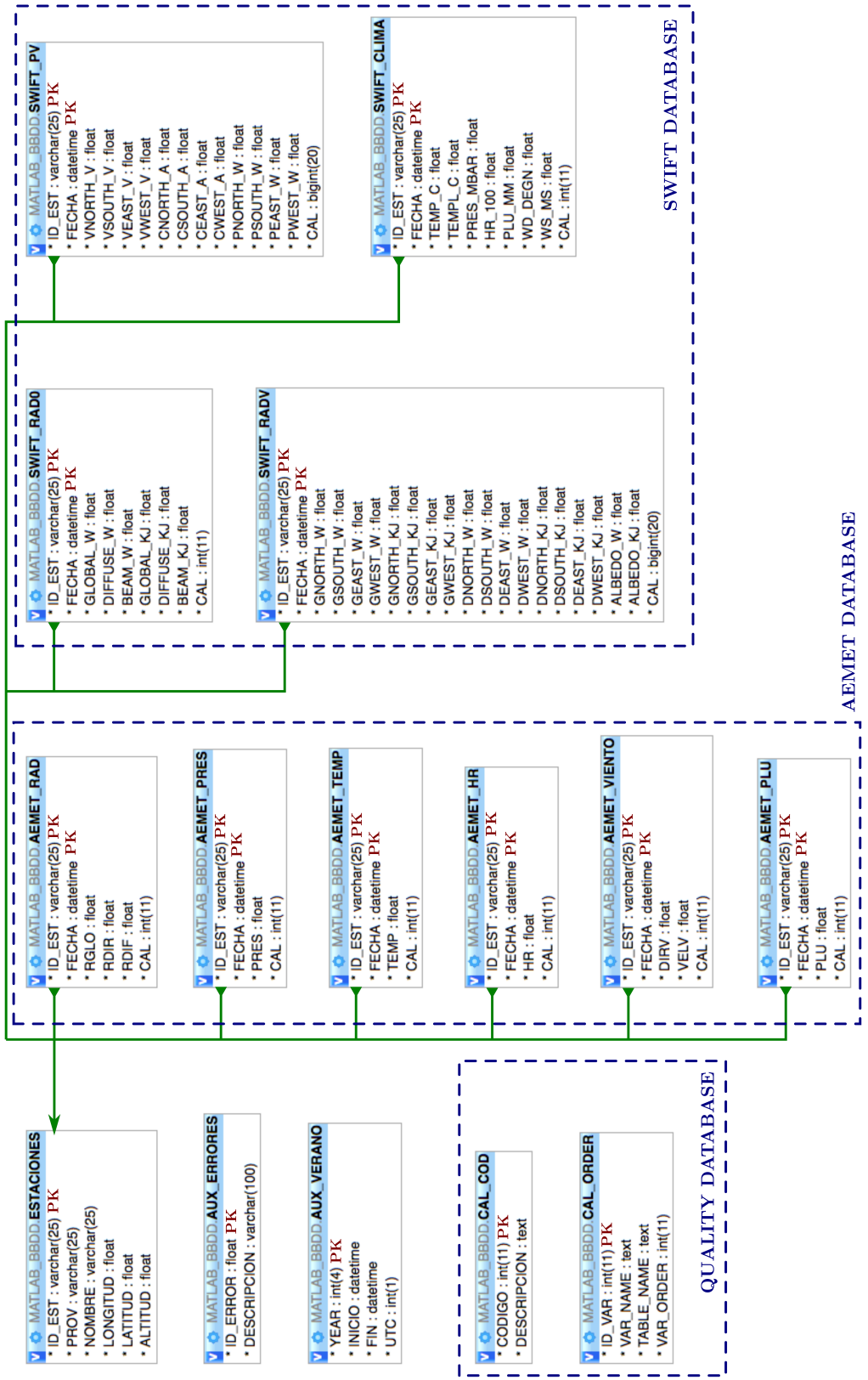


Figura 4.7: Diagrama de esquema de la base de datos generada.

en esta tabla, es posible corregir el adelanto horario incorporado en los registros de las estaciones locales.

En las estaciones de la micro-red SWIFT, el sistema de adquisición de datos ya está preparado para tomar directamente como referencia de registro horario GMT+0, sin realizar corrección por adelanto horario en el proceso de sincronización de reloj.

Códificación de ausencia de registro: en ocasiones, debido a un fallo fortuito del sensor, desconexión o tareas de mantenimiento o calibración, el sistema de adquisición puede registrar un error en el almacenamiento de un determinado valor. Dicho error, se manifiesta en el fichero que este sistema genera como *"NaN"* o *"Not a Number"*. La inclusión de caracteres alfanuméricos en la celda de registro, al incorporarlo a la base de datos, que tiene predefinido el tipo de dato que debe ser (por ejemplo, tipo *"float"*) genera un error en la importación. Por ello, antes de realizar la tarea de importación, se sustituyen todos los registros NaN por su código de error: -999.

Transformación de unidades de medida: es necesario adoptar un criterio en cuanto al sistema de unidades adoptado para cada tipo de dato. Determinadas bases de datos, con el fin de optimizar el almacenamiento, utilizan múltiplos y submúltiplos de las unidades de referencia, dependiendo del grado de precisión de la medida tomada (por ejemplo, almacenan la temperatura en décimas de grado Celsius). En el sistema propuesto se ha adoptado como norma general, el Sistema Internacional de Unidades. Es necesario, por tanto, transformar aquellos registros que no se encuentren en el mismo sistema de unidades, al sistema adoptado para mantener la homogeneidad y coherencia en la base de datos.

4.7. Datos empleados en los estudios realizados

Para la realización de los distintos estudios realizados en esta Tesis, se ha empleado una selección de las medidas realizadas. Únicamente se han empleado los datos de la estación SWIFT0001 que dispone de la equipación necesaria para la medida de la irradiancia difusa sobre superficies verticales. De las más de 18 000 observaciones realizadas entre el **01 de septiembre de 2014** y el **31 de abril de 2015**, periodo que lleva en funcionamiento el dispositivo MK6, tras la aplicación de los correspondientes criterios de calidad, se han seleccionado **6 408 datos diez-minutales**. Nótese que los datos incluyen, para un mismo instante, valores de irradiancia directa y global y difusa sobre el plano horizontal y cuatro planos verticales según las direcciones Norte, Sur, Este y Oeste. Cada registro es completo, de forma que si alguna de las variables no ha superado alguno de los criterios de calidad, el registro completo ha sido descartado.

Capítulo 5

Medida y modelización del albedo

5.1. Introducción

Para la evaluación de la irradiancia reflejada sobre una superfice es preciso la realización previa de un estudio del albedo. En este capítulo se mide y modeliza el valor de la reflectancia del terreno circundante a la estación radiométrica SWIFT0001 ubicada en Burgos (42.351°N, −3.688°E). Aunque en la bibliografía se pueden encontrar valores universales para la evaluación de la reflectancia, se han realizado más de 600 medidas de la irradiancia de albedo en días despejados, durante el mes de abril, mediante albedómetro (véase la figura 5.1), y posteriormente se ha modelización de acuerdo a las expresiones propuestas en la sección 1.9.

5.2. Modelo de Iqbal (isótropo constante)

La figura 5.2 muestra el ajuste por regresión lineal realizado entre los valores de irradiancia de albedo medida y los valores de irradiancia global horizontal. La pendiente de dicha recta corresponde con el valor de la reflectancia aparente del terreno:

$$\rho = 0.1519 \pm 0.0046. \tag{5.1}$$

La incertidumbre de la medida se ha determinado como la correspondiente a la pendiente

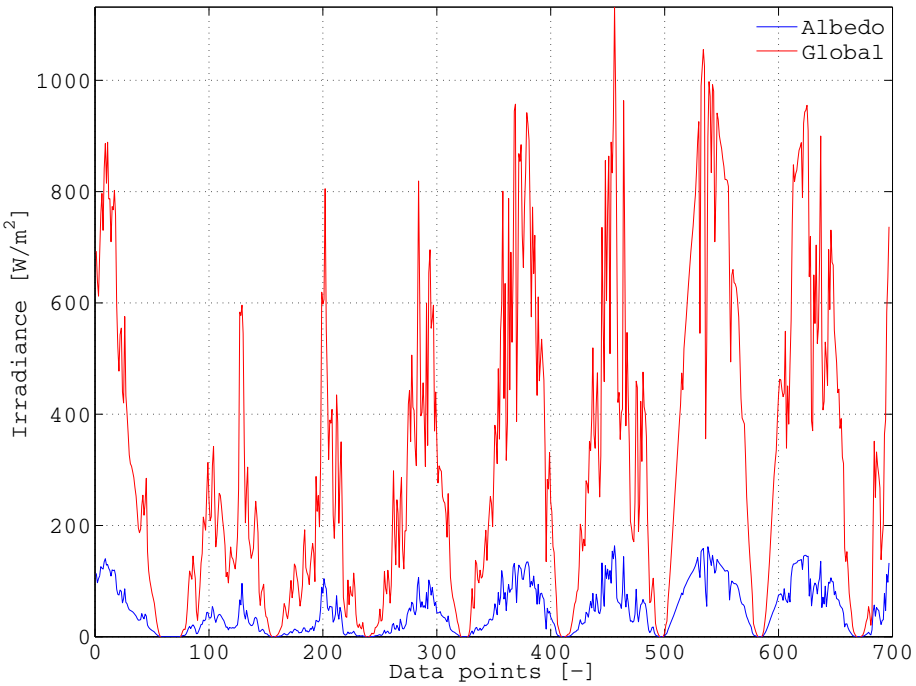


Figura 5.1: Serie temporal de medidas de irradiancia de albedo.

de la recta de regresión, calculada como:

$$u_\rho = s_y \sqrt{\frac{n}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}}, \tag{5.2}$$

siendo s_y la desviación estándar de la variable dependiente, en este caso la irradiancia de albedo, y definida por:

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)}{n-2}}, \tag{5.3}$$

donde n es el número de puntos tomados e $\hat{y}_i$ el valor estimado de la variable dependiente por la recta de regresión.

El valor obtenido es muy similar al universalmente propuesto de $\rho = 0.2$ para todo tipo de superficies, y generalmente adoptado para materiales como cemento o asfalto.

Como se aprecia en la figura 5.3, el coeficiente de determinación entre el valor estimado por el modelo y el valor observado es muy elevado y el valor de RMSD es inferior a 4.6 W·m^{-2}. El estudio de los residuos mostrado en la figura 5.4 indica que se verifican las condiciones de normalidad, homocedasticidad e independencia de los datos del ajuste.

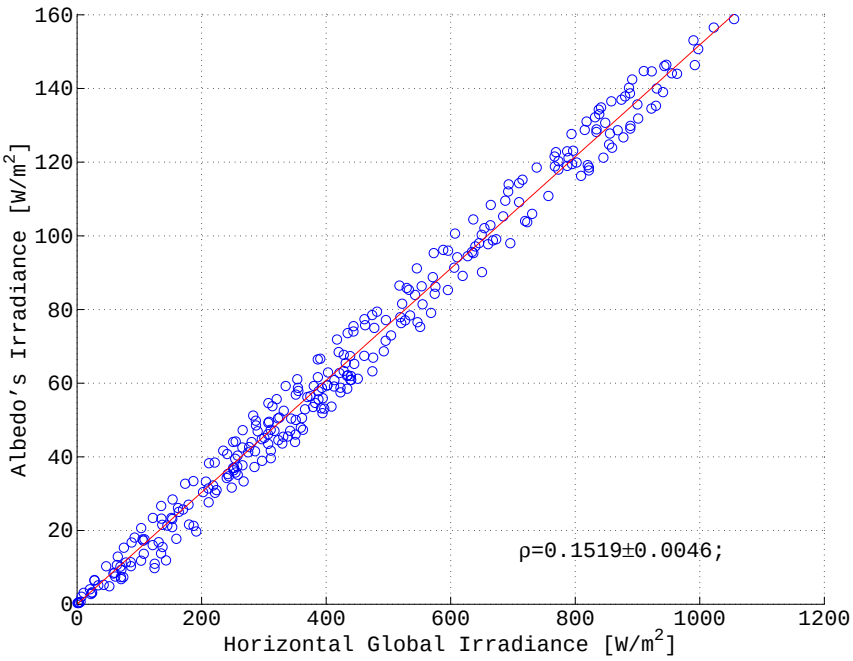


Figura 5.2: Cálculo de la reflectancia mediante el modelo de Iqbal.

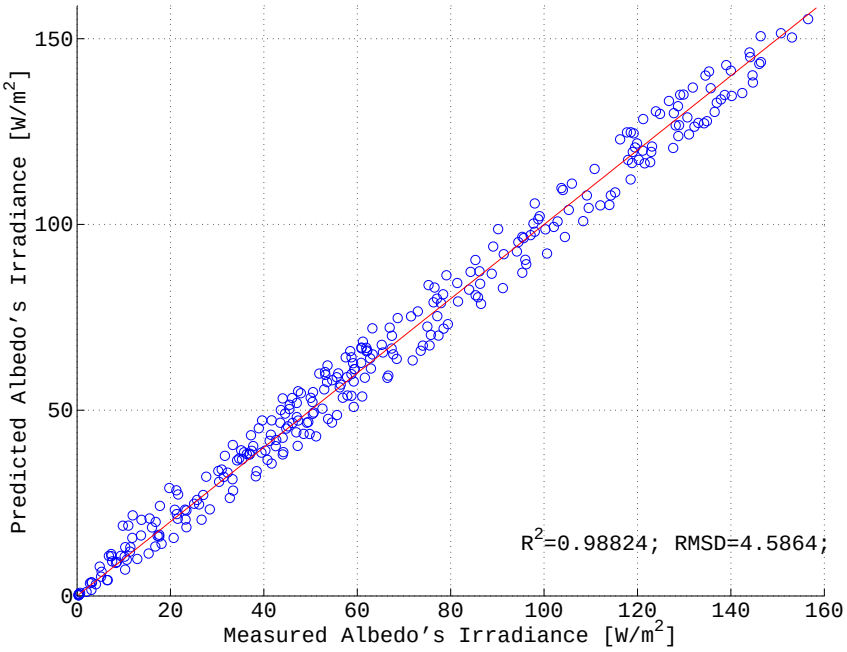


Figura 5.3: Correlación de las medidas con el modelo de Iqbal.

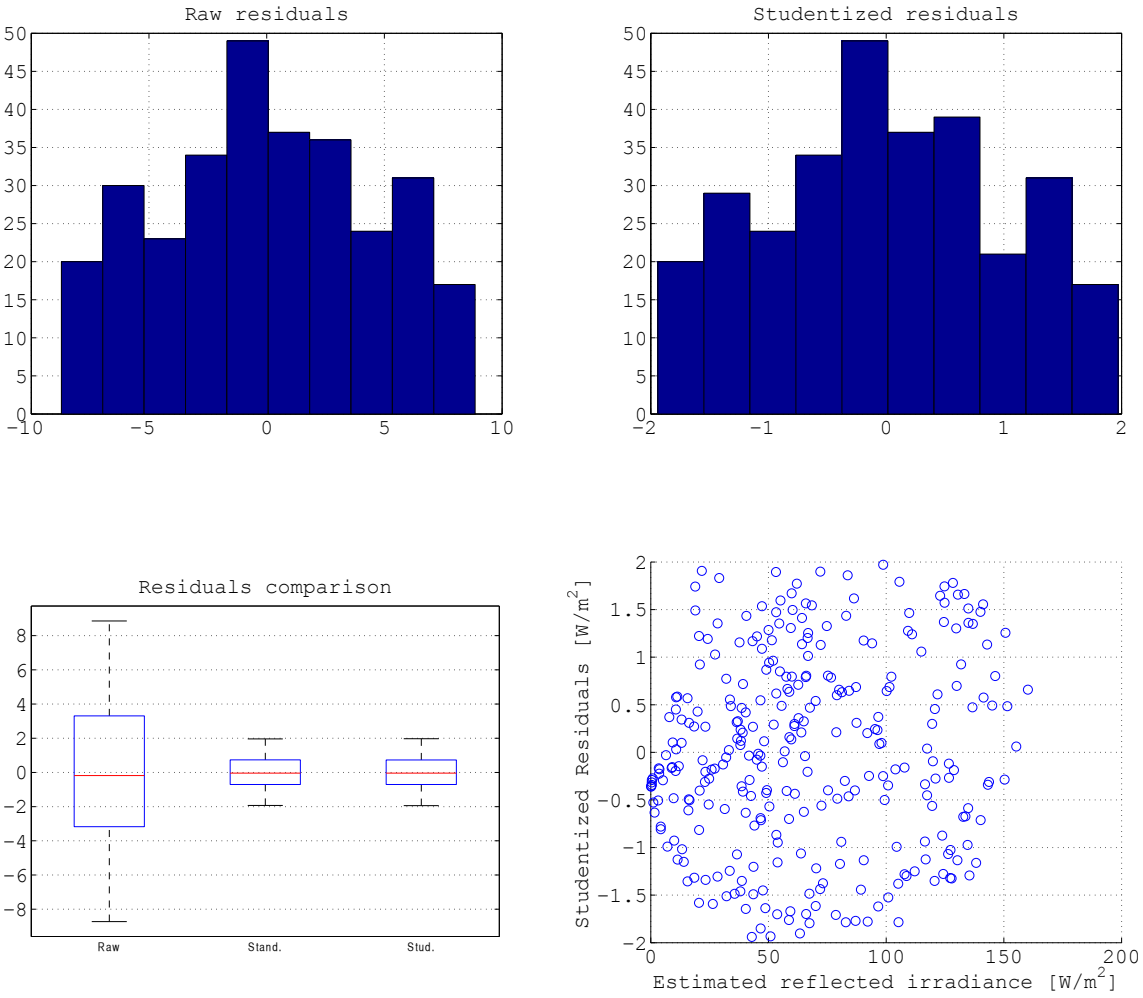


Figura 5.4: Análisis de los residuos del modelo de Iqbal.

5.3. Modelo de Gueymard (isótropo estacional)

La figura 5.6 muestra la aplicación sobre los datos tomados del modelo isótropo con variación estacional. El modelo ha sido calculado para la latitud de 42.2122°N y con los coeficientes propuestos en [Gueymard, 1993]. Dadas las características de las medidas tomadas sólo se ha podido evaluar un mes (abril) y se ha comprobado que para este caso, se presentaba un mejor ajuste con el valor de reflectancia calculado para el mes siguiente. Véase la figura 5.5 para evaluar la variación de la reflectancia estimada con este modelo para cada mes del año y diferentes latitudes geográficas. Nótese que con los coeficientes proporcionados por este autor, la reflectancia podría alcanzar valores negativos para el mes de junio.

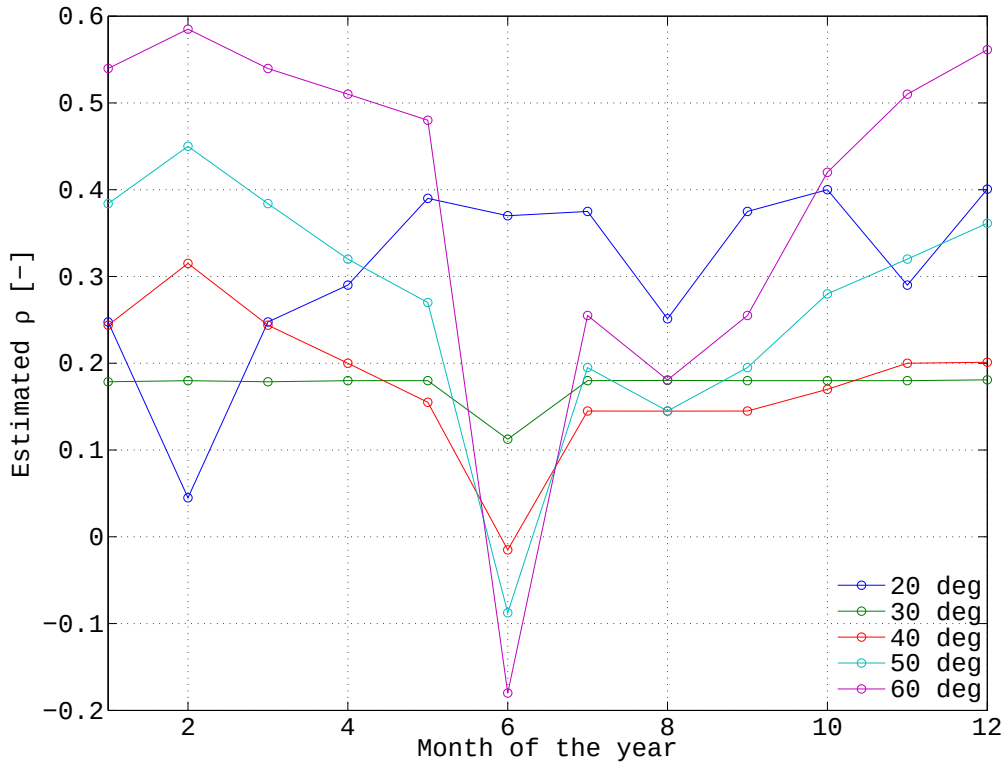


Figura 5.5: Valores de reflectancia estacional para varias latitudes geográficas empleando los coeficientes propuestos en [Gueymard, 1993].

Como se puede observar en la figura 5.7, el coeficiente de determinación de este modelo es análogo al isótropo constante, puesto que la estructura del modelo es idéntica y representa la misma relación con la irradiancia global horizontal, pero el valor de RMSD es mayor. La figura 5.8 indica que también se verifican las condiciones adecuadas para el estudio.

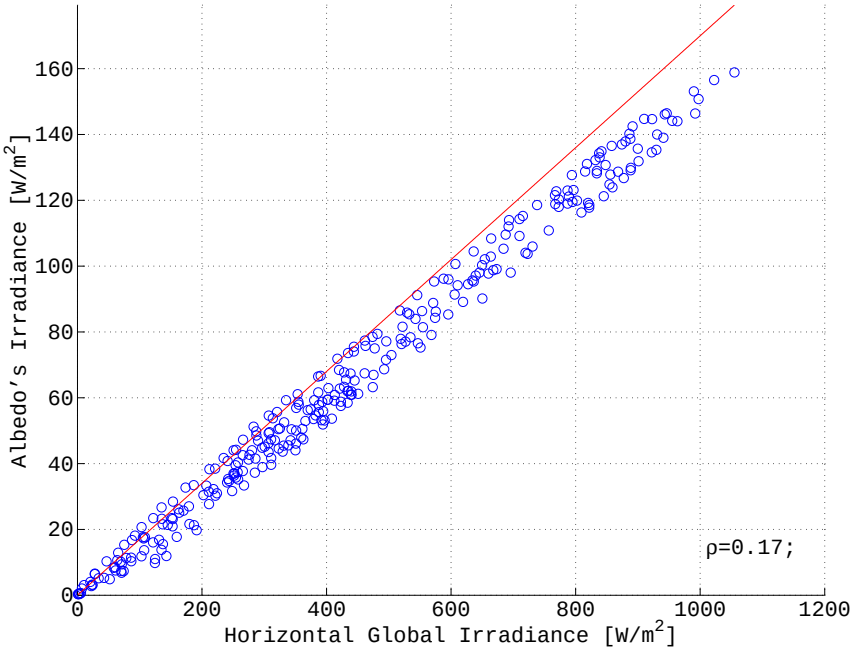


Figura 5.6: Cálculo de la reflectancia mediante el modelo isótropo estacional.

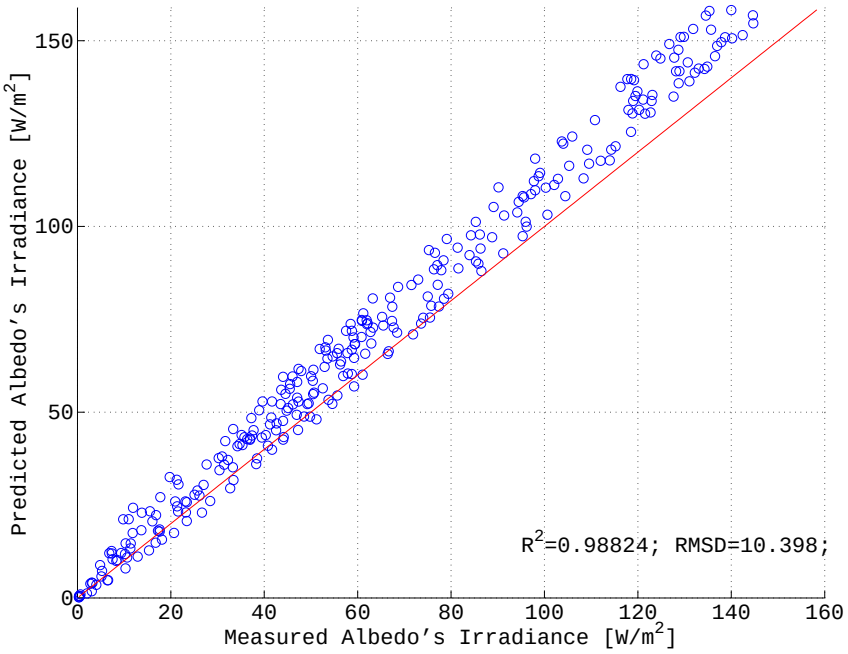


Figura 5.7: Correlación de las medidas con el modelo de Gueymard (isótropo estacional).

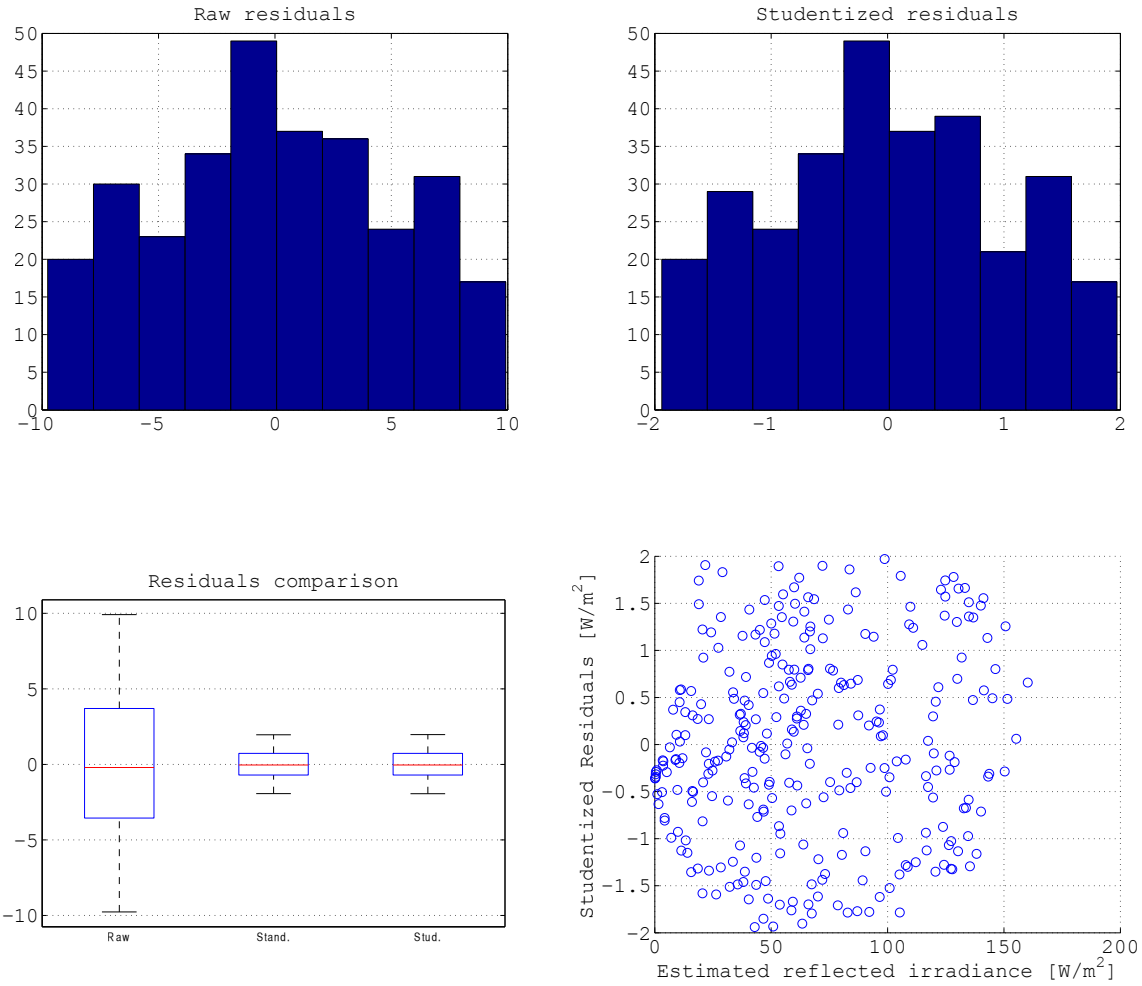


Figura 5.8: Análisis de los residuos del modelo de Gueymard (isótropo estacional).

5.4. Modelo de Kambezidis (anisótropo)

Para la implementación del modelo anisótropo, tal y como propone el autor, se ha separado el estudio entre los valores matutinos ($\gamma_s < 0$) y vespertinos ($\gamma_s > 0$). Así, la figura 5.9 muestra la realización de tres ajustes, cada uno correspondiente a cada serie de datos y el ajuste global, obteniéndose por regresión lineal las siguientes expresiones:

$$\rho = 0.12769 \exp(0.22476\theta_{zs}), \forall\gamma_s \leq 0. \tag{5.4}$$

$$\rho = 0.15863 \exp(-0.091034\theta_{zs}), \forall\gamma_s > 0. \tag{5.5}$$

$$\rho = 0.14449 \exp(0.041687\theta_{zs}), \forall\gamma_s. \tag{5.6}$$

El ángulo cenital θ_{zs} está dado en [rad] y las incertidumbres de los coeficientes calculados se han obviado en este caso por ser menores de 1E-6.

Nótese que el valor que multiplica la función exponencial es muy próximo al valor de reflectancia aparente calculado en el modelo isótropo constante, mientras que la constante multiplicativa del valor del ángulo cenital varía en gran medida en los tres ajustes. Obsérvese también que los valores de ambos coeficientes distan en gran medida de los propuestos por [Kambezidis et al., 1994]. En cualquier caso, se muestra que este modelo es más explicativo que los anteriores al poseer un coeficiente de determinación mayor, muy próximo a la unidad. La figura 5.12 muestra claramente la dependencia del logaritmo de la reflectancia aparente con el ángulo cenital, que es aproximadamente lineal salvo para valores próximos a $\pi/2$ del ángulo cenital. El análisis pormenorizado en dos series también contribuye a una notable disminución del valor de RMSD (véase la figura 5.10).

El estudio de los residuos, figura 5.11, indica que se verifican las condiciones para la realización del análisis efectuado.

5.5. Modelo de Gueymard (anisótropo semifísico)

Finalmente, la figura 5.14 muestra la implementación del modelo semifísico propuesto por Gueymard. Aunque el modelo propone un valor de reflectancia aparente diferente en función de la orientación de la superficie y de las características de la irradiancia directa, la figura 5.13 muestra que la variación es prácticamente despreciable entre orientaciones y que la reflectancia calculada puede ser ajustada a un valor constante:

$$\rho = 0.1479 \pm 0.036, \tag{5.7}$$

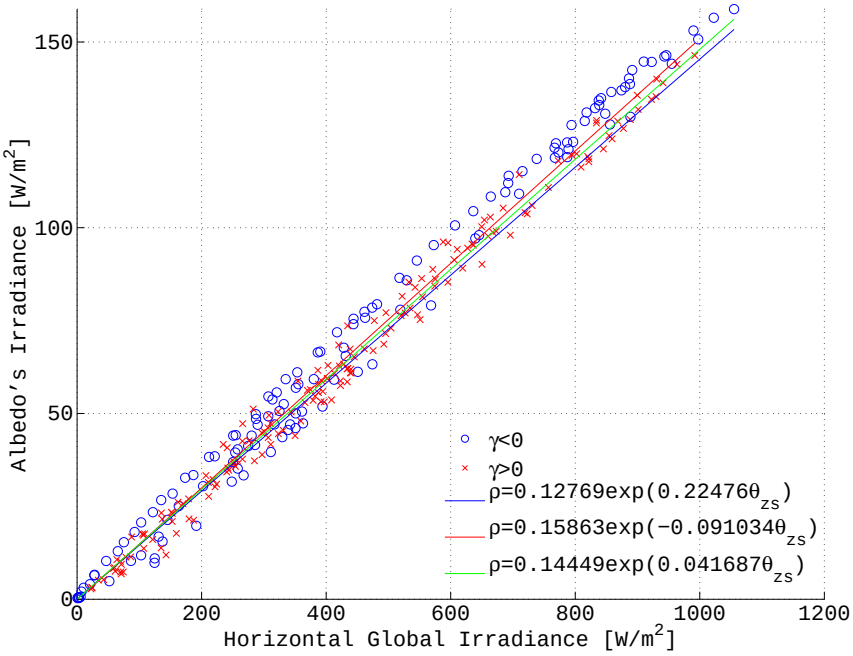


Figura 5.9: Cálculo de la reflectancia mediante el modelo de Kambezidis.

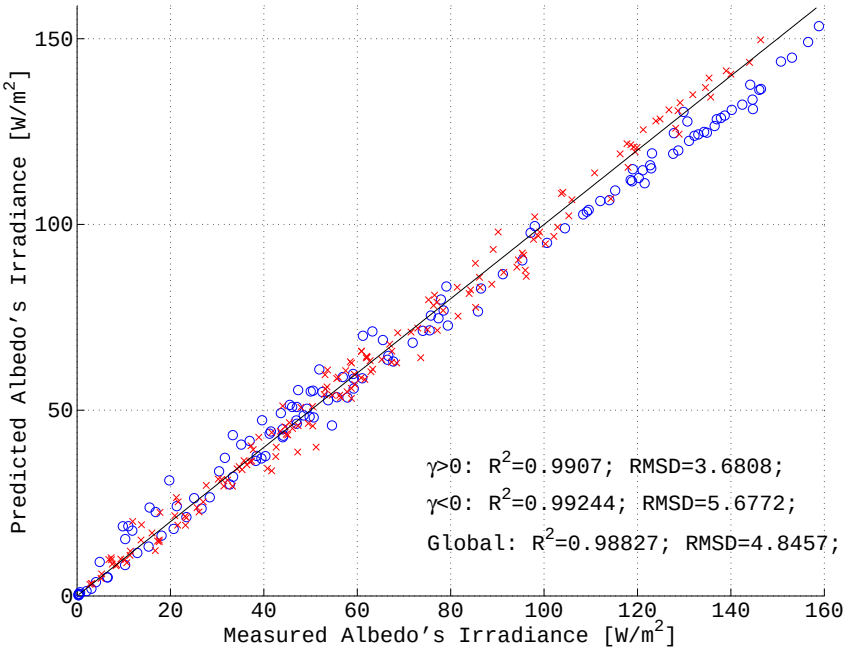


Figura 5.10: Correlación de las medidas con el modelo de Kambezidis.

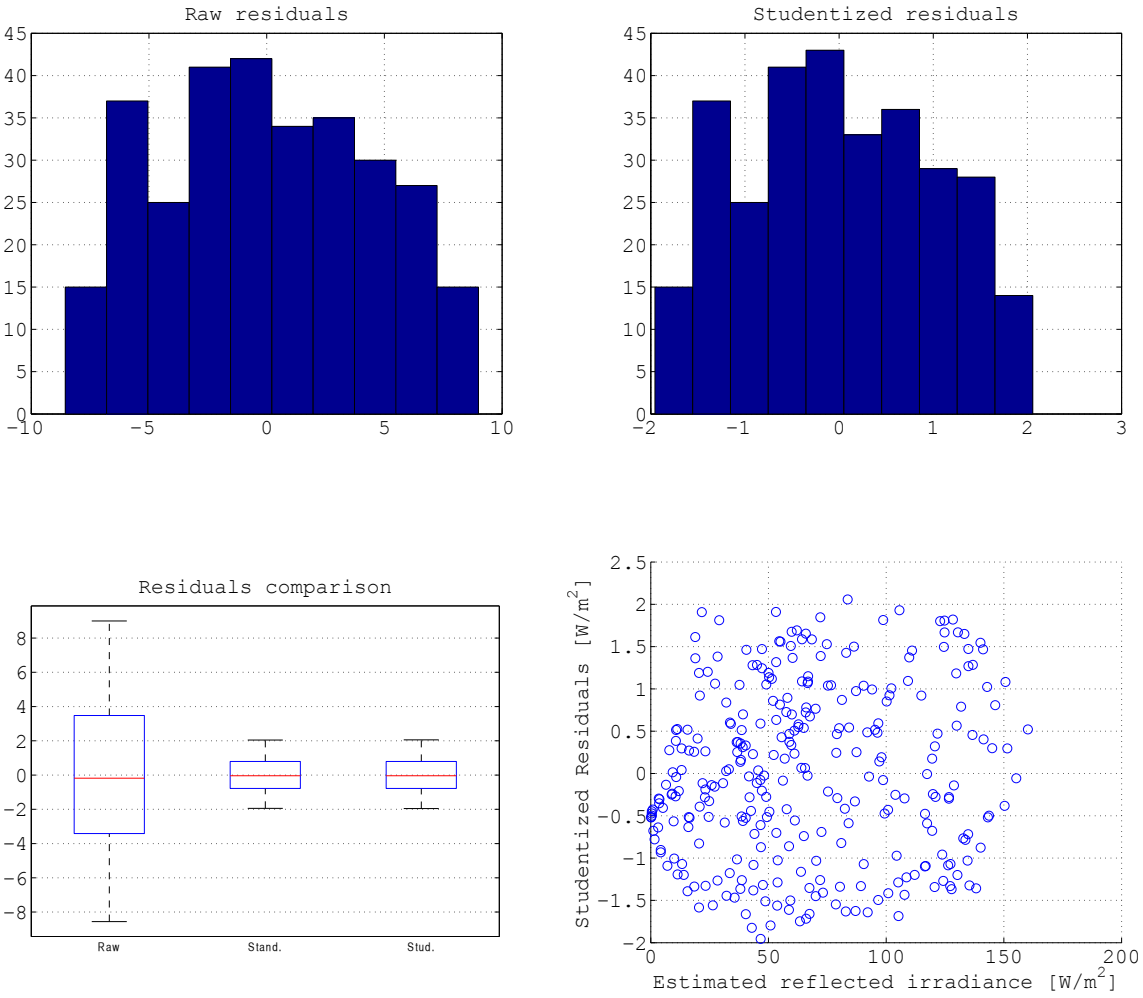


Figura 5.11: Análisis de los residuos del modelo de Kambezidis.

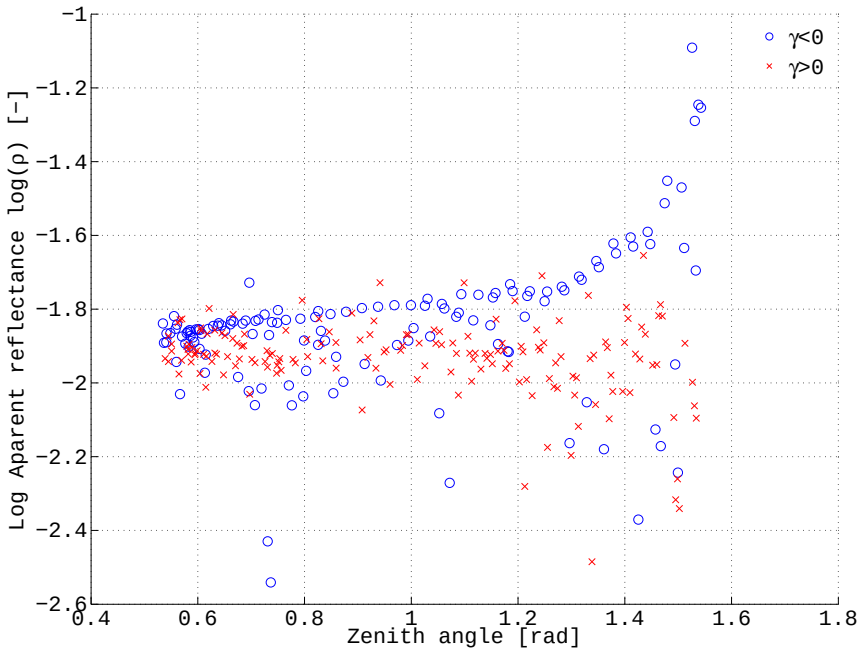


Figura 5.12: Dependencia de la reflectancia aparente con el ángulo cenital.

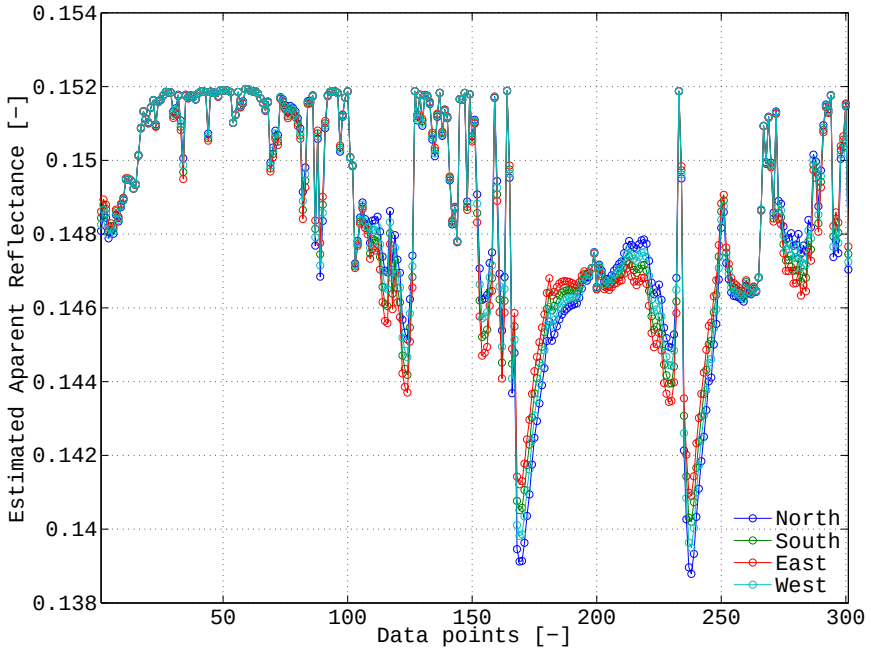


Figura 5.13: Serie temporal de la reflectancia según el modelo de Gueymard (semifísico).

muy similar al obtenido en el modelo isótropo constante.

La figura 5.15 indica un menor valor del coeficiente de determinación R^2 que otros modelos, pero el valor de RMSD es menor que el del modelo isótropo estacional. El estudio de los residuos, mostrado en la figura 5.16, verifica la bondad del ajuste del modelo.

5.6. Conclusiones y elección del modelo óptimo

Se han evaluado cuatro modelos para el cálculo de la reflectancia aparente del terreno, componente fundamental para cuantificar la irradiancia reflejada o de albedo incidente sobre una superficie inclinada. La tabla 5.1 expone los resultados obtenidos por los diferentes modelos en base a cinco parámetros de evaluación, cuya descripción detallada puede encontrarse en el apartado 9.2.1, fruto de un proceso de análisis por validación cruzada con $k = 10$. Al lado del valor obtenido por cada modelo para cada índice evaluado, y entre paréntesis, se muestra la ordenación relativa de los modelos en base a dicho resultado.

En primer lugar, se observa que todos los modelos ofrecen un coeficiente de determinación R^2 muy próximo a la unidad, por lo que la correlación entre los estimadores y la variable estimada es muy fuerte y hace indicar que la estructura del modelo se presenta adecuada.

Por otro lado, las diferencias medias de sesgo (MBD) y las raíces de las diferencias cuadráticas medias (RMSD) son de escasa magnitud y muy similares entre todos los modelos, salvo el modelo isótropo con variación estacional. El fuerte error de ajuste de la reflectancia dada por este modelo, calculada según los coeficientes propuestos en la bibliografía, aumenta la magnitud de las diferencias entre los valores estimados y los valores observados de irradiancia reflejada. Obsérvese además que los modelos isótropos tienden a subestimar, mientras que los modelos anisótropos tienden a sobrestimar.

Respecto al análisis del parámetro t-estadístico, destaca que, para un nivel de significación $\alpha = 0.01$, únicamente es estadísticamente significativo el resultado obtenido para el modelo isótropo constante.

Finalmente, el estadístico $\mu_{0.99}$ confirma los resultados obtenidos por los otros indicadores, lo que conduce a la conclusión inequívoca de que el mejor modelo de reflectancia en este caso es el modelo isótropo constante.

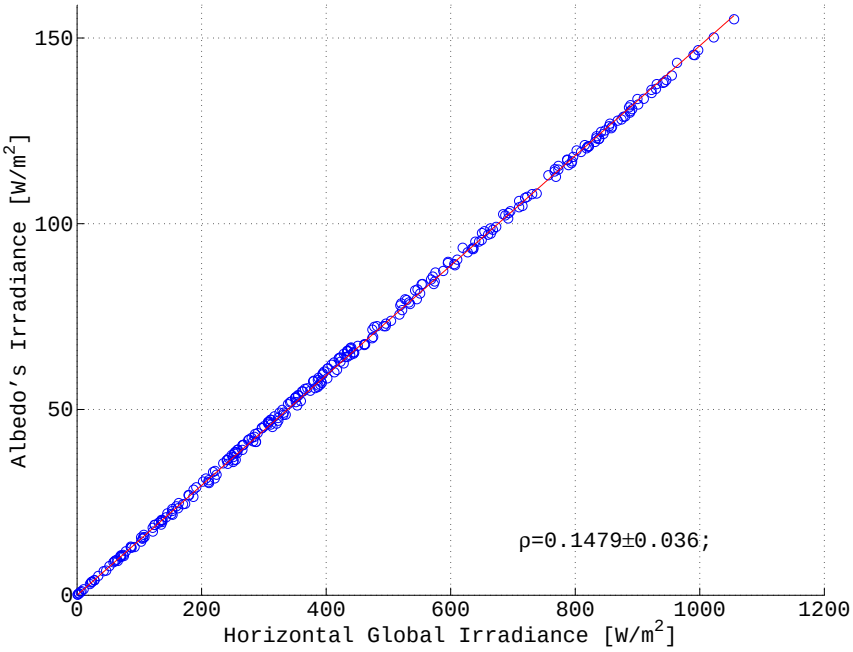


Figura 5.14: Cálculo de la reflectancia mediante el modelo de Gueymard (semifísico).

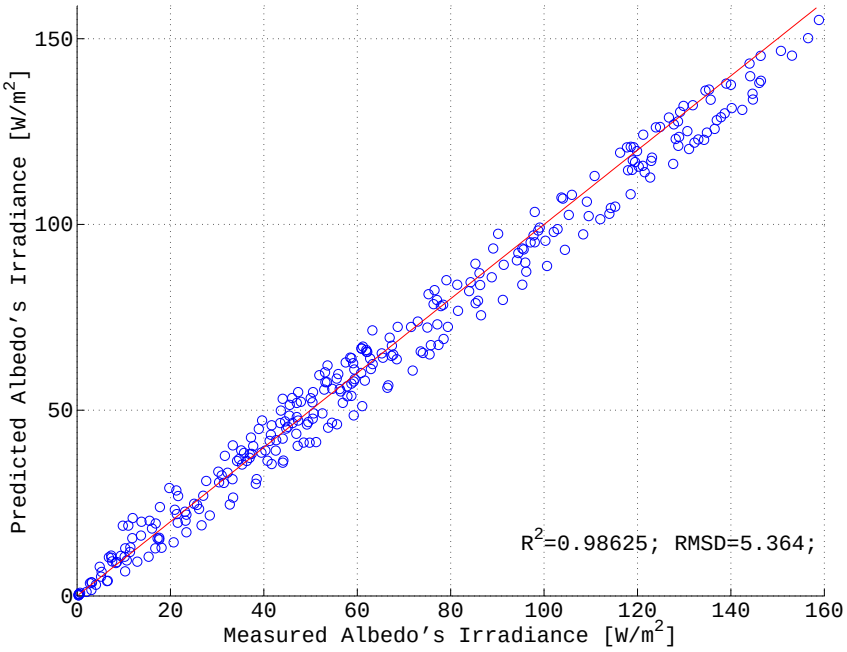


Figura 5.15: Correlación de las medidas con el modelo de Gueymard (semifísico).

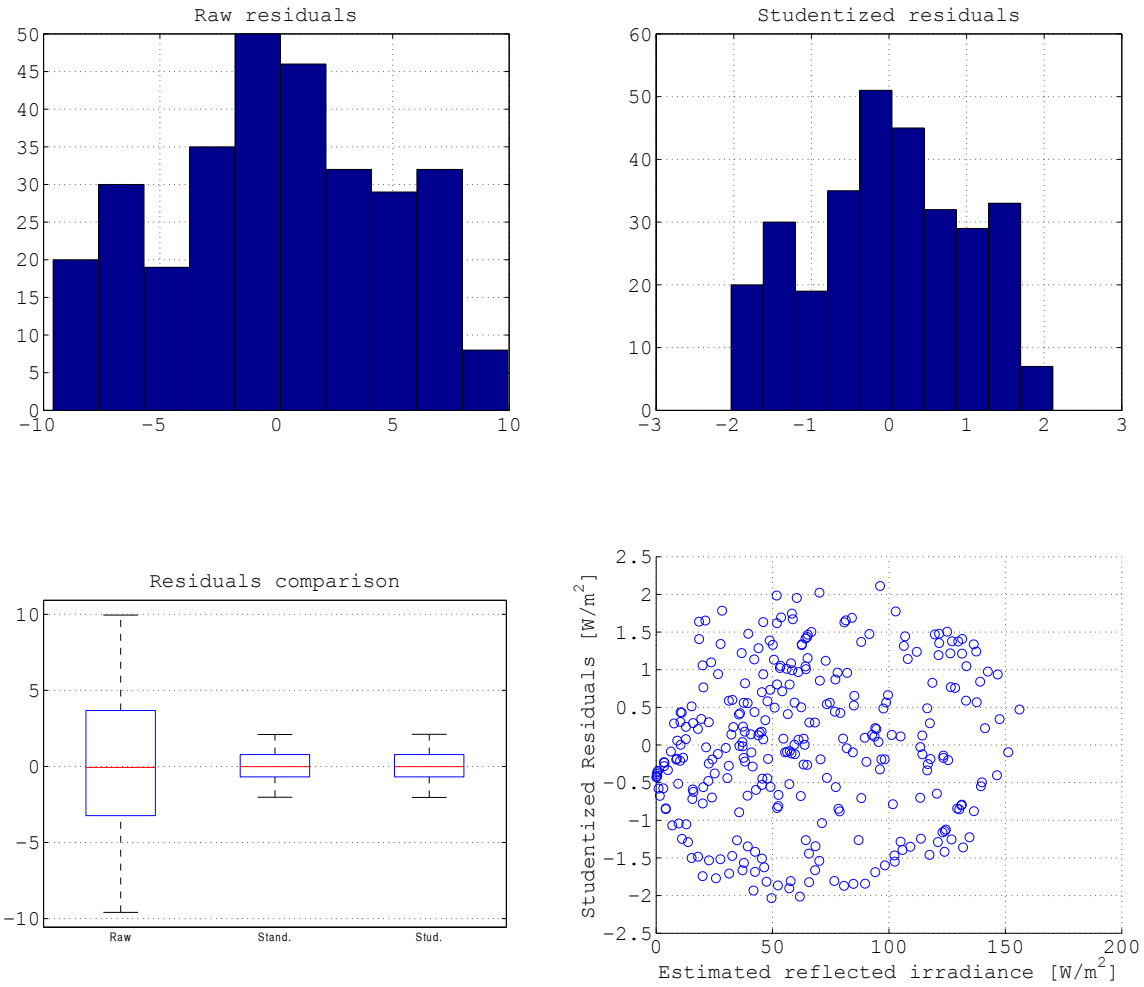


Figura 5.16: Análisis de los residuos del modelo de Gueymard (semifísico).

Tabla 5.1: Resultados modelos de reflectancia.

ID	Modelo	MBD [W·m^{-2}]	RMSD [W·m^{-2}]	R^2 [-]	t-stat [-]	$\mu_{0.99}$ [W·m^{-2}]
R01	Iqbal	−0.1955 (1)	4.5864 (1)	0.988 (1)	0.7389 (1)	−0.8142 (1)
R02	Gueymard	−8.1002 (4)	10.3980 (4)	0.988 (2)	21.5198 (4)	−8.9811 (4)
R03	Kambezidis	0.8261 (2)	4.8457 (2)	0.988 (3)	2.9967 (2)	1.4708 (2)
R04	Semifísico	1.4166 (3)	5.3640 (3)	0.986 (4)	4.7426 (3)	2.1152 (3)

Capítulo 6

Prototipo MK6 para la medida de irradiancia multidireccional

6.1. Introducción

En este capítulo se presenta un prototipo de equipo de medida de irradiancia difusa, denominado de forma abreviada *"MK"*[1], que permite la medida simultánea de irradiancia difusa en las cuatro direcciones cardinales y en planos que forman ángulos de inclinación entre 60 y 90 grados con el horizontal. La mayor ventaja del dispositivo propuesto, y donde radica su novedad, es que sólo precisa del correcto posicionamiento de un único anillo de proyección de sombra. El diseño propuesto permite sombrear simultáneamente cuatro piranómetros con distintas orientaciones minimizando la complejidad del sistema y costes de equipo.

En primer lugar se detallan las bases constructivas de diseño y restricciones geométricas y físicas que hay que salvar para que el dispositivo pueda cumplir con su cometido en condiciones normales de operación. A continuación se describe el proceso de diseño, desarrollo y construcción desde las primeras versiones y pruebas de prototipo hasta llegar al equipo desarrollado finalmente y actualmente en funcionamiento (dispositivo MK6). También se realiza un estudio detallado de la sensibilidad geométrica del dispositivo y sus efectos sobre el posicionamiento relativo del anillo de sombra respecto a los sensores. Así mismo, se indica el procedimiento de cálculo de las fechas de cambio de la posición del anillo a

[1] *"MK6"* es la denominación abreviada del anglicismo *"mark"* cuya traducción es modelo, y que es utilizado habitualmente en la producción industrial para referirse a series o versiones de productos.

lo largo del año para que éste se adapte a las variaciones del ángulo de declinación solar, sin afectar a las medidas tomadas y permitiendo un ancho mínimo de la banda de sombra. Finalmente se concluye con la descripción del software de simulación y optimización del diseño desarrollado en MATLAB específicamente para esta aplicación, así como los criterios de calibración y mantenimiento necesarios.

6.2. Bases de diseño y restricciones

Nuestro objetivo es la medida de irradiancia difusa en diferentes planos, de la forma más precisa, económica y eficaz posible (por este orden de preferencia). La medida de esta componente de la irradiancia solar que alcanza la superficie terrestre, se realiza usualmente mediante un piranómetro sobre el cual se proyecta sombra o, lo que es lo mismo, se bloquea la posible radiación directa proveniente del disco solar. Además, nos interesa hacer mediciones en varios planos distintos del horizontal para, por ejemplo, poder caracterizar con precisión la irradiancia incidente sobre elementos estructurales y arquitectónicos, tales como fachadas de edificios.

Aunque podría realizarse mediante dispositivos de medida de radiancia multidireccional, como los presentados en la sección B.4, éstos son muy costosos, requieren un alto periodo de tiempo para el registro completo de la bóveda celeste y necesitan complejas actuaciones de mantenimiento y calibración. Las restricciones económicas y técnicas hacen que se opte por un sistema con varios piranómetros o sensores sobre los cuales se pueda bloquear la irradiancia directa incidente de forma sencilla y produciendo la mínima perturbación en la medida.

De los mecanismos de proyección de sombra, el que menos interfiere en las medidas sería el disco o bola solar con seguidor. Es un mecanismo preciso que apenas produce distorsión en la medida, por lo que éstas suelen tomarse como referencia para otros dispositivos de medida. Sin embargo, ahí también reside su principal inconveniente, pues precisan de un sistema de seguimiento, cuya lógica de control no siempre es robusta, implica un coste adicional y sería preciso un sistema de seguimiento adaptado para todos y cada uno de los piranómetros que se deseara utilizar. El mencionado seguidor además, debería diseñarse exprofeso, para medidas en planos distintos del horizontal.El propio sensor ya no puede rotar, tal y como hace en los dispositivos convencionales, donde van montados sobre el eje vertical del seguidor, pues al realizarse la medida en el plano horizontal, este movimiento es un grado de libertad virtual que no afecta a la medida.

En el marco de diseño restringido por las condiciones indicadas, se opta por utilizar un sistema basado en el anillo de sombra de Drummond (véase el Anexo B).

6.2.1. Análisis geométrico del anillo de sombra para un piranómetro

El movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste se describe en la sección A.3, donde se indica que puede quedar definido por un sistema de dos coordenadas horizontales, es decir, referidas al plano del horizonte y al plano meridiano. Dichas coordenadas son el ángulo cenital (θ_{zs}) y el ángulo acimutal (γ_s). La primera coordenada determina el ángulo entre la visual del Sol con el observador y la vertical del lugar, mientras que la segunda determina el ángulo entre la proyección de dicha visual sobre el plano horizontal y el eje ecuatorial, o intersección del plano meridiano con el plano horizontal. Por otro lado, el Sol se desplaza, durante el año, a lo largo de una curva denominada eclíptica, que es la intersección del plano de la eclíptica con la bóveda celeste (véase la figura 6.1). Este plano es paralelo al plano ecuatorial celeste una distancia igual al ángulo de declinación del Sol, que varía para cada día del año según la expresión (A.19).

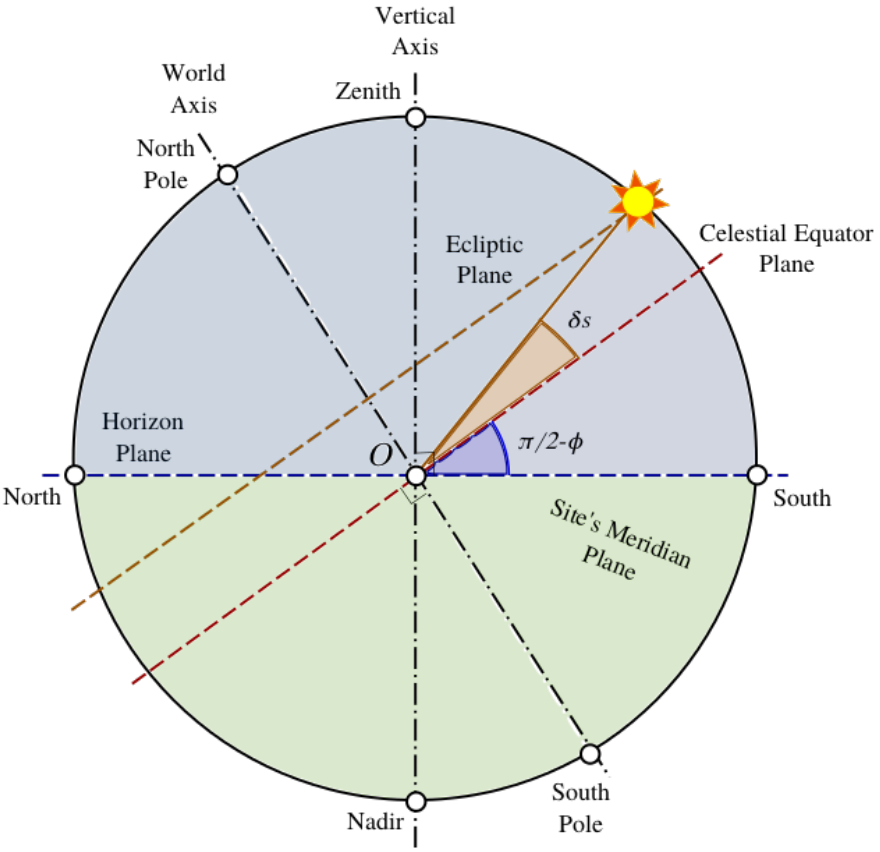


Figura 6.1: Geometría del movimiento aparente del Sol.

Como la bóveda celeste observada es una semiesfera, la forma geométrica ideal del dispositivo de sombreamiento debería ser una sección esférica, de centro el punto de referencia del sensor. No obstante, la obtención física de esta forma geométrica es costosa con las

tecnologías de fabricación actuales. Dado que el ancho de la banda de sombreamiento es proporcionalmente muy pequeña respecto al radio, la banda de sombreamiento puede aproximarse por una sección cilíndrica o anillo. En un sistema de coordenadas cartesianas referidas al centro del anillo $Q = (X_Q, Y_Q, Z_Q)$ podemos describir los límites del anillo por medio de la expresión:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a \cos\omega \\ R_a \sin\omega \\ \pm\dfrac{W_a}{2} \end{pmatrix}, \tag{6.1}$$

donde R_a es el radio del anillo, W_a es el ancho de la banda y ω es el ángulo horario en el plano del anillo.

El anillo se sitúa en una posición relativa al centro del sensor $O = (Z_O, Y_O, Z_O)$, que es considerado como el punto de referencia para todo el estudio geométrico. El movimiento del anillo respecto al punto O puede describirse mediante la combinación de un desplazamiento o traslación, caracterizado por el vector $\mathbf{d}$ y un movimiento de rotación respecto a tres ejes ortonormales, descrita por la matriz de rotación $\mathbf{M}$.

El vector desplazamiento $\mathbf{d}$ es la suma de los desplazamientos a lo largo de los ejes coordenados x, y y z. Como el movimiento aparente del Sol es simétrico respecto del plano meridiano del observador, el desplazamiento a lo largo del eje y es nulo. Por ello, el alineamiento debe realizarse únicamente en el eje Norte-Sur:

$$\mathbf{d} = \mathbf{d_x} + \mathbf{d_z} = \begin{pmatrix} X_Q - X_O \\ 0 \\ Z_Q - Z_O \end{pmatrix}. \tag{6.2}$$

La matriz de rotación $\mathbf{M}$ es el producto de las matrices de rotación en cada eje de los *"ángulos de Euler"*: *"pitch"* o *"cabeceo"* (λ_1), *"yaw"* o *"guiñada"* (λ_2) y *"roll"* o *"alabeo"* (λ_3). De nuevo, gracias a la simetría del sistema en la dirección ecuatorial, la matriz de rotación respecto al eje x' es la matriz identidad. Además, la banda del anillo al tener simetría axial, tampoco se ve afectada por ningún giro entorno al eje z'. La matriz de rotación queda entoces definida por:

$$\mathbf{M}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \mathbf{M_{y'}}(\lambda) = \begin{pmatrix} \cos\lambda & 0 & \sin\lambda \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\lambda & 0 & \cos\lambda \end{pmatrix}. \tag{6.3}$$

Se pueden definir los límites de la banda de sombreamiento del anillo, referidos a un sistema de coordenadas cartesianas absoluto con centro el elemento sensor del piranómetro o punto de referencia O, mediante:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \mathbf{M}(\lambda) \times \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} + \mathbf{d}. \tag{6.4}$$

En este punto resulta trivial la transformación desde el sistema de coordenadas cartesianas al sistema de coordenadas horizontales mediante las expresiones:

$$\cos\theta_{zr} = \frac{Z}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}}, \tag{6.5}$$

$$\tan\gamma_r = \frac{Y}{X}, \tag{6.6}$$

siendo θ_{zr} el ángulo cenital del punto del anillo considerado y γ_r su ángulo acimutal. La banda de sombra queda entonces definida en función de los parámetros: radio (R_a), ancho (W_a), ángulo de inclinación (θ_{zr}) y el vector desplazamiento ($\mathbf{d}$).

Como el movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste se desarrolla siempre en la eclíptica y ésta siempre es paralela al ecuador celeste, el cual está definido como la intersección del plano del ecuador con la bóveda celeste, se infiere inmediatamente que el plano del anillo de sombreamiento debe coincidir con el plano de la eclíptica y debe ser paralelo al ecuador celeste, es decir, debe estar inclinado un ángulo complementario al de la latitud geográfica del lugar ($\theta_{zr} = \pi/2 - \phi_g$). Entonces, la guiñada de la matriz de rotación $\mathbf{M}$ debe ser $\lambda = -\theta_{zr} = \phi_g - \pi/2$, por el sentido de los ejes tomados.

Una banda inmóvil debería estar centrada en el plano del ecuador celeste y tener el ancho W igual a:

$$W_a = 2R_a \tan[\text{máx}(\delta_s)]. \tag{6.7}$$

Dicho espesor daría lugar a un ratio entre el ancho de la banda y el radio:

$$\psi = \frac{W_a}{R_a} = 2\tan[\text{máx}(\delta_s)] = 2\tan 23.45^{\text{o}} = 0.8676, \tag{6.8}$$

lo cual supondría la obstrucción de la mayor parte de la bóveda observada por el sensor, con la consecuente aberración en la medida tomada. Para evitarlo, debemos diseñar una banda mucho más estrecha e irla ajustando, es decir, desplazando a lo largo de un eje paralelo al eje del mundo, a lo largo del año, en función de la declinación solar. Dicho desplazamiento está caracterizado por el vector $\mathbf{d}$ y puede expresarse entonces como:

$$\mathbf{d} = \mathbf{d_x} + \mathbf{d_z} = \begin{pmatrix} -d\cos\phi_g \\ 0 \\ d\sin\phi_g \end{pmatrix}, \tag{6.9}$$

siendo d el módulo del vector desplazamiento cuyo valor por trigonometría debe ser:

$$d = R_a \tan\delta_s. \tag{6.10}$$

Con las restricciones geométricas anteriores, para proyectar sombra sobre el domo del sensor, de radio R_p y sobre un plano inclinado θ_{zp}, a lo largo de todo el año, el ancho de la banda debe verificar:

$$\frac{W_a}{2R_p} \geq \text{máx}\left[\frac{\cos(\delta_s+\phi_g-\theta_{zp})}{\cos\delta_s}\right] = \text{máx}\left[\frac{\cos(\delta_s+\phi'_g)}{\cos\delta_s}\right]. \tag{6.11}$$

La figura 6.2 muestra el comportamiento de la función (6.11) en función del día del año N, que determina el ángulo de declinación solar δ_s, y el ángulo $\theta_{zp} - \phi_g$.

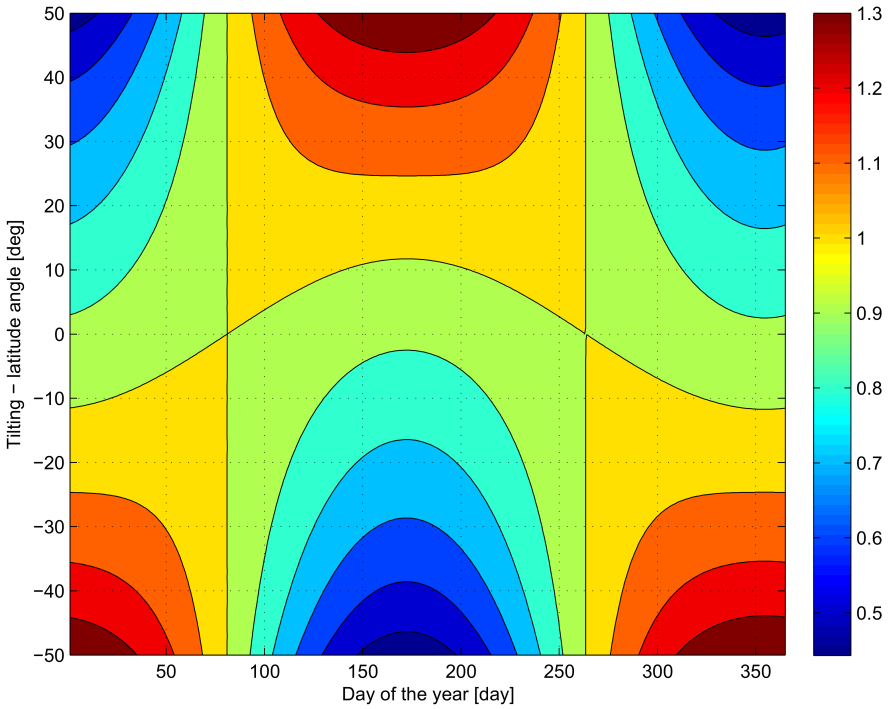


Figura 6.2: Función de sombreamiento del piranómetro.

El ratio entre el ancho del anillo y su radio, ψ, en la mayor parte de dispositivos comerciales se encuentra en el intervalo $[0.15, 0.25]$, de forma que cuanto mayor es esta proporción, mayor es el error de medida asociado, así como el factor de corrección geométrico correspondiente.

6.2.2. Sombreamiento de múltiples piranómetros simultáneamente

Como se ha visto en la subsección anterior, la geometría óptima para la banda de sombra debería ser una sección esférica, la cual podemos aproximar para valores de ψ pequeños por una sección cilíndrica o anillo. Si optamos por otro tipo de formas geométricas, tales como elipses u óvalos, estas formas no serán lo suficientemente eficaces ni eficientes. Es por ello que se debe buscar la forma de sombrear cada sensor manteniendo las propiedades óptimas individualmente. La solución encontrada ha sido la del empleo de un anillo multilobular, con tantos lóbulos como piranómetros haya. Cada lóbulo debe ser una sección de cilindro con un ángulo de apertura superior o igual a 180º, que es el ángulo del campo de visión del sensor. Además si se desea que el anillo sea plano, es decir, no esté constituido por planos paralelos en función de la posición del sensor, se deben respetar unas posiciones definidas

para los piranómetros dentro de la estructura. De esta forma, con un único anillo plano, se pueden sombrear varios piranómetros simultáneamente, ahorrando costes, mantenimiento, calibraciones y ganando una gran sencillez en la operación del mecanismo.

Las posiciones de los piranómetros en la estructura fija deben situarse en la intersección entre las caras de la estructura soporte y un plano paralelo al del anillo lobular, respecto a un punto de referencia. En este caso, se ha decidido que el punto de referencia sea el punto central de la estructura permitiendo así, además, que los sensores Este y Oeste permanezcan alineados en un mismo eje. Los sensores Norte y Sur están contenidos en el mismo plano vertical, coincidente con el meridiano, pero a unas alturas relativas respecto al punto de referencia determinadas por:

$$e_z = e_y \tan \theta_{zr}, \tag{6.12}$$

donde e_y es la distancia entre piranómetros a lo largo del eje y. Las posiciones de los sensores y las distancias están indicadas en la figura 6.3.

Como se puede apreciar en la figura 6.4, los centros de los lóbulos cilíndricos Q_i están contenidos en un mismo plano y separados respecto del centro del anillo completo las distancias r_x y r_y a lo largo de los ejes x e y respectivamente. Estas distancias deben verificar:

$$r_x = e_x, \tag{6.13}$$

$$r_y = \frac{e_y}{\cos \theta_{zr}}. \tag{6.14}$$

Además, para garantizar que cada sensor posee un campo de visión de, al menos, 180º y que la trayectoria solar esté cubierta por el lóbulo correspondiente, se deben tener en cuenta las relaciones geométricas mostradas en la figura 6.5, donde:

$$a = \frac{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}{2}, \tag{6.15}$$

y

$$b = \sqrt{R_a^2 - a^2}, \tag{6.16}$$

y pudiéndose expresar los ángulos α_1 y α_2 como:

$$\alpha_1 = \arctan \frac{r_y}{r_x} + \arctan \frac{b}{a}, \tag{6.17}$$

$$\alpha_2 = \arctan \frac{r_x}{r_y} + \arctan \frac{b}{a}. \tag{6.18}$$

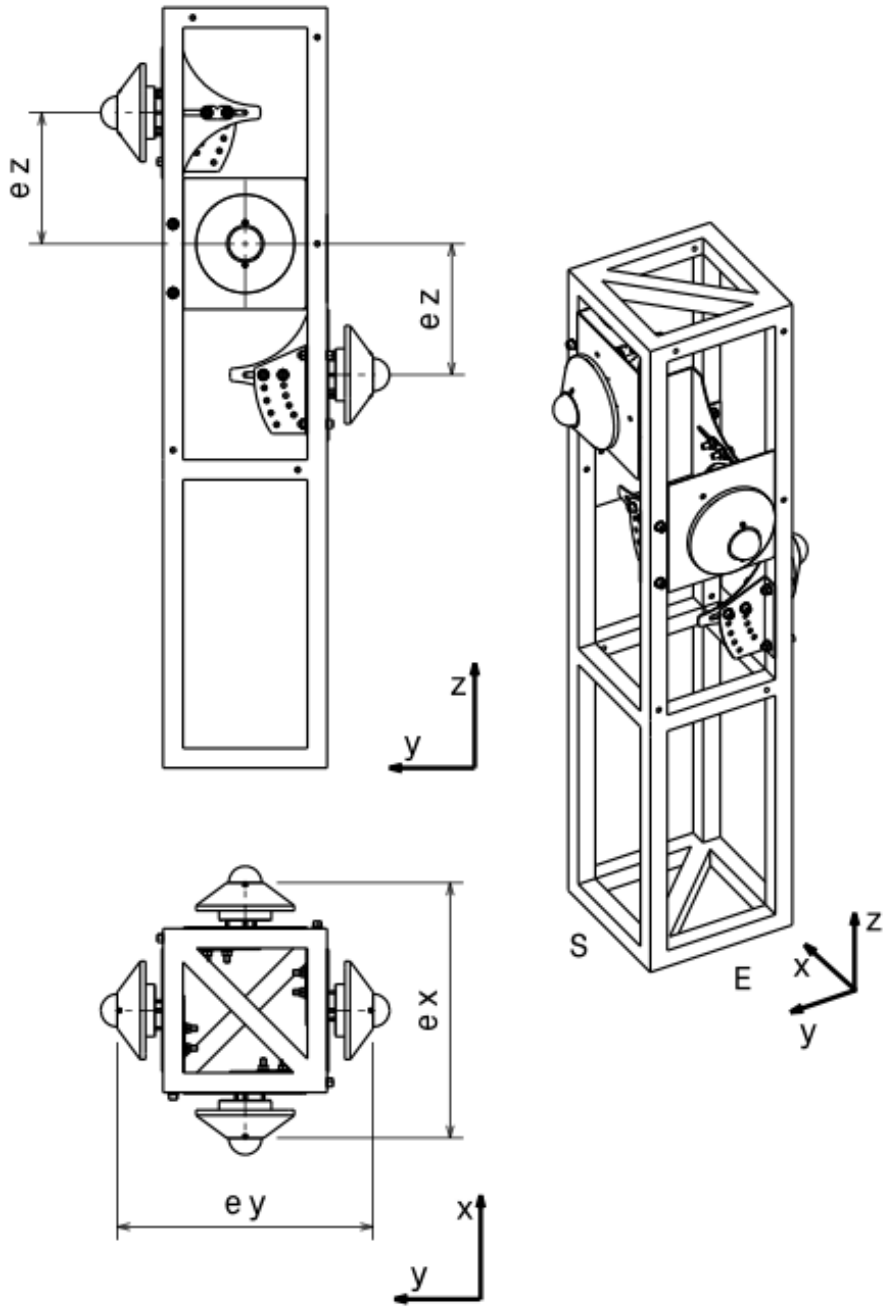


Figura 6.3: Posiciones de los piranómetros y referencias constructivas.

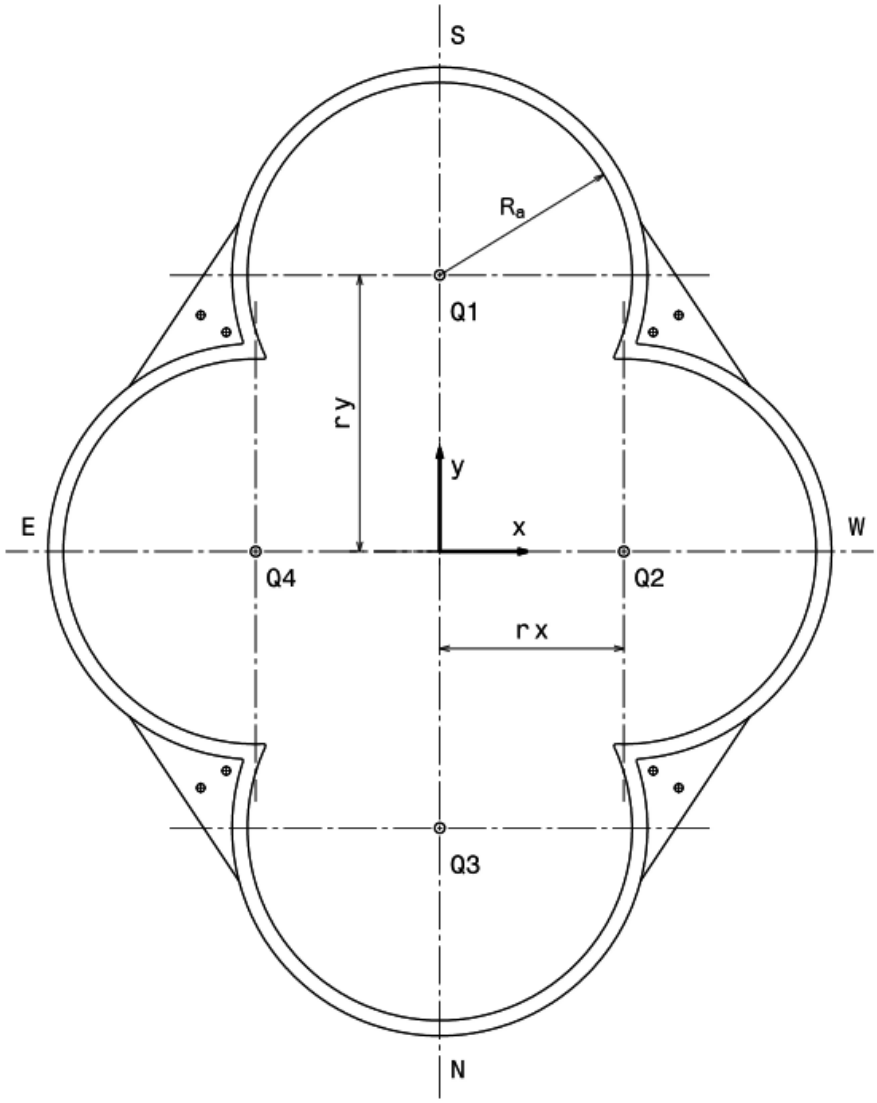


Figura 6.4: Anillo lobular con indicación de referencias.

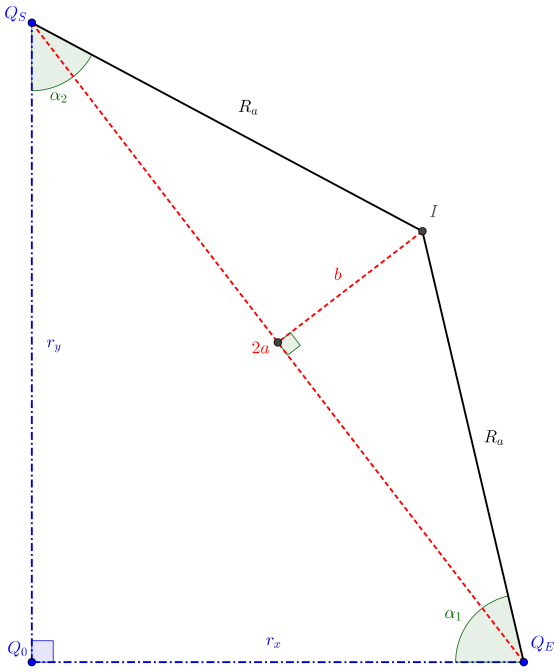


Figura 6.5: Relación entre los centros y el radio de los lóbulos del anillo.

Sustituyendo en la ecuación (6.16) la expresión (6.15) se puede evaluar el cociente b/a como:

$$\frac{b}{a} = \frac{\frac{\sqrt{4R_a^2 - r_x^2 - r_y^2}}{2}}{\frac{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}{2}} = \sqrt{\frac{4R_a^2}{r_x^2 + r_y^2} - 1}. \tag{6.19}$$

Si $r_y \geq r_x$ entonces $\arctan(r_y/r_x) \geq \arctan(r_x/r_y)$. Bajo esta hipótesis $\alpha_1 \geq \alpha_2$, y para garantizar un ángulo superior o igual a 180° el mayor de los ángulos, α_1 debe verificar $\alpha_1 \leq \pi/2$ rad, por lo que:

$$\arctan\frac{r_x}{r_y} + \arctan\sqrt{\frac{4R_a^2}{r_x^2 + r_y^2} - 1} \leq \frac{\pi}{2},\ \forall r_y \geq r_x. \tag{6.20}$$

6.3. Primeros prototipos

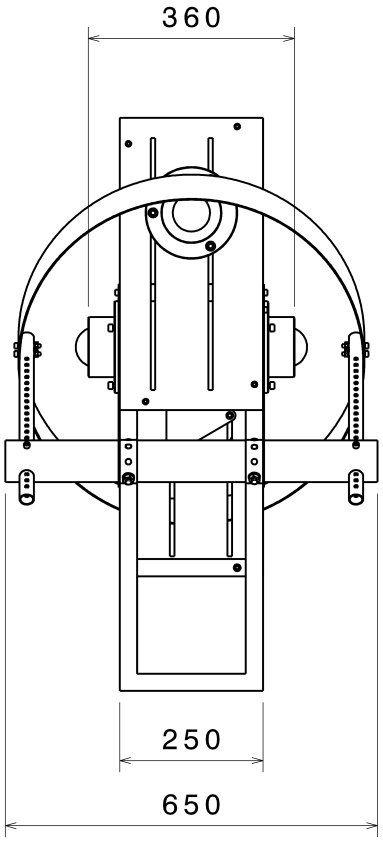
La denominación MK6 del equipo diseñado corresponde con la sexta versión de desarrollo del mismo. Antes de ella se ha pasado por un proceso de diseño y mejora de hasta cinco versiones anteriores del prototipo propuesto. En este sentido destaca especialmente la primera versión, cuyo conjunto de vistas y perspectiva se pueden apreciar en la figura 6.6.

El prototipo MK1 contaba con una estructura fija de base cuadrada sobre la que se emplazaban los piranómetros de medida. Los piranómetros Este y Oeste estaban situados sobre unas placas que también servían de elemento soporte del anillo de sombra (véase la figura 6.7(b)). Los sensores orientados hacia el Norte y el Sur se colocaban sobre un conjunto soporte formado por una placa ranurada y una contraplaca (véase la figura 6.7(a)) que permitía que éstos cambiasen su altura relativa respecto de los sensores orientados hacia el Este y Oeste. Esto permitía que el centro de referencia de estos sensores pudiera variar a lo largo del año y adaptarse a la proyección de sombra de un único anillo de tipo elíptico. Dicho anillo podía regularse en altura, para adaptarse al ángulo de declinación solar correspondiente, mediante dos varillas graduadas, que se anclaban a su vez a un cilindro transversal fijado a la estructura base a través de las placas soporte Este y Oeste. El anclaje de este cilindro tenía varias posiciones permitiéndo que se adaptara en la mayor medida posible al ángulo óptimo de inclinación del anillo (ángulo complementario a la latitud geográfica).

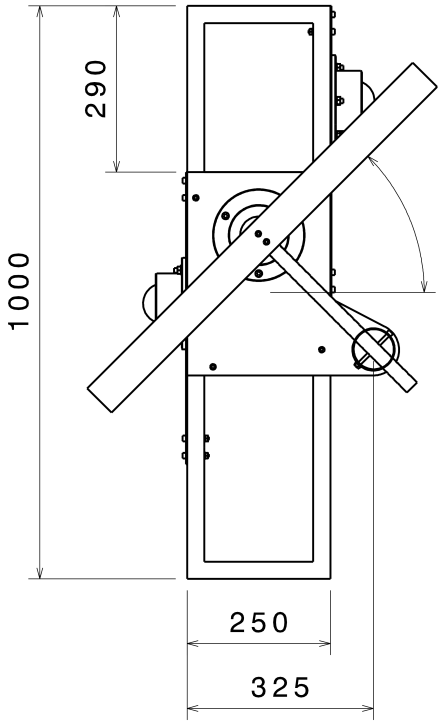
El diseño del prototipo MK1 era sencillo y eficaz, pero generaba dos problemas fundamentales. El primero de ellos es que, aunque se optimizase a la mejor relación posible entre ejes del anillo elíptico, éste no ofrecía la forma geométrica más idonea para garantizar un bloqueo de la trayectoria solar en los cuatro sensores. Por otro lado, el mecanismo de regulación en altura de los sensores Norte y Sur, precisaba un ajuste muy fino. Los dos sensores se movían independientemente, duplicando la tarea de ajuste y calibración, y la fijación final dependía del par de apriete de los tornillos de fijación de los sensores.

Ante las deficiencias detectadas en el primer diseño, éste evolucionó en sucesivas versiones. Así, se fue desarrollando un anillo lobular en lugar del anillo elíptico original y se analizaron las relaciones geométricas de las posiciones de los sensores en la estructura soporte para minimizar su desplazamiento vertical. Así destaca la versión quinta del prototipo, denominada MK5 y presentada en la figura 6.8. Ésta muestra, mediante tres vistas ortogonales y una vista de detalle, una estructura ligeramente aligerada respecto a la propuesta en el prototipo MK1, permitiendo una mejor refrigeración de los sensores y una menor oposición al viento. Los sensores, además, pasan de situarse en placas fijas en unos soportes especialmente diseñados. Éstos permiten modificar individualmente el ángulo de inclinación de cada sensor, sin afectar a la operación normal del equipo. De hecho, en la figura 6.9 se pueden observar distintas representaciones, donde los sensores no están en posición vertical, sino que presentan un ángulo de inclinación de 60° respecto del plano horizontal.

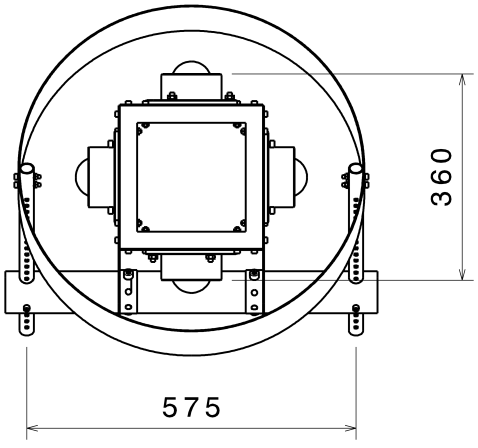
El nuevo anillo lobular es solidario a un conjunto formado por una barra longitudinal en cuyos extremos se sitúan dos cilindros transversales (véase la figura 6.10). La barra transversal posee dos tramos perforados que marcan todas las posiciones posibles para que la posición del anillo se adapte al ángulo de declinación solar a lo largo del año, teniendo en cuenta el ancho de la banda de sombra. El anillo queda fijo a este sub-montaje mediante



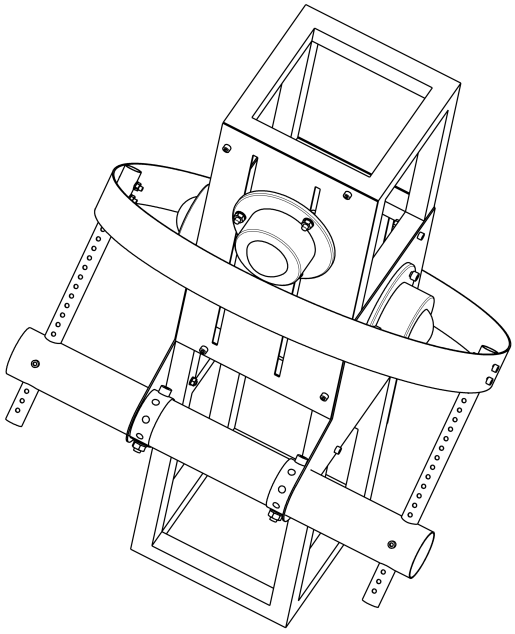
a) Alzado.



b) Vista lateral (Oeste).

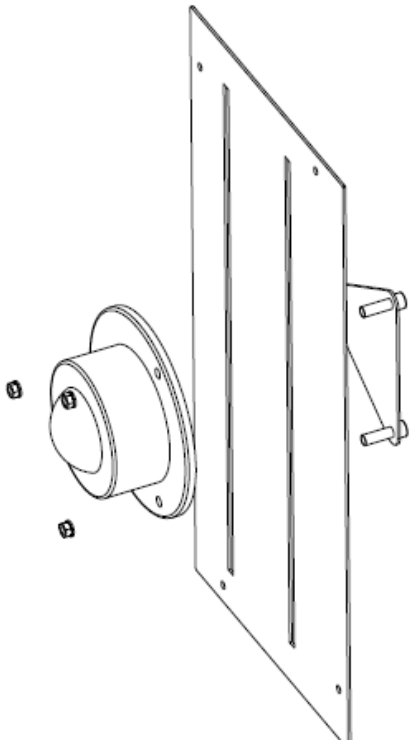


c) Vista en planta.

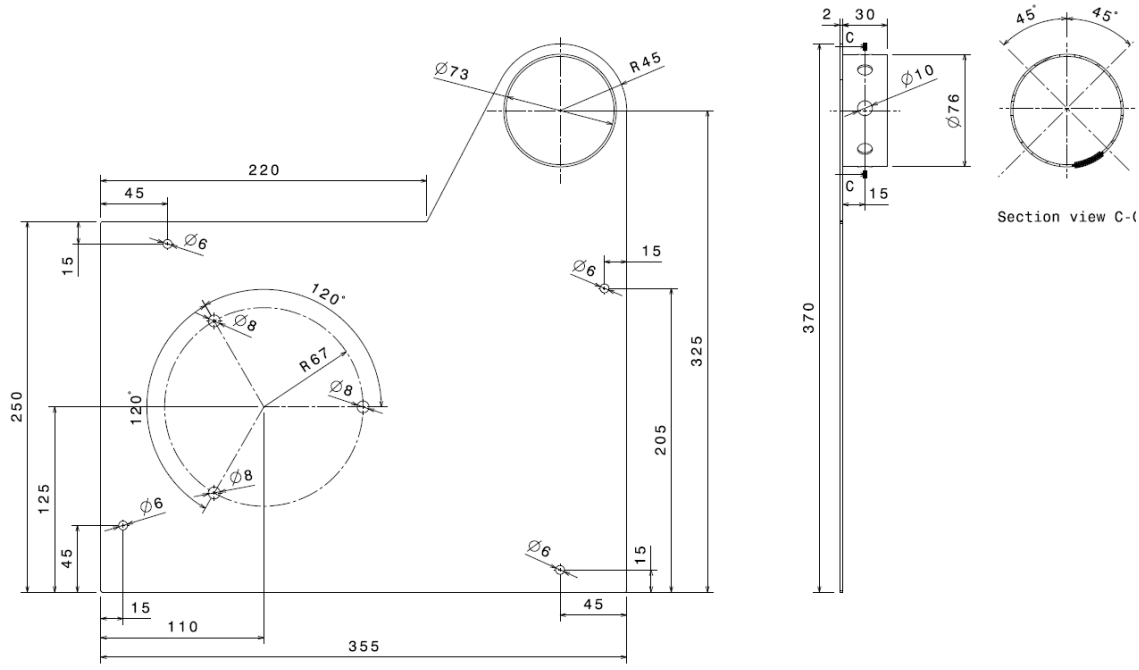


d) Perspectiva isométrica.

Figura 6.6: Prototipo de estación de medida MK1.



(a) Detalle del conjunto soporte de los sensores Norte y Sur.



(b) Placa lateral.

Figura 6.7: Detalles constructivos del prototipo MK1.

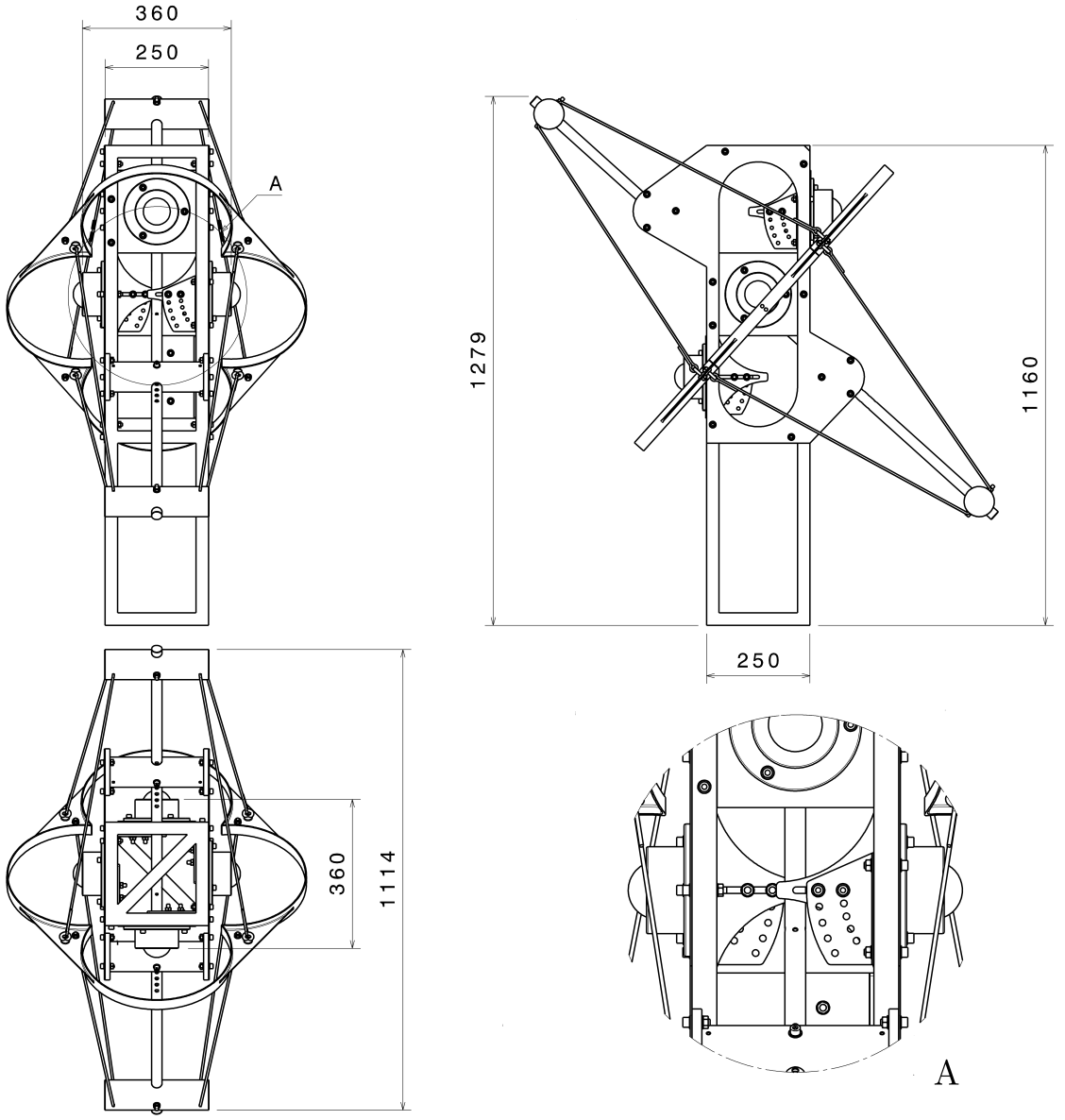
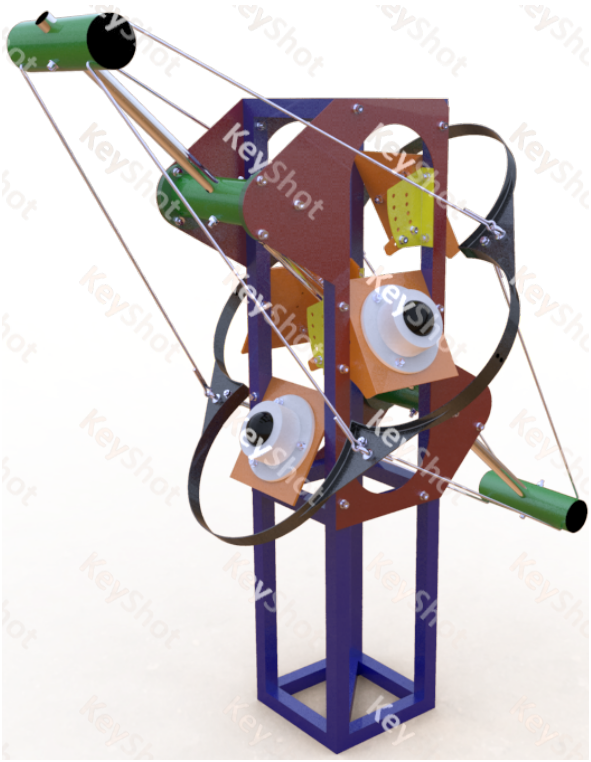


Figura 6.8: Prototipo de estación de medida MK5.



(a) Picado.

(b) Contrapicado.



(c) Perspectiva posterior.

Figura 6.9: Diferentes perspectivas del prototipo MK5.

cuatro cables de acero tensados que atraviesan los cilindros horizontales extremos. El anclaje se realiza mediante argollas DIN 580 atornilladas a las aletas del anillo, y el tensado se mantiene mediante tensores o candados tensores. La fuerza de tensión mantiene el anillo perfectamente alineado mediante una solución sencilla y elegante. El anillo lobular es de sección plana o en I, y está reforzado estructuralmente mediante cuatro aletas triangulares colocadas como rigidizadores entre lóbulos.

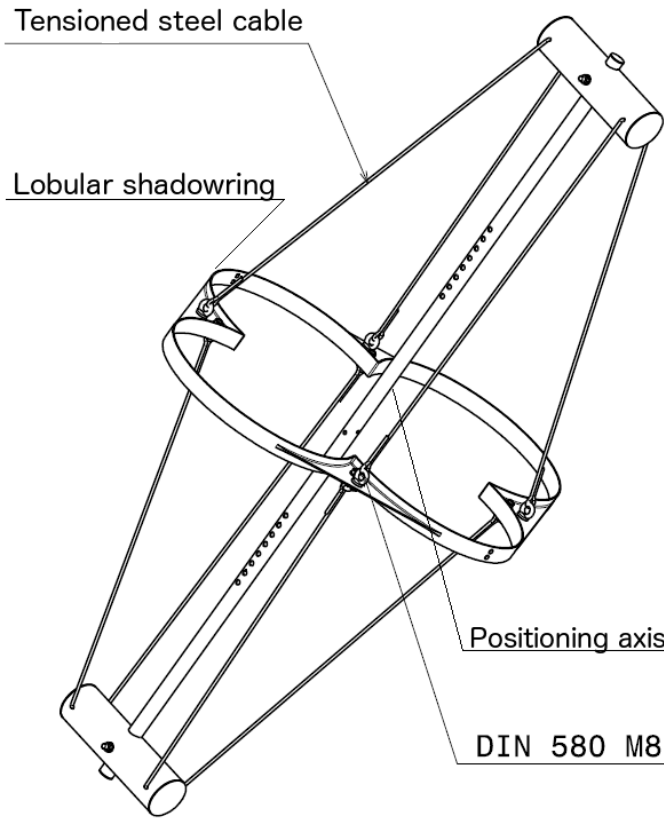


Figura 6.10: Submontaje del anillo de sombra en el prototipo MK5.

Las placas laterales Este y Oeste también evolucionaron, dejando de constituir el soporte de los sensores en estas direcciones, para configurarse únicamente como soporte con el submontaje del anillo. Esta vez permitían el apoyo en dos puntos (inferior en la cara Sur y superior en la cara Norte), mediante sendos cilíndros idénticos a los cilindros extremos del soporte del anillo, para minimizar el número de piezas diferentes. Estos cilindros estaban sujetos a las placas mediante bridas de acero en sus extremos, simplemente encajadas o soldadas. El diseño de las placas laterales es tal que la disposición de los soportes del anillo fuera la que le confiriera a éste la inclinación del ángulo óptimo. De esta forma, un cambio de emplazamiento del dispositivo (latitud geográfica ϕ_g) únicamente afectaría a un rediseño de estas placas, muy sencillas de fabricar mediante las últimas tecnologías de corte de chapa metálica.

Pese a que el dispositivo MK5 presentaba una buena solución se comprobó que un exceso en la fuerza de tensado podía provocar una deformación indeseada del anillo. Para evitar esto, además de reforzar la sección del mismo mediante una geometría en U, que además añade un ancho virtual al ancho real de la banda, en la siguiente versión de diseño (prototipo MK6) se sustituyó el sistema de tensado por un sistema de barras roscadas, de similar configuración a los cables tensados, pero que permitían fijar la posición del anillo mediante sendos pares de tuerca y contra-tuerca.

Nótese que en todos los prototipos se ha respetado la máxima de que los conjuntos pudieran ser completamente desmontables, con el menor número de piezas diferentes posible y con la posibilidad de adaptarlo para su ubicación en cualquier emplazamiento.

La tabla 6.1 muestra la relación de cambios más significativa entre las distintas versiones de prototipos.

Tabla 6.1: Relación de cambios entre versiones del prototipo MK.

Prototipo	**Relación de cambios**
MK1	Prototipo original.
MK2	Optimización de la posición de los sensores Norte y Sur eliminando las placas de desplazamiento vertical.
MK3	Introducción de la primera versión del anillo lobular.
MK4	Sustitución de los ejes laterales de desplazamiento del anillo lobular por un único eje transversal.
MK5	Introducción de los soportes móviles para modificar la inclinación de los sensores. Apoyo del eje transversal de posicionamiento del anillo en dos puntos.
MK6	Sustitución de los cables tensados que sujetan el anillo por barras roscadas. Mejora del anillo haciéndolo con sección en U.

6.4. Prototipo MK6

La teoría geométrica expuesta en la sección 6.2 se ha aplicado en un prototipo experimental denominado *"MK6"*, como se ha indicado. Este prototipo es una estación radiométrica

capaz de medir irradiancia difusa y reflejada sobre cuatro planos orientados según las direcciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste en ángulos de inclinación de entre 60º y 90º con la vertical. Las medidas en los cuatro sensores se realizan simultáneamente, con una capacidad de registro tan alta como permita la estabilidad de medida del sensor utilizado y las características técnicas del registrador, y sólo precisa de un único anillo lobular que ha de ser regulado cada cierto intervalo de tiempo (véase la sección 6.6). Las vistas principales, así como un detalle del sub-montaje del anillo de sombreamiento, se observan en la figura 6.11.

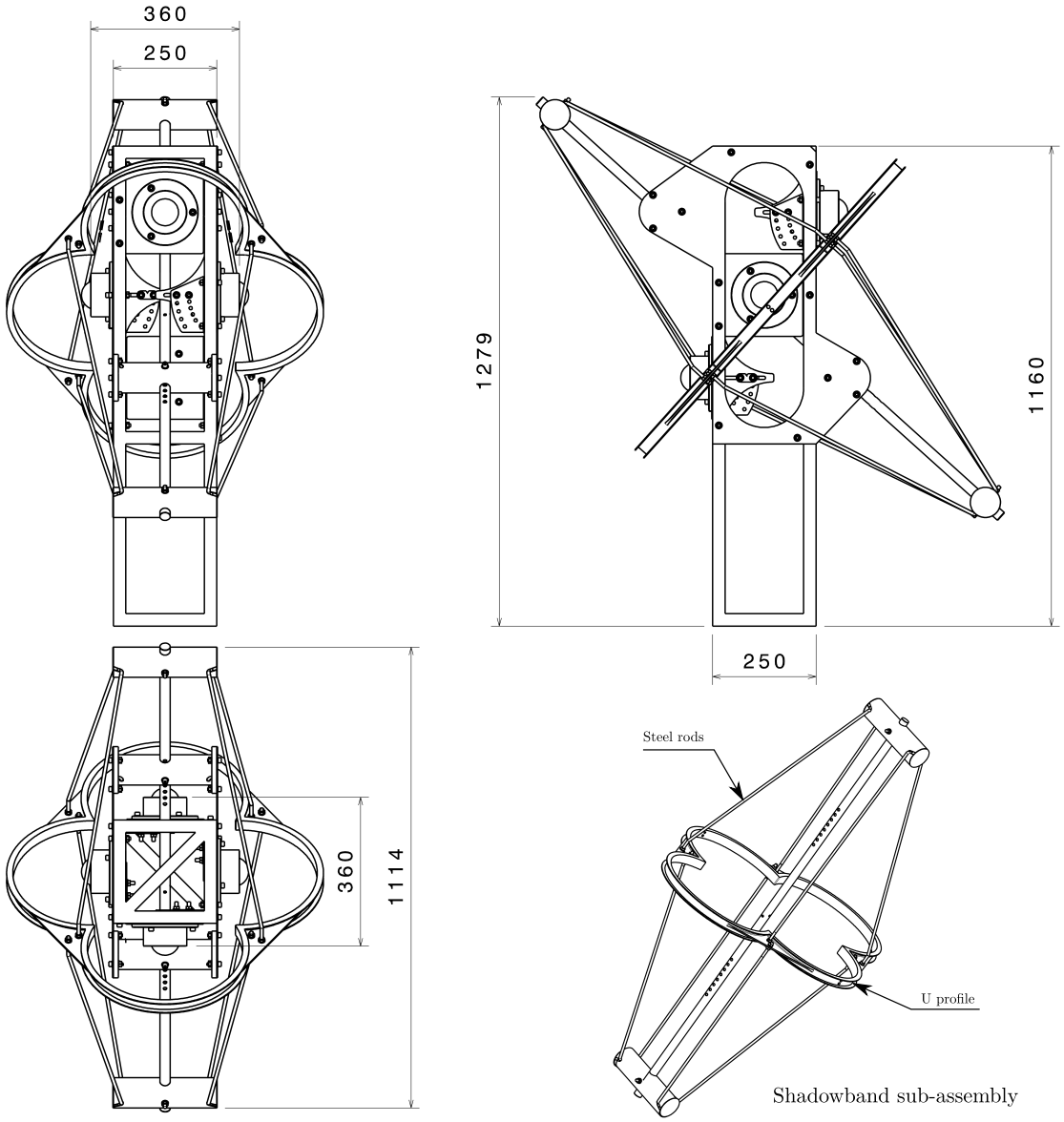
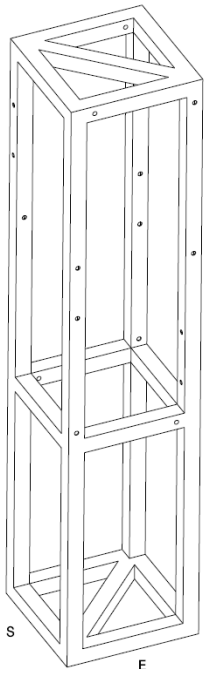


Figura 6.11: Prototipo de estación de medida MK6.

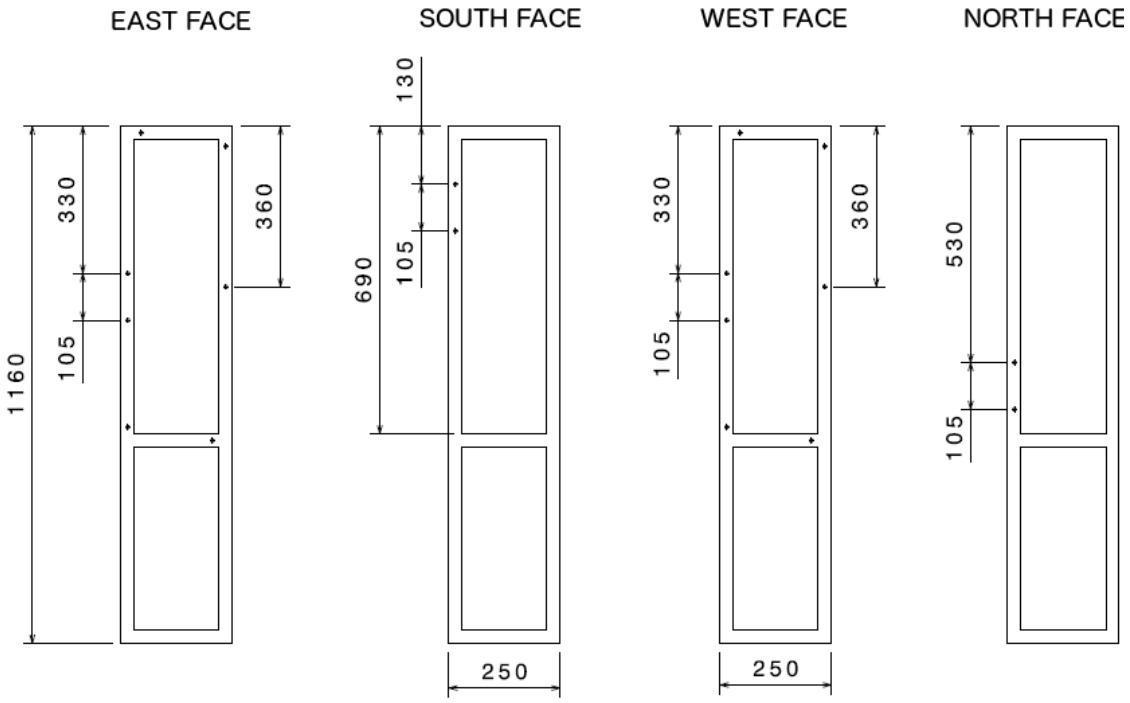
Tal y como puede observarse en la figura 6.11, y con más detalle en la figura 6.12, el dispositivo se compone de una estructura soporte central, de tipo prismático de 1 160 mm de altura, hecha de acero con perfiles cuadrados de 30 mm de lado y 1.5 mm de espesor. Sobre dicha estructura, que puede ir directamente anclada al terreno o a otra estructura soporte según las necesidades, se colocan los soportes para los sensores.

Las plataformas soporte (figura 6.13) constan de tres piezas: la primera de ellas (véase la figura 6.13(b)) se ancla a la estructura y tiene marcadas hasta 5 posiciones para permitir los distintos grados de inclinación. Mediante unos pasadores colocados en las perforaciones de la placa anterior, según el ángulo de inclinación que se desee, se coloca la placa base del sensor (véase la figura 6.13(a)). Esta placa está doblada en L, de forma que uno de los lados es cuadrado, con las perforaciones necesarias para el anclaje de los sensores estándar, y el otro lado disminuye su sección progresivamente y tiene una acanaladura a través de la cual pasan los pernos anteriormente mencionados. La acanaladura permite regular la posición de la placa soporte respecto de la cara exterior de la estructura para así poder alinear perfectamente la superficie sensora en el punto de referencia del anillo de sombra. La tercera pieza es un elemento de referencia que permite medir con precisión la distancia a la que debe fijarse la placa base, precisamente para realizar el mencionado alineamiento (véanse las figuras 6.14(a) y 6.14(b)). Esta última pieza tiene dos orificios para encajar con los pernos y una muesca en V para marcar, en una guía reglada sobre la base soporte, la distancia deseada. Dicha guía reglada o escala (figura 6.14(c)) ha sido diseñada de modo que posicionando la muesca en V en la marca coincidente con la altura h del sensor (distancia entre la superficie sensora y el punto de contacto con la base), éste queda en el punto de referencia, independientemente de cuál sea su ángulo de inclinación. El conjunto se fija con sendas arandelas y tuercas que se atornillan sobre los pernos anteriores. El sistema diseñado permite instalar sensores de diferentes fabricantes con un margen de alturas h entre 26 y 98 mm entre la superficie sensora y la superficie de apoyo del piranómetro.

En las caras Este y Oeste de la estructura soporte se colocan dos placas que soportan dos cilindros a través de los cuales desliza el eje de posicionamiento del anillo. El eje deslizante atraviesa toda la estructura y su posición se fija mediante dos pernos que atraviesan los cilindros anteriores perpendicularmente. Los cilindros horizontales se unen a las placas laterales mediante unas bridas de acero de 20 mm de ancho y 10 mm de espesor. La misión de las placas laterales, que se aprecian con detalle en la figura 6.15, es garantizar que el eje deslizante se encuentra inclinado el ángulo adecuado. Los pernos que sujetan el eje también impiden que éste gire. La configuración mediante estos elementos permiten que el conjunto sea totalmente desmontable y en cualquier momento se pueda realizar la sustitución de la piezas. Cambiar el emplazamiento del equipo a una nueva latitud geográfica únicamente requeriría la sustitución de sendas placas laterales, de forma sencilla y económica. Las placas cuentan con una marca de referencia para distinguirlas y facilitar su montaje. Así

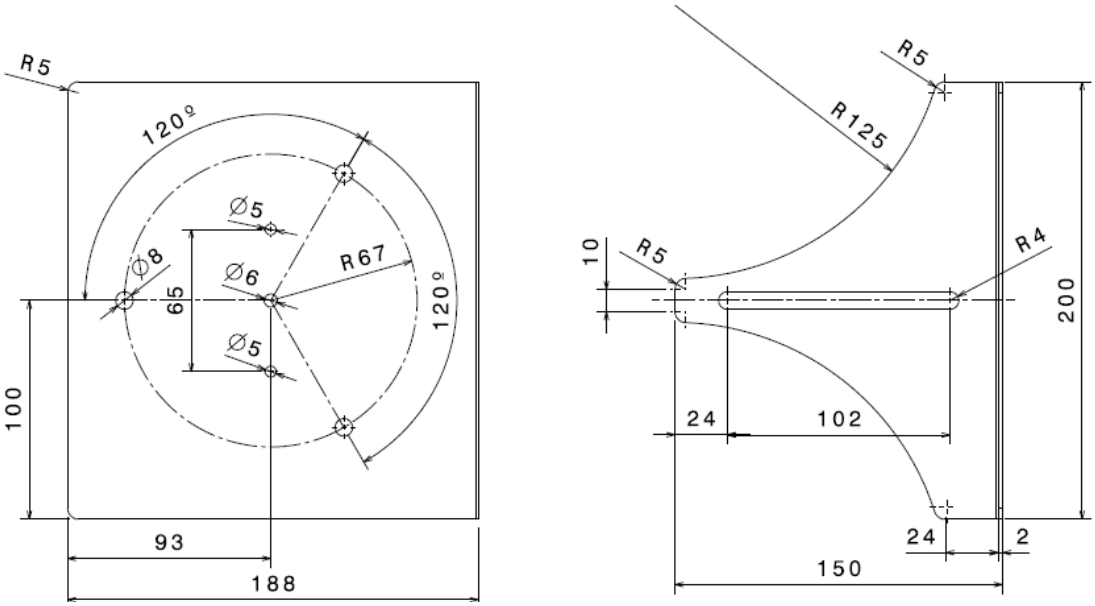


(a) Perspectiva.

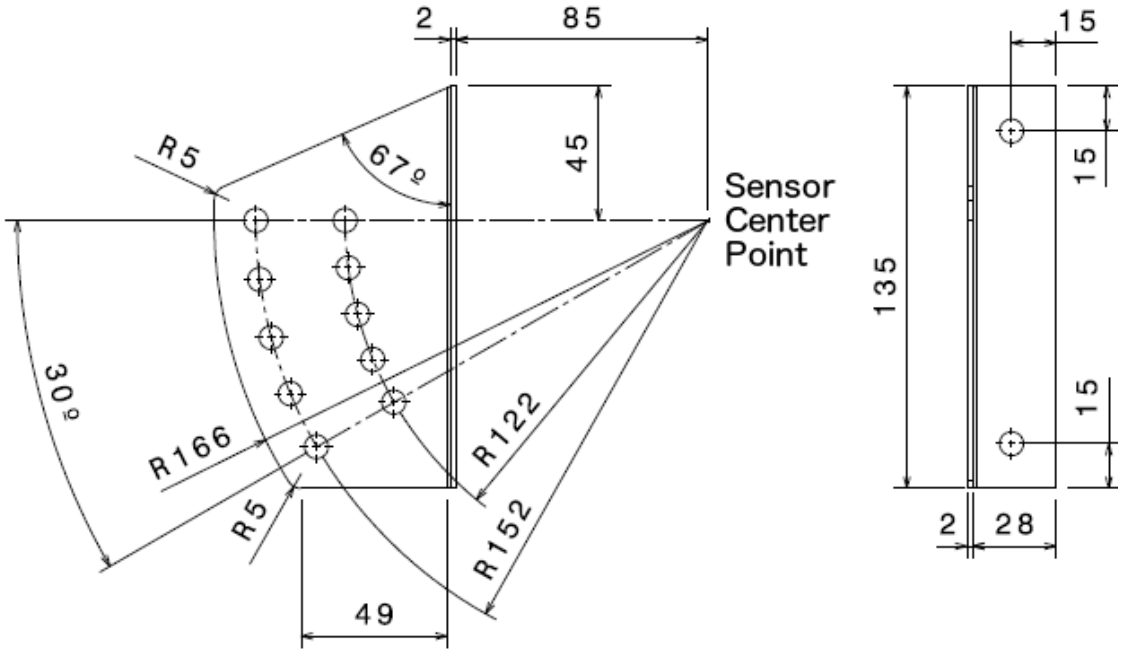


(b) Detalle de las caras.

Figura 6.12: Estructura soporte del prototipo MK6.

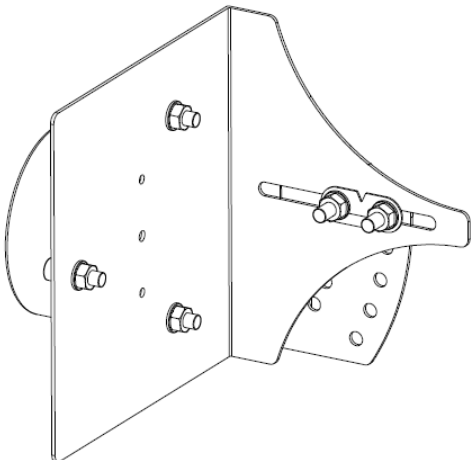


(a) Soporte móvil del piranómetro.

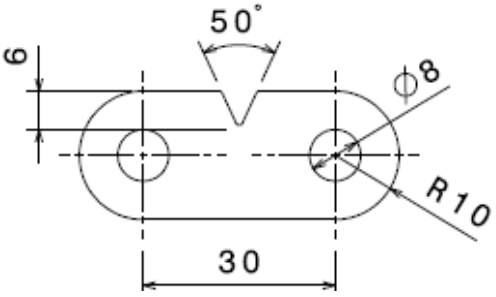


(b) Soporte anclado a la estructura.

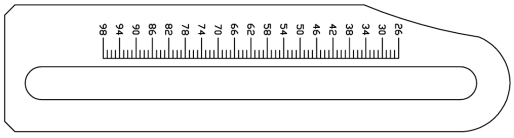
Figura 6.13: Placas soporte de los piranómetros.



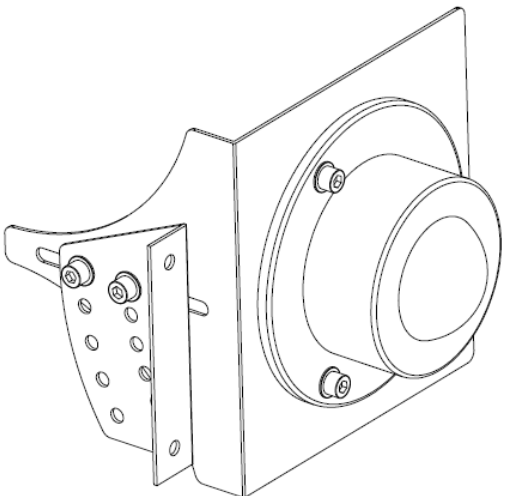
(a) Vista posterior del conjunto.



(b) Placa auxiliar para regulación.



(c) Escala de regulación.



(d) Vista anterior del conjunto.

Figura 6.14: Montaje de las placas soporte de los piranómetros.

mismo, se debe prestar especial atención a la cota crítica que marca la medida de la distancia entre centros de ejes.

El eje deslizante anteriormente descrito termina en dos soportes, también cilíndricos e idénticos a los que sirven de guía deslizante del eje (para minimizar así el número de piezas diferentes del conjunto, y facilitar su fabricación), con unas acanaladuras en ángulo respecto al eje de simetría. Dichas acanaladuras permiten posicionar unas barras dobladas de 7 mm de diámetro, todas iguales entre sí, pero asimétricas, que conectan el eje deslizante con el anillo lobular. Al enfrentarse unas barras sobre otras el apriete de éstas sobre el anillo mediante un sistema de tuerca y contratuerca, permite el tensionado uniforme de todos los elementos del mismo y el correcto posicionamiento del anillo en su posición de referencia. El eje deslizante posee dos grupos de 8 perforaciones cada 15 mm que permiten la regulación en 8 posiciones diferentes a lo largo del año. El calendario de cambio de posición se determina en la sección 6.6.

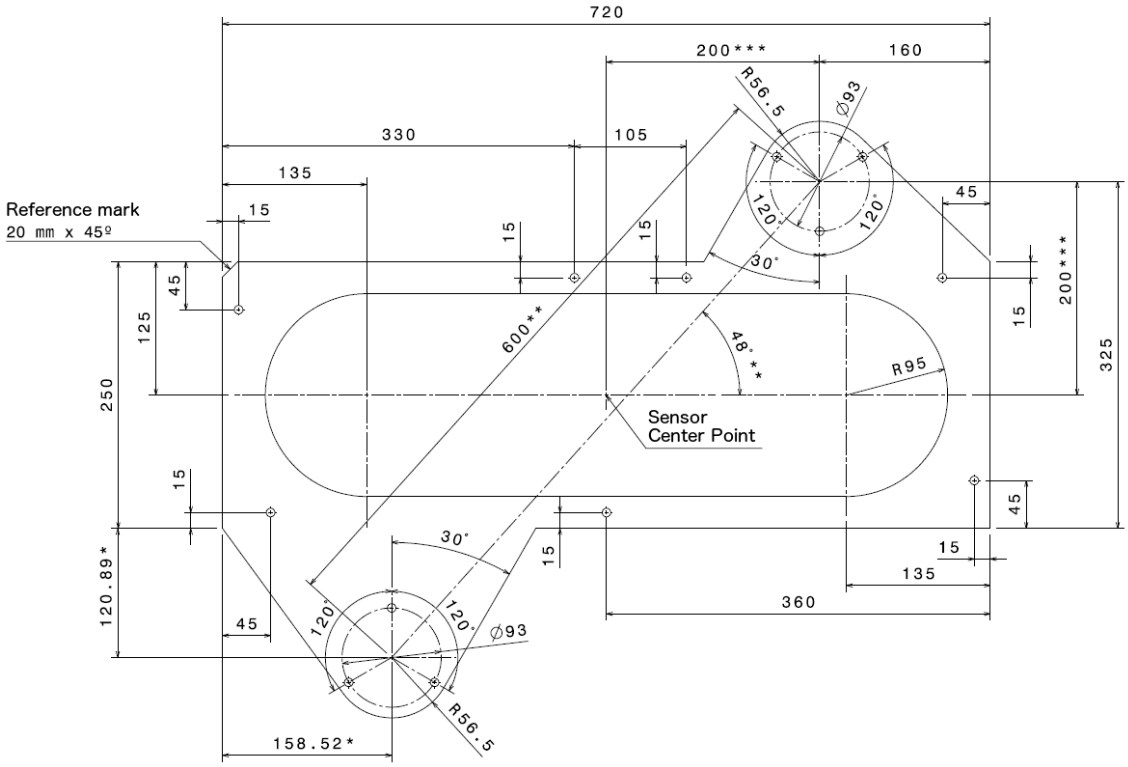
Finalmente, el prototipo se completa con el anillo lobular descrito (véase la figura 6.4), que posee 4 lóbulos de 188 mm de radio, tiene un ancho de 30 mm, con lo que da lugar a una relación $\psi = 0.160$ optimizada (minimiza las aberraciones en la medida por interferencia con la bóveda observada por el sensor) y una sección transversal en U. Los cuatro lóbulos están situados a unas distancias $r_x = 180$ mm y $r_y = 270$ mm, de forma que se garantiza la condición (6.20) y permite que el ángulo de visión de cada sensor así como el ángulo cubierto por cada lóbulo sean de al menos 180°. Por otro lado, los lóbulos están unidos entre sí por 4 cartelas que dan una gran rigidez al conjunto en el plano del anillo y que permiten el anclaje del mismo al eje deslizante que marca la posición sin interferir con ninguno de los sensores. La sección transversal en U de la banda del anillo presenta dos ventajas importantes. La primera es que da una enorme rigidez al anillo en el plano perpendicular. La segunda es que ofrece un *"ancho virtual"* que se añade al ancho real del anillo para la proyección de sombra sin afectar a la fracción de cielo oculta por este elemento. Así el ancho virtual del anillo sería:

$$W'_a = W_a + |s_U \tan \delta_s|, \tag{6.21}$$

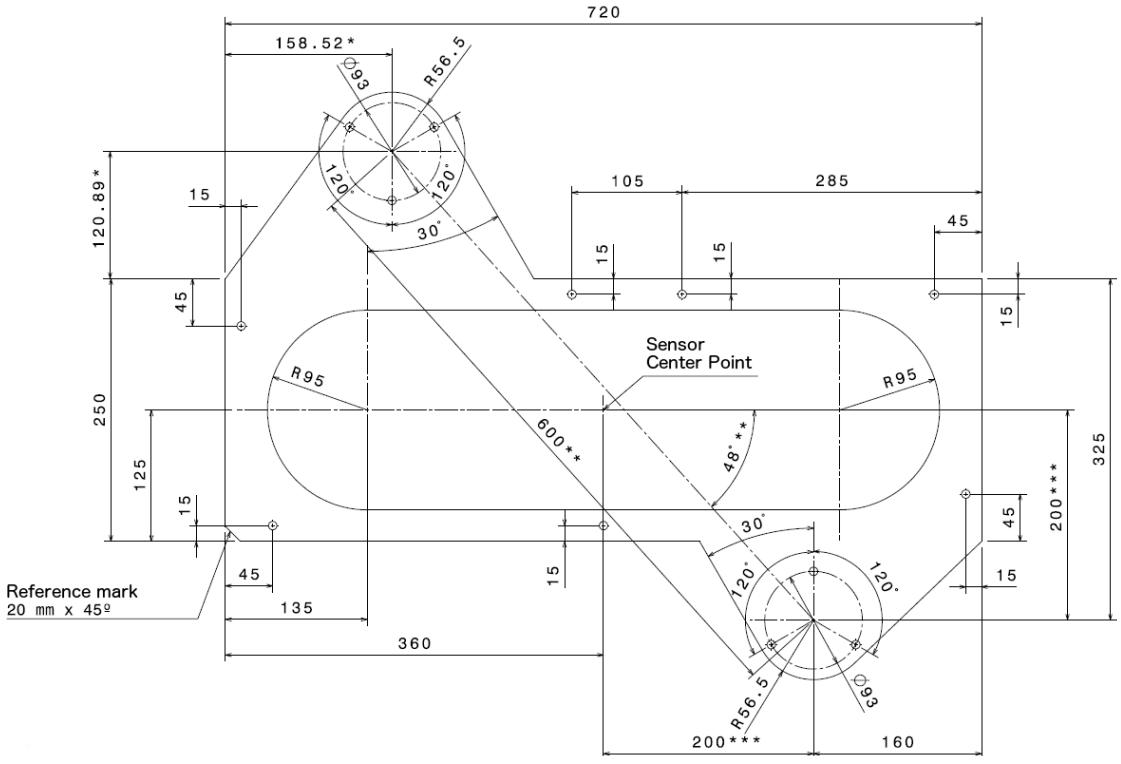
siendo s_U la longitud del ala del perfil.

La estructura abierta permite una óptima circulación de corriente por los sensores y minimizar su respuesta a la temperatura. El conjunto del anillo, barras soporte y eje deslizante están pintados en negro mate para evitar brillos y reflejos sobre los sensores. El resto de elementos (estructura y placas laterales) están pintados en blanco mate para minimizar las expansiones térmicas. La figura 6.16 muestra varias representaciones del equipo realizados por ordenador.

Las señales de los sensores se transmiten mediante 4 cables en el lateral Noreste del dispositivo hacia el cuadro donde se encuentra el datalogger encargado del almacenamiento



(a) Placa en cara Este.



(b) Placa en cara Oeste.

Figura 6.15: Placas laterales del prototipo MK6.

de las medidas.

6.5. Sensibilidad geométrica

Variaciones en determinadas magnitudes de la geometría del sistema pueden desvirtuar su funcionamiento y provocar errores de posicionamiento del anillo. Es muy importante tenerlas en cuenta adecuadamente, pues cualquier desalineación del anillo respecto de la posición correcta puede alterar los periodos de regulación de la posición del anillo (ver sección 6.6) o, lo que es peor, invalidar medidas tomadas por la incidencia de irradiancia directa sobre el sensor. Estas variaciones pueden darse en dos planos: el plano meridional, que genera una sección transversal del dispositivo por los sensores Norte y Sur, y el plano ecuatorial, paralelo al del propio anillo lobular.

6.5.1. Variaciones en el plano meridional del dispositivo

La figura 6.17 muestra de forma esquemática la superposición de la geometría con las magnitudes teóricas y la geometría real con posibles desviaciones (con apóstrofe). Así en el triángulo ijk de la figura 6.17:

$$j = a_z - a'_y \tan\theta'_{zr}, \tag{6.22}$$

$$i = j \sin\theta'_{zr}, \tag{6.23}$$

$$k = j \cos\theta'_{zr}, \tag{6.24}$$

con lo que el radio real del lóbulo del anillo relativo al sensor posicionado en O sería:

$$R'_a = R_a - k = R_a - j\cos\theta'_{zr} = R_a - a_z\cos\theta'_{zr} - a'_y \sin\theta'_{zr}. \tag{6.25}$$

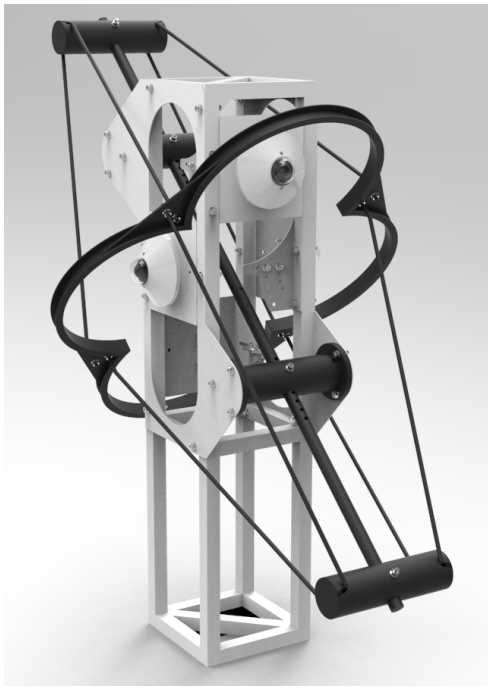
El ángulo de declinación real del borde del anillo, δ'_r queda entonces como:

$$\delta'_r = \delta_r + (\theta_{zr} - \theta'_{zr}). \tag{6.26}$$

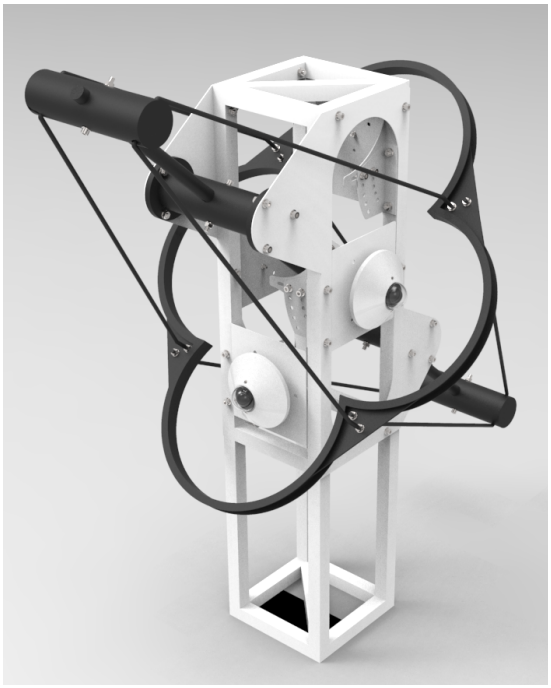
En base a la demostración anterior, la posición corregida del anillo, l'_a, se define según:

$$l'_a = \sqrt{(a_z - j)^2 + a'^2_y} + i + R'_a \tan\delta'_r, \tag{6.27}$$

para garantizar que el anillo bloquea la irradiancia directa sobre el punto O.



(a) Perspectiva frontal.



(b) Perspectiva posterior.



(c) Detalle de un lóbulo.

Figura 6.16: Diferentes perspectivas del prototipo MK6.

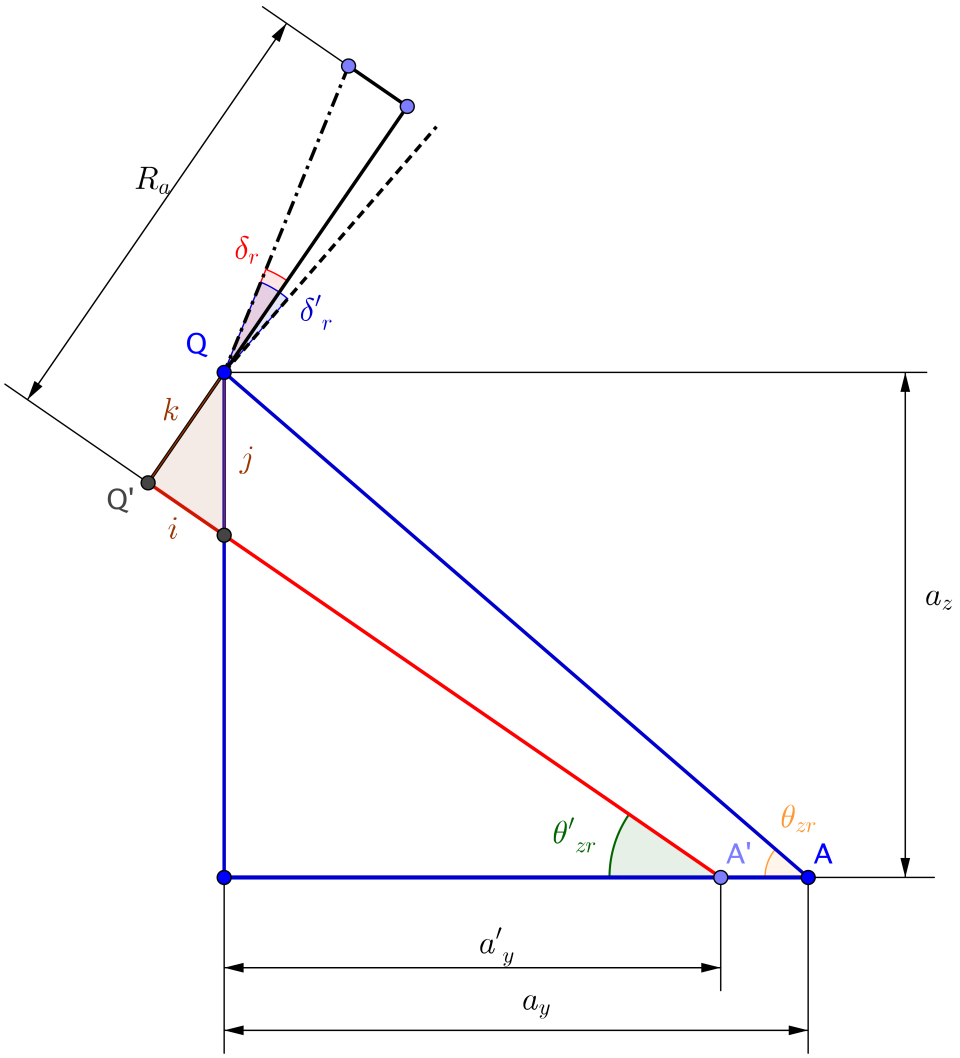


Figura 6.17: Representación esquemática de relaciones geométricas.

6.5.2. Variaciones en el plano ecuatorial del dispositivo

El desplazamiento del centro del lóbulo de la posición teórica, Q_t, a otra posición, Q_r, genera una excentricidad aparente, ε_{0r} igual a:

$$\varepsilon_{0r} = \frac{a}{b} = \sqrt{\frac{R_a + k}{R_a - k}}, \tag{6.28}$$

siendo k la distancia:

$$k = a_z - a'_y \tan\theta'_{zr}, \tag{6.29}$$

y las magnitudes a y b definidas por:

$$a = \sqrt{R_a^2 - k^2}, \tag{6.30}$$

$$b = R_a - k. \tag{6.31}$$

6.6. Posicionamiento del anillo

La correcta posición del anillo es un aspecto crítico del dispositivo descrito. Afortunadamente, la configuración bajo la cual ha sido diseñado, le otorga la flexibilidad para ser operado tanto manual como automáticamente de forma sencilla. Al estar el anillo posicionado mediante un único eje, al contrario que muchos de los dispositivos comerciales existentes que precisan de al menos dos ejes, un sólo operario en una única maniobra puede realizar el cambio de posición del anillo en función de la declinación solar. Simplemente tendría que desanclar los dos pernos de sujección, deslizar el conjunto del anillo a la nueva posición contigua a la anterior y, finalmente, volver a colocar los pernos para fijar el conjunto. Un sistema automático podría ser un actuador lineal anclado a la estructura soporte en un extremo y en el otro al eje deslizante, aprovechando por ejemplo, alguna de las perforaciones del mismo. Sin necesidad entonces de los pasadores de sujección, dicho actuador podría regular mediante el sistema de control adecuado, la posición relativa del anillo y los sensores de la estructura.

En el primer prototipo construido, el dispositivo MK6, se ha optado por comenzar por un sistema manual. La cuestión reside en configurar un calendario de cambios adecuado para que el anillo adopte la posición idónea cada día del año.

Tomando como referencia la figura 6.17, donde se muestra un esquema de las distancias entre los elementos de referencia para el posicionamiento del anillo, si las distancias a_y y a_z toman sus valores óptimos, la longitud de posicionamiento del anillo medida entre el

punto de referencia de éste (centro Q) y el punto de referencia de la placa de anclaje en la estructura (punto A) debe ser:

$$l_a = \sqrt{a_y^2 + a_z^2} + \left(R_a - \frac{s_U}{2}\right) \tan \delta_s. \tag{6.32}$$

Sin embargo, tal y como hemos visto en la sección 6.5, es muy probable que existan diferencias entre las magnitudes teóricas proyectadas y las físicas reales. Estas diferencias se pueden dar principalmente en las distancias a_y, a_z y el ángulo de inclinación θ_{zr}. Así, para una longitud $a'_y \neq a_y$, la distancia a'_z es:

$$a'_z = a'_y \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta'_{zr}\right), \tag{6.33}$$

siendo θ'_{zr} el ángulo de inclinación real del anillo. El radio efectivo del anillo, R'_a, observado por el sensor O_i sería:

$$R'_a = R_a + (a_z + a'_z) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta'_{zr}\right), \tag{6.34}$$

y el ángulo de declinación aparente, δ'_s es:

$$\delta'_s = \delta_s + (\theta_{zr} - \theta'_{zr}). \tag{6.35}$$

Queda entonces la longitud óptima de posicionamiento del anillo, teniendo en cuenta las posibles variaciones, definida como:

$$l'_a = \sqrt{a'^2_y + a'^2_z} - (a_z + a'_z) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta'_{zr}\right) + \left(R'_a - \frac{s_U}{2}\right) \tan \delta'_s. \tag{6.36}$$

Se define por *"juego"* o *"margen"* al rango de longitudes de l'_a que pueden satisfacer adecuadamente las condiciones de sombreamiento. Este rango puede traducirse en días del año o fechas, y marcará los periodos en los que el anillo debe situarse en una determinada posición. Además, se denomina *"solape"* o *"intercalado"* a aquel rango de longitudes de l'_a que verifica las condiciones de sombreamiento para dos posiciones consecutivas. Este periodo determinará los intervalos de fechas hábiles para realizar el cambio de posición del anillo sin pérdida de datos.

El juego se determina según:

$$g'_a = W'_a - \frac{2\cos(|\theta_{zp} - \theta'_{zr}| - \delta_s)}{\cos \delta_s} R_p, \tag{6.37}$$

y por lo tanto, el intervalo $[l'^{min}_{a,i}, l'^{max}_{a,i}]$ que define la mínima y la máxima longitudes hábiles para la posición i-ésima, se determina a partir de:

$$l'^{min}_{a,i} = l'_a - \frac{g'_a}{2}, \tag{6.38}$$

y

$$l'^{max}_{a,i} = l'_a + \frac{g'_a}{2}. \tag{6.39}$$

Los solapes se pueden calcular como:

$$s'_{a,i} = l'^{max}_{a,i-1} - l'^{min}_{a,i}, \tag{6.40}$$

siendo $s'_{a,i}$ el solape en la transición de la posición $i-1$ a la posición i. Esta magnitud siempre ha de ser positiva o nula (sólo es posible realizar el cambio de posición en una fecha determinada), pues en caso contrario significaría que las posiciones $i-1$ e i están demasiado separadas entre sí y habría días en los que el anillo no podría alinearse correctamente para sombrear la superficie sensora.

Para garantizar que no se produce en ningún momento la incidencia de irradiancia directa sobre los sensores, el intevalo del solape s'_a se restringe mediante unos coeficientes de seguridad. El intervalo de fechas en los que es posible realizar el cambio de posición i-ésima queda definido como $s'^{s}_{a,i} = [N_{1,s,i}, N_{2,s,i}]$, siendo N el día del año correspondiente. Ambos límites del intervalo se calculan mediante:

$$N^s_{1,i} = N_{1,i} + \text{máx}\left(\frac{N_2 - N_1 - n}{2}, \frac{N_2 - N_1}{8}\right), \tag{6.41}$$

y

$$N^s_{2,i} = N_{2,i} - \text{máx}\left(\frac{N_2 - N_1 - n}{2}, \frac{N_2 - N_1}{8}\right). \tag{6.42}$$

La figura 6.18 muestra un esquema entre las distintas variables estudiadas.

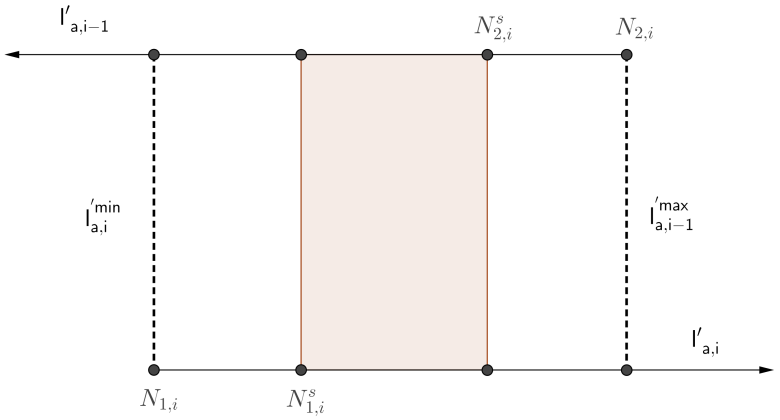


Figura 6.18: Esquema del juego entre dos posiciones.

En el prototipo MK6 construido, para su accionamiento manual se han diseñado 8 posiciones situadas a unas distancias $l'_a = [0.21, 0.23, 0.25, 0.27, 0.29, 0.31, 0.33, 0.35]$ m, en base a las cuales se ha elaborado el calendario de cambios que figura en la tabla 6.2. En dicha tabla, se indica la primera (subíndice 1) y última (subíndice 2) fechas posibles del cambio y las horas límite para realizarlo, que son las de salida del Sol para ese día. Así mismo, la figura 6.19(a) muestra, para cada día del año N la longitud óptima para el posicionamiento del anillo, mientras que la figura 6.19(b) muestra los juegos existentes en cada momento. Nótese que siempre el juego debe ser mayor o igual que la distancia entre posiciones, tal y como se verifica en la última figura.

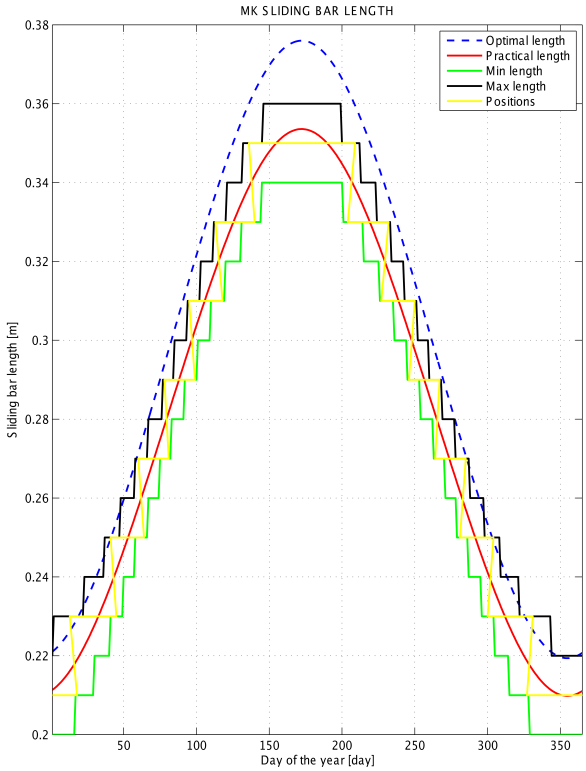
Tabla 6.2: Calendario de cambios de posición MK6 para el año 2015.

Cambio	**Long. [m]**	$\mathbf{N_1}$	**Fecha 1**	**Hora 1**	$\mathbf{N_2}$	**Fecha 2**	**Hora 2**
01-02	0.21-0.23	16	16/01/15	00:00	20	20/01/15	00:00
02-03	0.23-0.25	42	11/02/15	00:00	44	13/02/15	00:00
03-04	0.25-0.27	61	02/03/15	00:00	63	04/03/15	00:00
04-05	0.27-0.29	80	21/03/15	00:00	80	21/03/15	00:00
05-06	0.29-0.31	97	07/04/15	00:00	97	07/04/15	00:00
06-07	0.31-0.33	115	25/04/15	00:00	115	25/04/15	00:00
07-08	0.33-0.35	137	17/05/15	00:00	139	19/05/15	00:00
08b-07b	0.35-0.33	206	25/07/15	00:00	208	27/07/15	00:00
07b-06b	0.33-0.31	229	17/08/15	00:00	229	17/08/15	00:00
06b-05b	0.31-0.29	248	05/09/15	00:00	248	05/09/15	00:00
05b-04b	0.29-0.27	266	23/09/15	00:00	266	23/09/15	00:00
04b-03b	0.27-0.25	282	09/10/15	00:00	284	11/10/15	00:00
03b-02b	0.25-0.23	301	28/10/15	00:00	303	30/10/15	00:00
02b-01b	0.23-0.21	324	20/11/15	00:00	328	24/11/15	00:00

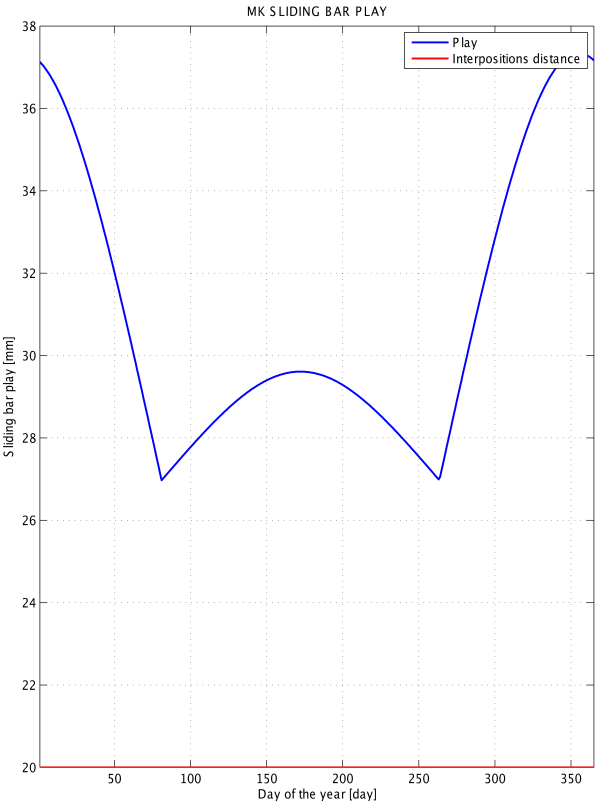
6.7. Software de simulación y optimización del diseño

Para evaluar antes de la construcción del prototipo el funcionamiento del mismo, se ha programado una aplicación en lenguaje MATLAB, dotada de interfaz gráfica o GUI[2], para optimizar el diseño y evaluar su correcto funcionamiento en cualquier escenario. El

[2] *"Guided User Interface"*.



(a) Posiciones del anillo de sombra.



(b) Juegos reales.

Figura 6.19: Posicionamiento del anillo de sombra.

menú principal de la aplicación diseñada se muestra en las figuras 6.20 y 6.21, donde se puede observar que consta de (descritas de arriba a abajo y de izquierda a derecha) dos representaciones gráficas, un conjunto de deslizadores, un panel de botones y una serie de campos para introducir/mostrar valores.

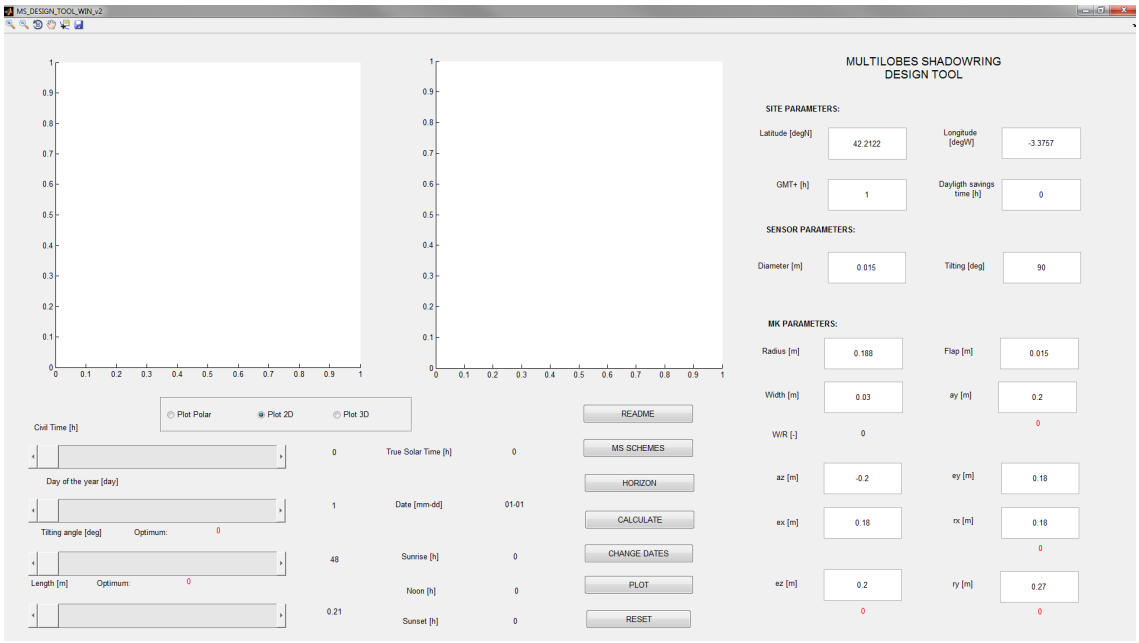


Figura 6.20: Menú principal de la herramienta de diseño y simulación del equipo MK6.

Como se indicaba, en la parte derecha de la interfaz gráfica, se dispone de una serie de 16 campos que el usuario puede rellenar con los valores de los parámetros del dispositivo (véase con más detalle en la figura 6.22). Éstos se agrupan en tres conjuntos:

- **Parámetros de la ubicación:** son aquellos que definen el emplazamiento del dispositivo y su referencia horaria: latitud y longitud geográficas, huso y adelanto horarios.
- **Parámetros del sensor:** diámetro e inclinación de la superficie sensora respecto del plano horizontal.
- **Parámetros del dispositivo MK:** Características de los distintos elementos constructivos del dispositivo: radio, ancho y longitud de las aletas del anillo, distancias a_y y a_z del punto de referencia A u origen del posicionamiento del anillo, distancias e_x, e_y y e_z entre sensores, y distancias r_x y r_y correspondientes a las distancias de los centros de los lóbulos del anillo respecto al centro o punto de referencia del mismo.

Debajo de determinados campos se muestra un valor numérico en rojo. Dicho valor corresponde con el parámetro optimizado según el resto de características del equipo. Hay que

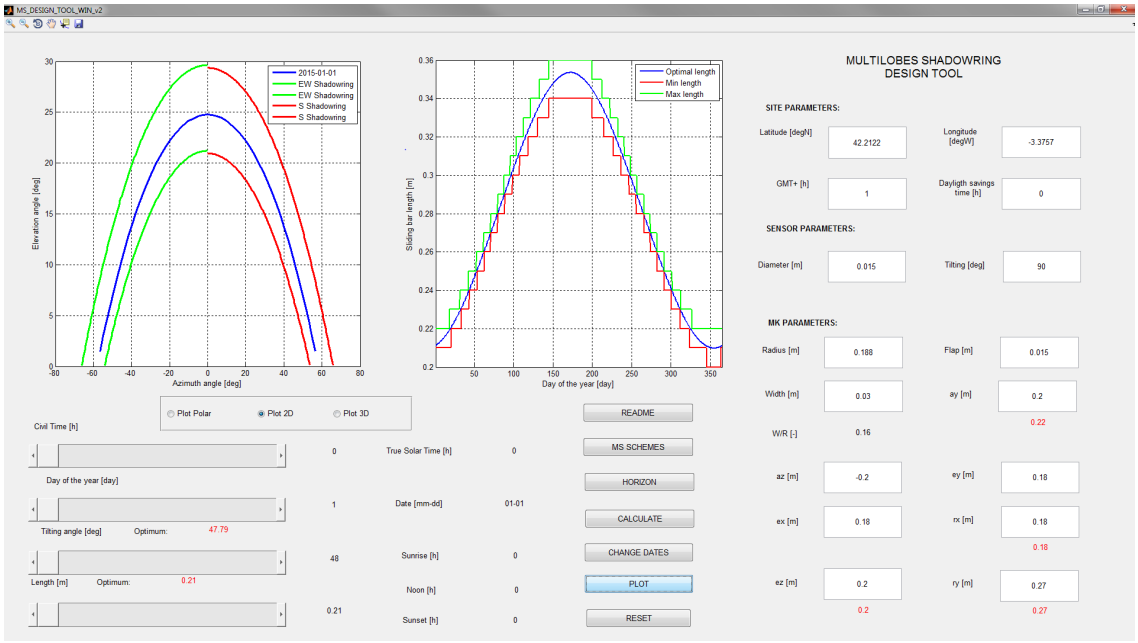


Figura 6.21: Ejemplo de simulación de una configuración.

tener en cuenta que, en ocasiones, el valor optimizado no puede alcanzarse por la precisión decimal y las tolerancias de fabricación. De ahí que, normalmente, el valor optimizado y el correspondiente al elemento construido, no coincidan exactamente.

En la parte central de la interfaz se incluyen siete botones cuyas funciones son:

Readme: abre un fichero *.pdf[3] con las instrucciones e indicaciones de ayuda para el correcto manejo del programa.

MK Schemes: abre un fichero *.pdf con los distintos esquemas del dispositivo MK para que el usuario sepa a qué magnitudes hacen referencia los títulos de los campos (véase la figura 6.23).

Horizon: permite cargar un perfil del horizonte, mediante una serie ordenada de coordenadas compuestas del ángulo acimutal y el ángulo de elevación.

Calculate: realiza todos los cálculos referentes a la configuración optimizada del dispositivo, cambios de posición del anillo a lo largo del año y simulación.

Change dates: exporta en un fichero de texto plano las fechas exactas de los cambios de posición del anillo de sombra, mostrados gráficamente en la ventana gráfica 2.

[3] *"Portable Document File"*.

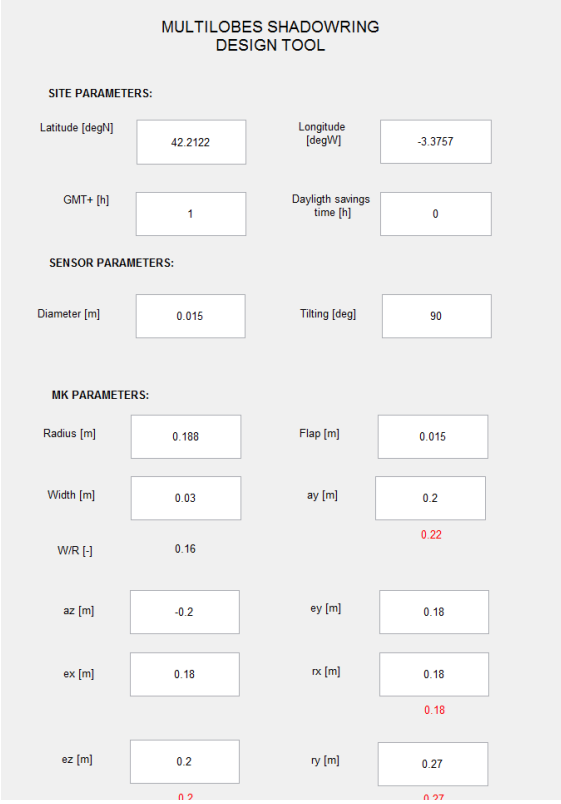


Figura 6.22: Definición de parámetros de configuración del equipo MK6.

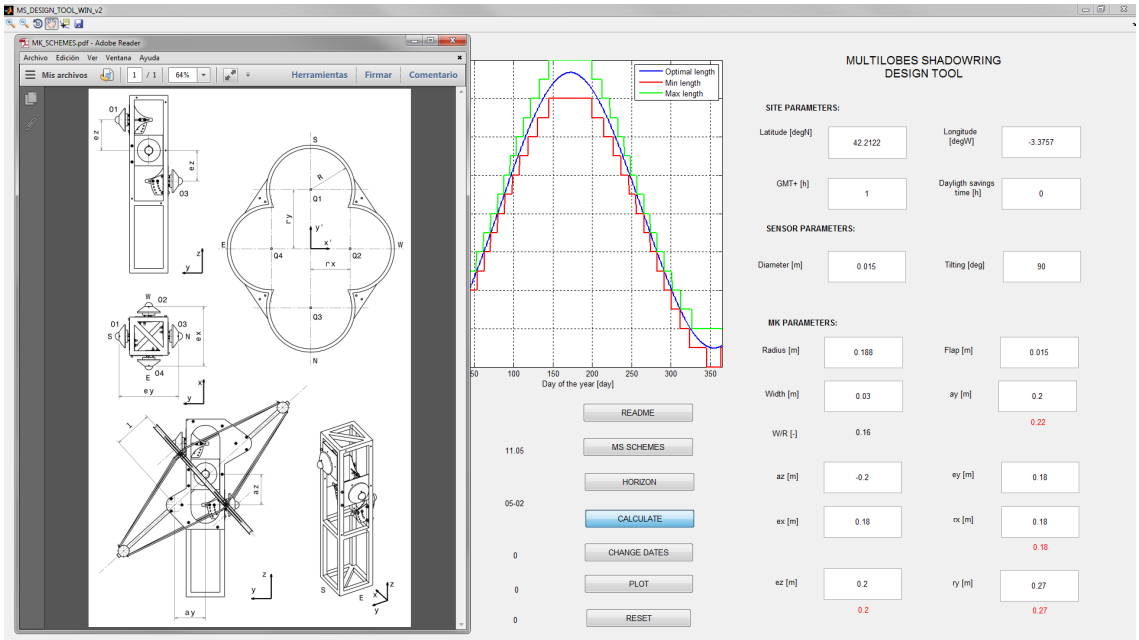


Figura 6.23: Ventana de ayuda y relación de esquemas.

Plot: simula en la ventana gráfica 1, según el tipo de gráfico seleccionado en ésta (gráfico polar, gráfico cartesiano 2D o gráfico cartesiano 3D), la configuración implementada.

Reset: borra las ventanas gráficas y resetea los campos a sus valores por defecto.

A la izquierda de la botonera descrita, se pueden encontrar cuatro deslizadores que corresponden a:

- **Hora civil:** permite marcar la hora civil en formato hora decimal. A la derecha del deslizador se muestra el resultado de su transformación a tiempo solar verdadero (TSV).
- **Día del año:** permite seleccionar el día del año en un intervalo $[1, 365]$. A su derecha se muestra el valor de la fecha correspondiente a dicho día del año N en formato mes-día.
- **Ángulo de inclinación:** fija el ángulo de inclinación del anillo lobular en grados. A la derecha del título del deslizador se muestra su valor óptimo en rojo.
- **Longitud:** determina la posición del anillo de sombra en metros. Al igual que para el ángulo de inclinación, a la derecha del título se muestra el valor óptimo que debería adoptar.

Debajo del valor de la fecha y entre los deslizadores y la botonera, se incluyen tres campos adicionales que calculan la hora civil del amanecer, del mediodía solar y del ocaso.

Finalmente, en la parte superior izquierda del menú, hay dos ventanas gráficas. La primera, denominada *"ventana gráfica 1"* muestra la simulación que se seleccione. Se puede elegir entre una representación en un diagrama polar (véase la figura 6.24(a)), un diagrama cartesiano 2D (véase la figura 6.24(b)), o una representación 3D (véase las figuras 6.24(c) y 6.24(d)). En estas representaciones se incluye tanto la zona cubierta por el anillo de sombra, como la trayectoria del Sol en el día de simulación y su posición exacta en función de la hora civil seleccionada. En la representación 3D se incluyen así mismo las visuales entre la posición del Sol y cada uno de los sensores del equipo, identificados mediante marcas azules.

Nótese que en las formas de representación planas (diagrama polar y diagrama cartesiano 2D) se repesentan los límites superior e inferior de los cuatro lóbulos del anillo. Si el diseño de éste es correcto, las curvas de diferentes colores (rojo para el lóbulo Sur, verde para los lóbulos Este y Oeste y negro para el lóbulo Norte) permanecerán alineados. En caso contrario, dichas curvas presentarán saltos entre sí, lo que significa que su posicionamiento no está coordinado y su comportamiento relativo con su sensor correspondiente no es

equivalente. En azul, se ha representado la trayectoria aparente del Sol para el día simulado, por lo que un posicionamiento adecuado del anillo será aquel que verifique que dicha trayectoria se encuentra entre ambos límites para cada lóbulo. En la representación 3D, se puede evaluar el correcto funcionamiento del dispositivo si las visuales a la trayectoria solar por cada sensor intersecta con la banda del anillo.

Cabe destacar que en cada representación gráfica se puede modificar el nivel de zoom (salvo en el diagrama polar) y la vista se puede desplazar y rotar (en el caso de la representación tridimensional).

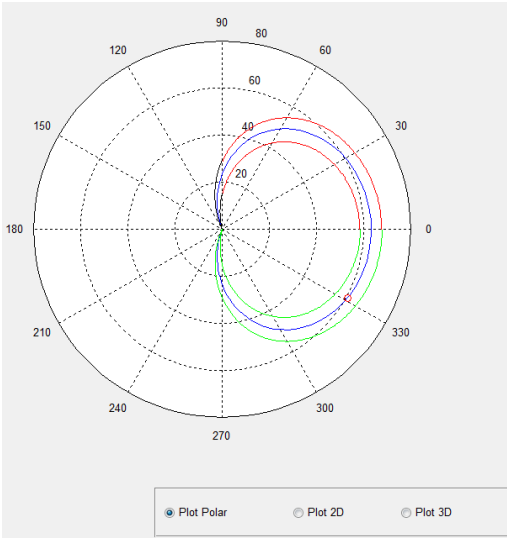
La segunda ventana gráfica, denominada *"ventana gráfica 2"*, muestra las posiciones que debería adoptar el anillo de sombra a lo largo del año, así como los límites máximo y mínimo de tolerancia, que dependen de las magnitudes de la sección del mismo (radio, ancho y longitud de las alas).

La utilidad del software es que permite realizar una simulación del comportamiento del dispositivo para distintas configuraciones geométricas y posición e inclinación del anillo de sombra. De esta forma se puede detectar si el anillo cumplirá con su cometido en cualquier momento, o analizar con detenimiento los momentos críticos, que suelen ser los de transición entre posiciones.

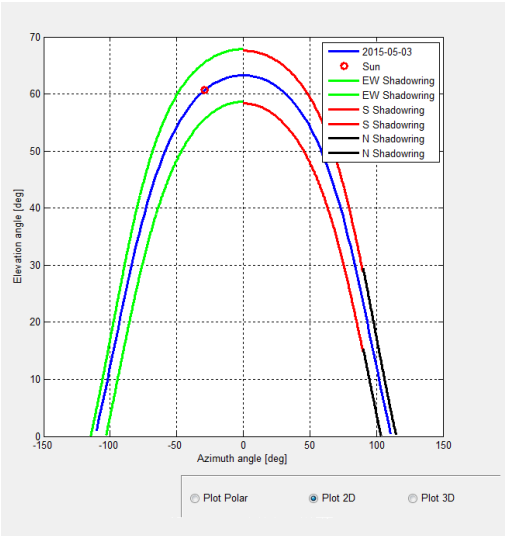
El programa se ha compilado de forma que puede funcionar llamándolo mediante la aplicación de MATLAB o puede funcionar independientemente de éste, tras el proceso de instalación de la aplicación independiente. Este ejecutable únicamente funciona bajo el sistema operativo Windows de Microsoft.

6.8. Dispositivos auxiliares

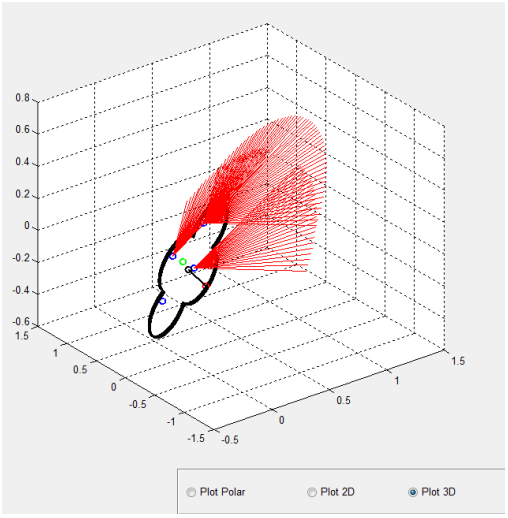
Puede complementarse el equipo MK6 con dispositivos auxiliares como escudos contra irradiancia reflejada, que como su propio nombre indica, evitan que la irradiancia reflejada o de albedo alcance los sensores. Igualmente, si se invierte la posición de éstos, pueden bloquear la irradiancia difusa procedente de la atmósfera, con el fin de medir únicamente la irradiancia reflejada del entorno de la estación. Estos elementos son opcionales en el sentido de que, en ocasiones nos puede interesar realizar la medida con o sin ellos. Además, en lugar de diseñar un único escudo que cubra todos los sensores simultáneamente, se ha decidido diseñarlo de forma individual para cada sensor, para aumentar así la modularidad y flexibilidad del sistema. La figura 6.25 muestra en detalle esta pieza, realizada en chapa plegada de acero galvanizado y con recubrimiento interior de pintura negra mate y exterior de pintura blanca mate, y su montaje en el equipo. Ésta se atornillaría aprovechando los orificios de anclaje a la estructura soporte de los soportes de anclaje de los piranómetros.



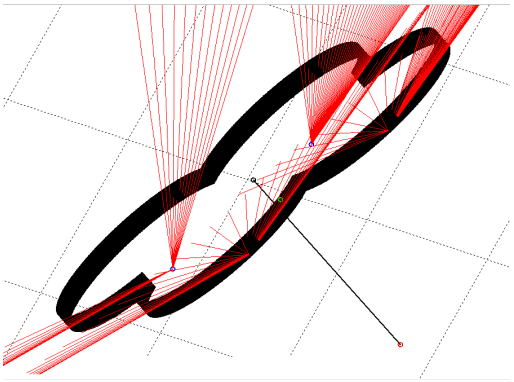
(a) Simulación en diagrama polar.



(b) Simulación en diagrama cartesiano 2D.



(c) Simulación en diagrama cartesiano 3D.

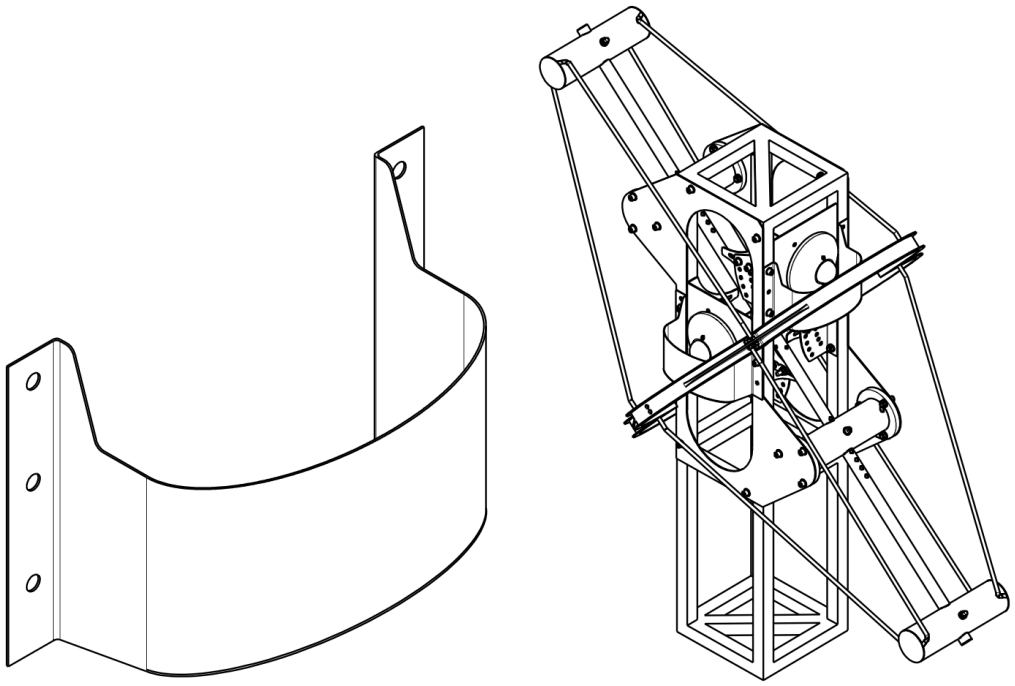


(d) Detalle de simulación 3D.

Figura 6.24: Opciones de visualización de la simulación del comportamiento del anillo.

Su parte inferior se encuentra perforada para la evacuación del agua de lluvia y mejorar la refrigeración del sensor.

Nótese que el escudo es fijo e independiente del ángulo de inclinación del sensor.



(a) Escudo contra irradiancia reflejada. (b) Equipo MK6 con escudos instalados.

Figura 6.25: Escudo contra irradiancia reflejada para el equipo MK6.

También sería posible instalar colimadores de cavidad en las placas soporte de los piranómetros para limitar el campo de visión de éstos y tomar medidas de regiones específicas del campo de visión de los sensores.

6.9. Calibración y mantenimiento

El equipo MK diseñado no requiere más tareas de calibración que las específicas de los sensores de medida, para lo cual se ha indicado el procedimiento en la sección B.6. No obstante, se recomienda realizar comprobaciones de posicionamiento y perpendicularidad respecto del eje longitudinal del anillo. Para realizar dicha comprobación se han fijado en la figura 6.26 una serie de medidas de referencia. El conjunto de las cuatro medidas propuestas (nótese que un par de medidas están referidas al exterior del anillo y otro par al interior) garantizan el correcto posicionamiento y perpendicularidad respecto del eje

longitudinal de accionamiento. La tolerancia máxima admitida es del 0.1 %.

Respecto a las labores de mantenimiento precisadas por el equipo únicamente destaca la vigilancia de la correcta movilidad de los componentes móviles: eje longitudinal del anillo y soportes de los piranómetros. Para ello deberá evitarse la corrosión de los mismos y engrasarse los puntos de fricción. También debe verificarse periódicamente que las conexiones eléctricas se encuentran en buen estado y que se realizan las labores de mantenimiento en los sensores: limpieza de los domos o cúpulas, y la sustitución del desecante si fuera necesario. Estas labores las detallará específicamente cada fabricante.

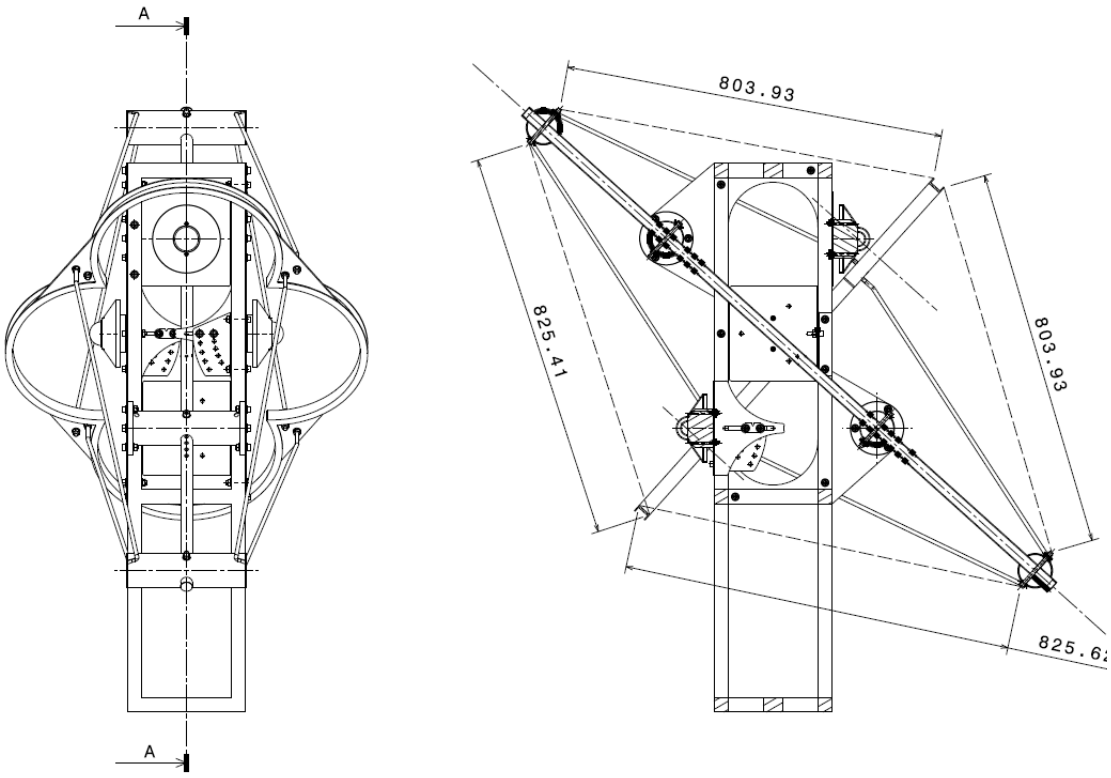


Figura 6.26: Medidas de referencia para la verificación de la posición del anillo.

Capítulo 7

Factor de corrección óptimo para el equipo MK6

7.1. Introducción

La tecnología aplicada en el dispositivo MK6 para la medida simultánea de irradiancia difusa sobre múltiples superficies con distintas orientaciones e inclinaciones, es la del anillo de sombra. El empleo de este elemento genera una distorsión en la propia medida realizada, ya que parte de la irradiancia difusa y reflejada incidente sobre el sensor es oculta por el mismo. Es preciso por ello corregir la medida tomada mediante un factor. En este capítulo se aplicarán los diferentes factores de corrección, isótropo o geométrico y anisótropos y totales, para escoger el modelo óptimo que produce la mejor corrección. Como valores de referencia de la irradiancia difusa que debería ser medida en el dispositivo se tomará el resultado del modelo de las tres componentes.

7.2. Procedimiento de cálculo y validación

Como valores de referencia de la irradiancia difusa medida[1] para la validación de cada modelo, se ha aplicado el modelo de composición de componentes de la irradiancia, que

[1] Al realizar las medidas sin protección contra irradiancia reflejada, la magnitud medida realmente es la suma de la irradiancia difusa y reflejada sobre el plano.

en este caso quedaría expresado como:

$$[D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p)]_{ref} = G(\theta_{zp}, \gamma_p) - B(\theta_{zp}, \gamma_p), \tag{7.1}$$

donde se observa que la irradiancia directa proyectada sobre un plano cualquiera puede determinarse mediante:

$$B(\theta_{zp}, \gamma_p) = \cos\theta_{sp} B(n), \tag{7.2}$$

siendo $B(n)$ la irradiancia directa medida directamente mediante el pirheliómetro de la estación experimental y $G(\theta_{zp}, \gamma_p)$ la irradiancia global en cada uno de los planos verticales estudiados.

El cálculo de la incertidumbre de la irradiancia difusa y reflejada calculada de forma indirecta mediante este modelo se expone en la sección 4.5.

Para el caso de modelos que precisan un entrenamiento previo para ajustar determinados coeficientes por regresión, el conjunto de datos se ha dividido en dos subconjuntos:

Conjunto de entrenamiento o regresión: para el ajuste de los coeficientes del modelo correspondiente.

Conjunto de prueba o validación: para evaluar el error cometido por el modelo.

El método de validación escogido es el de validación cruzada de k iteraciones o *"k-fold cross-validation"*, para garantizar la independencia de la partición entre datos de entrenamiento y prueba. Este método se describe con más detalle en la sección D.2.

Únicamente en aquellos modelos de corrección en los que no es preciso ajustar el valor de ningún parámetro, el conjunto de entrenamiento es nulo.

Finalmente, para determinar el ajuste de un modelo a las medidas tomadas de un sistema real que se consideran como *"verdaderas"*[2] se han analizado los estadísticos MBD, RMSD, R^2 y $\mu_{0.99}$ (véase el anexo D y el apartado 9.2.1).

7.3. Análisis de los modelos de corrección

En esta sección se muestran los resultados de aplicar los modelos de corrección a las medidas efectuadas. Así se muestra para cada modelo de corrección un diagrama de dispersión

[2]Se desea enfatizar que el valor real de una magnitud medida **nunca** se puede conocer. Cualquier valor medido sólo es una aproximación del valor verdadero, pues tiene asociado una incertidumbre.

con los puntos cuyas coordenadas son el valor de referencia u observado (x) y el valor corregido por el modelo (y) y un histograma que recoge la frecuencia de los índices tomados por el modelo. Además, para todos los modelos y casos, se ha realizado el análisis de los residuos generados entre los valores estimados por los modelos y los valores observados. Para su evaluación, se incluyen los histogramas de los residuos brutos y studentizados, diagramas de caja (*"box plots"*) de los mismos para observar sus distribuciones y un diagrama de dispersión de los residuos studentizados respecto a la variable estimada, en este caso, el valor corregido de irradiancia sobre el sensor. Cabe destacar que en ningún caso de análisis se ha superado el 5 % de datos rechazados por no respetar los límites de los residuos studentizados. Para evitar saturar al lector, y dado el caracter similar entre todos los casos evaluados, sólo se expone un caso para cada modelo, a modo de ejemplo.

7.3.1. Modelo de corrección geométrico o isótropo

Las figuras 7.1(a), 7.3(a), 7.4(a) y 7.5(a) muestran el ajuste entre la corrección geométrica propuesta para cada uno de los sensores del dispositivo MK6 respecto de los valores de referencia, para cada una de las orientaciones. En todos los casos se observa una elevada correlación lineal, baja diferencia de sesgo (MBD) y mínimas diferencias cuadráticas (RMSD). Dada la pendiente de la recta de ajuste, en todos los casos menor que la unidad, se observa una ligera tendencia a subestimar, lo cual es un resultado esperado pues esta corrección no tiene en cuenta los efectos de anisotropía de la región circunsolar, banda del horizonte o distribución irregular de la función gradiente.

Respecto a los histogramas que muestran las frecuencias absolutas de los valores tomados por los factores de corrección, en todos los casos éste es superior a la unidad, pues la banda de sombra, independientemente de la dirección, bloquea una parte de la irradiancia que debería percibir el sensor. Su valor indica siempre correcciones entre un 5 % y un 13 %, pero no se observa un ajuste a ninguna función de distribución en ningún caso. Para la orientación Norte (véase la figura 7.1(b)) destaca la alta frecuencia que tienen valores entre 1.00 y 1.01, dado que, en el periodo de estudio (casi un año completo) la trayectoria solar no cruza el cuadrante Norte de la bóveda celeste. Por contra, en la orientación Sur (véase la figura 7.3(b)), la corrección predominante es 1.20. Para el caso de las orientaciones Este y Oeste, como era de esperar, la distribución es más homogénea y muy similares entre ambas (véase las figuras 7.4(b) y 7.5(b)). Podría inferirse una distribución bimodal, con presencia de dos máximos en torno a 1.08 y 1.11.

La evaluación de los residuos en las cuatro orientaciones indican que se cumplen las condiciones de normalidad, homocedasticidad e independencia. Nótese que aunque en los residuos en bruto pueden detectarse varios valores atípicos, éstos en realidad no lo son al analizar los residuos estandarizados y studentizados. Estos últimos son prácticamente

idénticos entre sí dado el tamaño de las muestras.

7.3.2. Modelo de corrección Batlles A

Tal y como muestran las figuras 7.6(a), 7.8(a), 7.9(a) y 7.10(a), este modelo de corrección es muy preciso en prácticamente todos los casos, mejorando los resultados de los parámetros MBD, RMSD y recta de regresión respecto a la corrección geométrica. El peor ajuste se observa para la orientación Sur, donde el valor de RMSD es notablemente superior al del resto de orientaciones.

En todos los casos, el valor del coeficiente de corrección es superior a la unidad y para las orientaciones Norte, Este y Oeste parece ajustarse a una distribución β con máximo en 1.16 (véase las figuras 7.6(b), 7.8(b), 7.9(b) y 7.10(b)) y para la orientación Sur a una distribución Normal centrada en 1.10. La recta de regresión para las cuatro orientaciones presenta una pendiente superior a la unidad, lo que indica una tendencia a la sobre-estimación, siendo muy pronunciada en el caso de la orientación Sur. El valor de la ordenada en el origen de dicha recta es prácticamente despreciable para todas las orientaciones de nuevo, salvo para la orientación Sur.

El análisis de los residuos confirma que se cumplen las condiciones de normalidad, homocedasticidad e independencia de los datos analizados. El caso más destacable es la orientación Sur, donde los residuos ordinarios se alejan de la distribución normal y presentan un mayor número de valores aberrantes. No obstante, los residuos studentizados sí presentan una distribución próxima a la normal y se encuentran limitados entre los valores -2 y 2.

7.3.3. Modelo de corrección Batlles B

Los ajustes de los valores corregidos mediante el modelo Batlles B a los valores de referencia se muestran en las figuras 7.11(a), 7.13(a), 7.14(a) y 7.15(a). En base a los estadísticos de estudio utilizados, se comprueba que la bondad del ajuste en todos los casos es elevada. El valor máximo de RMSD en todos los casos es inferior a 4 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ y el valor del coeficiente de determinación R^2 es superior a 0.99. La recta de regresión entre los valores observados y los valores de referencia es muy próxima a la recta de pendiente unitaria y ordenada nula, lo que indica una idónea correlación con los estimadores del modelo. Al igual que el modelo Batlles A, se observa que el peor ajuste del modelo se produce en la orientación Sur, donde los efectos de anisotropía, si existen, son más evidentes. Las orientaciones Este y Oeste presentan un comportamiento muy similar y, el modelo apenas tiende a sobrestimar. Los errores sistemáticos apreciados por el valor de la ordenada en el origen de la recta de regresión son muy pequeños, y salvo la orientación Sur, no superan 1 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$.

Respecto a los valores del factor de corrección en sí propuestos, cuya distribución de frecuencias puede examinarse en las figuras 7.11(b), 7.13(b), 7.14(b) y 7.15(b). Nótese que en ocasiones éste toma valores inferiores a la unidad. No se trata de un error en la implementación del modelo, sino en la interpretación de éste de la función de gradiancia, dadas determinadas combinaciones de los índices de claridad y de brillo de Perez que este modelo emplea. Al igual que en el caso anterior, para las orientaciones Norte, Este y Oeste, la distribución de frecuencias del coeficiente de corrección propuesto parece ajustarse a una distribución β, con máximo en torno a 1.15, 1.18 y 1.16 respectivamente, mientras que para la orientación Sur, se aprecia un mejor ajuste a la distribución Normal, con media ≈ 1.1 y desviación típica ≈ 0.5.

El análisis de los residuos confirma de nuevo las condiciones de normalidad, homocedasticidad e independencia de todos los datos en las cuatro orientaciones.

7.3.4. Modelo de corrección LeBaron

El modelo de LeBaron es evaluado en su conjunto para cada orientación en las figuras 7.16(a), 7.18(a), 7.19(a) y 7.20(a) respectivamente. El análisis de los parámetros de ajuste: MBD, RMSD, R^2 y pendiente y ordenada en el origen de la recta de regresión indican un excelente comportamiento en todos los casos de análisis. El valor de la correlación lineal en todas las orientaciones es siempre superior a 0.99 y el valor máximo de RMSD es 2.25 (orientación Sur). El valor de la pendiente de la recta de regresión entre los valores corregidos por el modelo y los valores de referencia indican que es un modelo que tiende a subestimar muy ligeramente en todas las orientaciones salvo la orientación Sur.

Dado que el factor de corrección calculado mediante este procedimiento se basa en el rango en el que se sitúen 4 estimadores diferentes, es muy difícil apreciar el ajuste a una distribución estadística de los valores de los coeficientes de corrección. Así, para las orientaciones Norte y Sur (véase las figuras 7.16(b) y 7.18(b)) la inmensa mayoría de las correcciones propuestas corresponden a un valor 1.15, para las orientaciones Este y Oeste (véase las figuras 7.19(b) y 7.20(b)) se aproximan a 1.20. Obsérvese que para la orientación Sur, en ocasiones también se proponen factores de corrección inferiores a la unidad.

7.3.5. Modelo de corrección Muneer & Zhang

La principal ventaja de este modelo reside en que, debido a su planteamiento semi-teórico, no precisa el cálculo de coeficientes. De ahí que la bondad de su ajuste a los valores observados (véase las figuras 7.21(a), 7.23(a), 7.24(a) y 7.25(a)) sea muy similar a la corrección geométrica, pero con notables mejoras. Así, se observa que el coeficiente de

correlación R^2 es muy próximo a la unidad en las cuatro orientaciones, aunque los valores de RMSD son normalmente superiores a los esperados por el resto de los modelos. Sin embargo, presenta muy buenos resultados para la orientación Sur en comparación con éstos. El valor de la pendiente de la recta de regresión es siempre inferior a la unidad, por lo que es un modelo que tiende a subestimar.

En ciertas ocasiones, para todas las orientaciones, el modelo propone factores de corrección inferiores a la unidad, pero siempre muy próximos a ésta. Tampoco se observa en las figuras 7.21(b), 7.23(b), 7.24(b) y 7.25(b) ninguna tendencia a una distribución estadística conocida de las frecuencias de los valores de los coeficientes de corrección adoptados por el modelo.

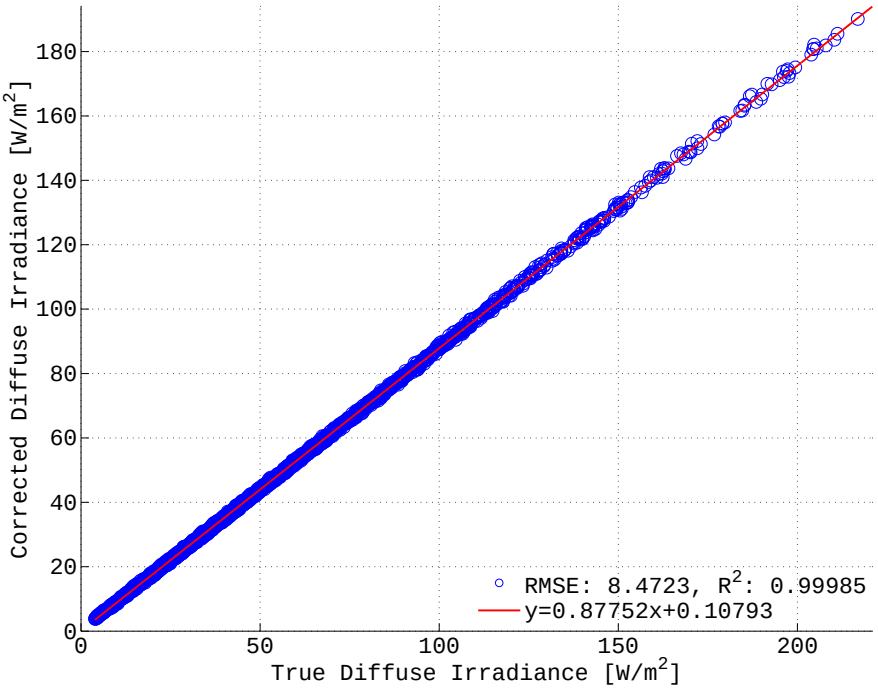
Claramente se cumplen las condiciones de normalidad, homocedasticidad e independencia de los datos evaluados en las distintas direcciones, y los residuos studentizados presentan una distribución próxima a la normal y se encuentran limitados entre los valores -2 y 2.

7.3.6. Modelo de corrección Steven

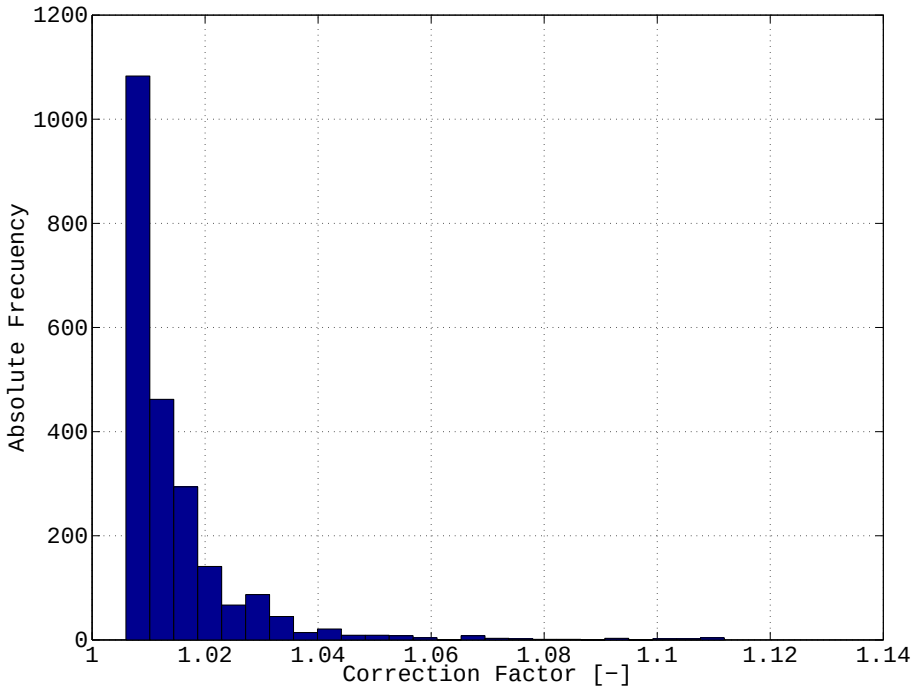
Los ajustes de los valores corregidos mediante el modelo Steven a los valores de referencia se muestran en las figuras 7.26(a), 7.28(a), 7.29(a) y 7.30(a). En base a los estadísticos de estudio utilizados, se comprueba que la bondad del ajuste en todos los casos es elevada, salvo para la orientación Sur, donde se puede encontrar el valor máximo de RMSD ligeramente superior a 14 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$. La recta de regresión entre los valores observados y los valores de referencia es muy próxima a la recta de pendiente unitaria y ordenada nula, lo que indica una idónea correlación con los estimadores del modelo. La complejidad en el ajuste de los parámetros empíricos del modelo da lugar a la existencia de varias tendencias en los diagramas de dispersión. Las orientaciones Este y Oeste presentan un comportamiento muy similar y, el modelo apenas tiende a subestimar. Los errores sistemáticos apreciados por el valor de la ordenada en el origen de la recta de regresión son muy pequeños y no superan 3 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$.

Respecto a los valores del factor de corrección en sí propuestos, cuya distribución de frecuencias puede examinarse en las figuras 7.26(b), 7.28(b), 7.29(b) y 7.30(b). Nótese, que para la orientación Sur éste toma valores inferiores a la unidad. No es posible detectar ningún ajuste evidente a una función de distribución conocida para los factores de corrección propuestos por el modelo en ninguna orientación. Para la orientación Norte, propone la mayor parte de las veces la unidad, mientras que para las orientaciones Sur, Este y Oeste, la moda se sitúa en 0.8, 1.23 y 1.13 respectivamente.

El análisis de los residuos confirma de nuevo las condiciones de normalidad, homocedasticidad e independencia de todos los datos en las cuatro orientaciones.



(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.



(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.1: Valores con corrección geométrica para el sensor Norte.

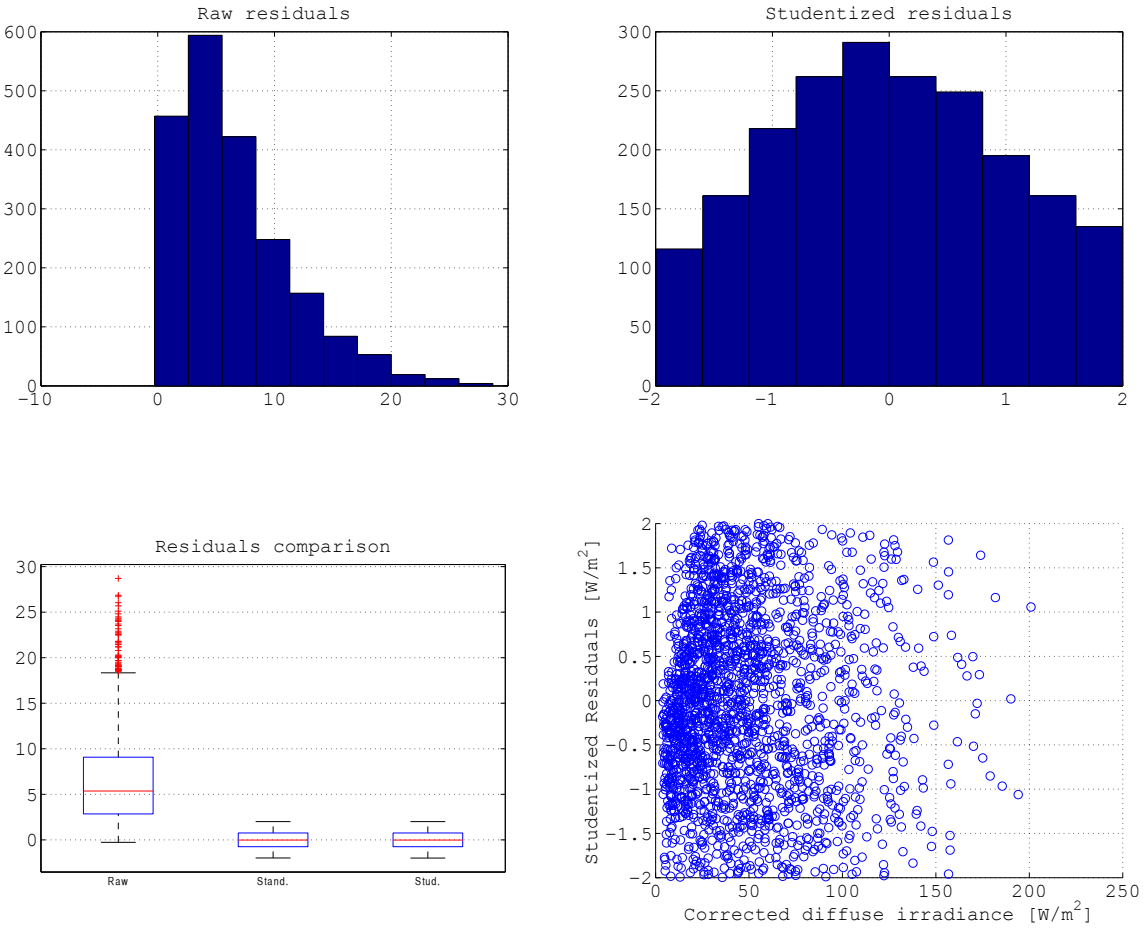
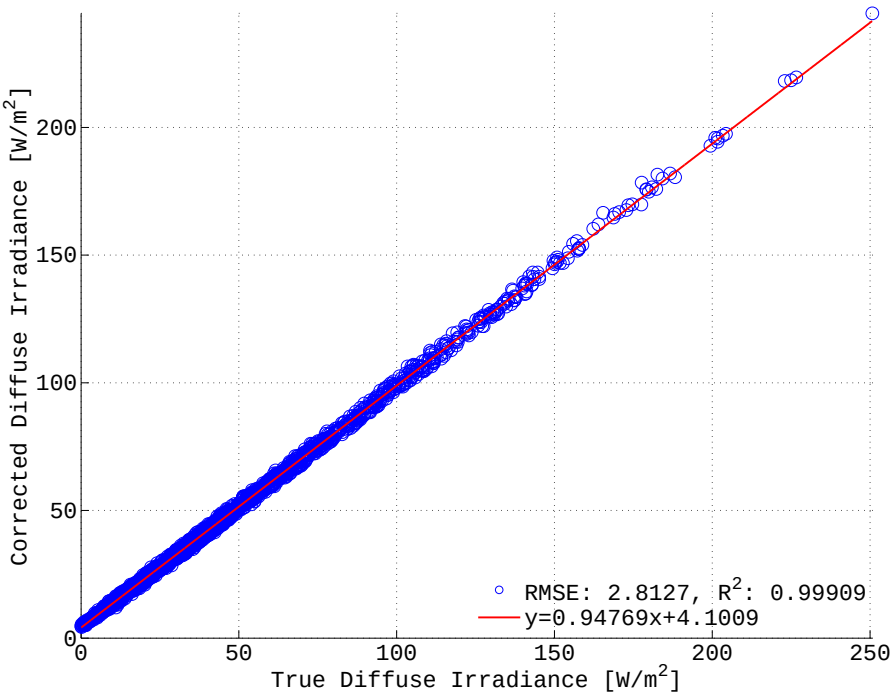
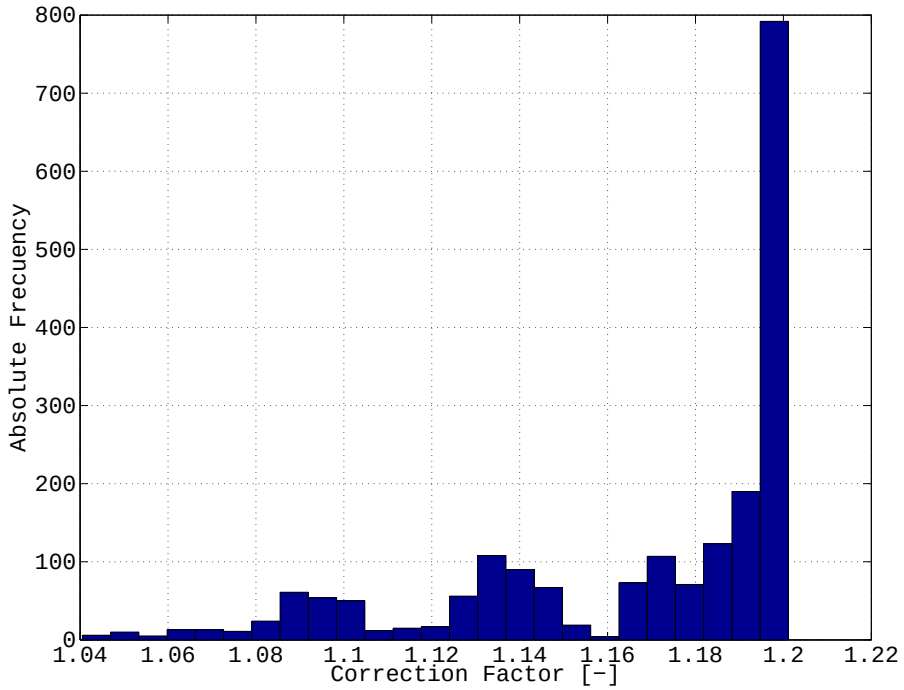


Figura 7.2: Estudio de los residuos de la corrección geométrica para el sensor Norte.

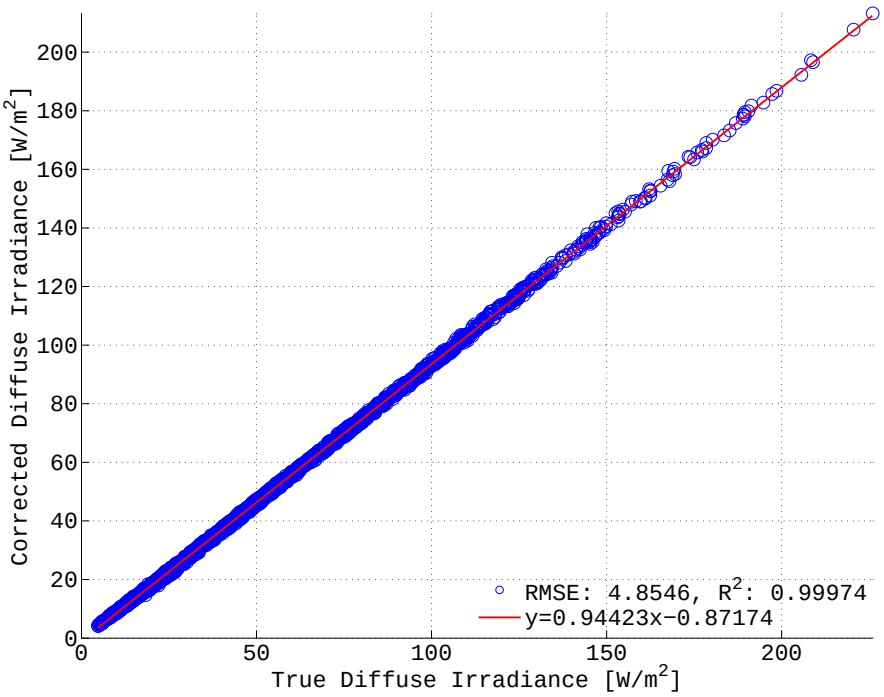


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

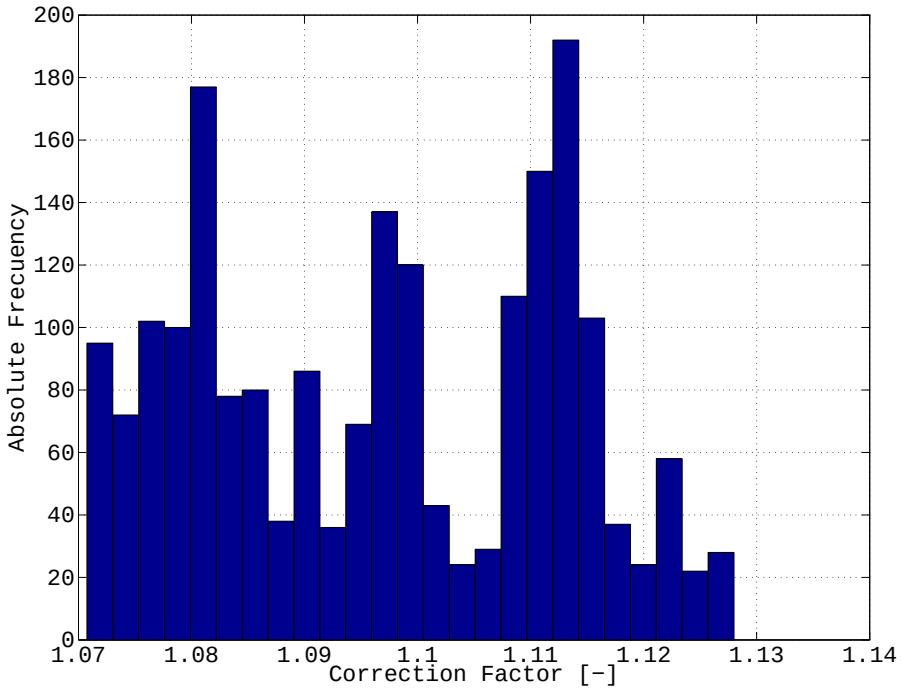


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.3: Valores con corrección geométrica para el sensor Sur.

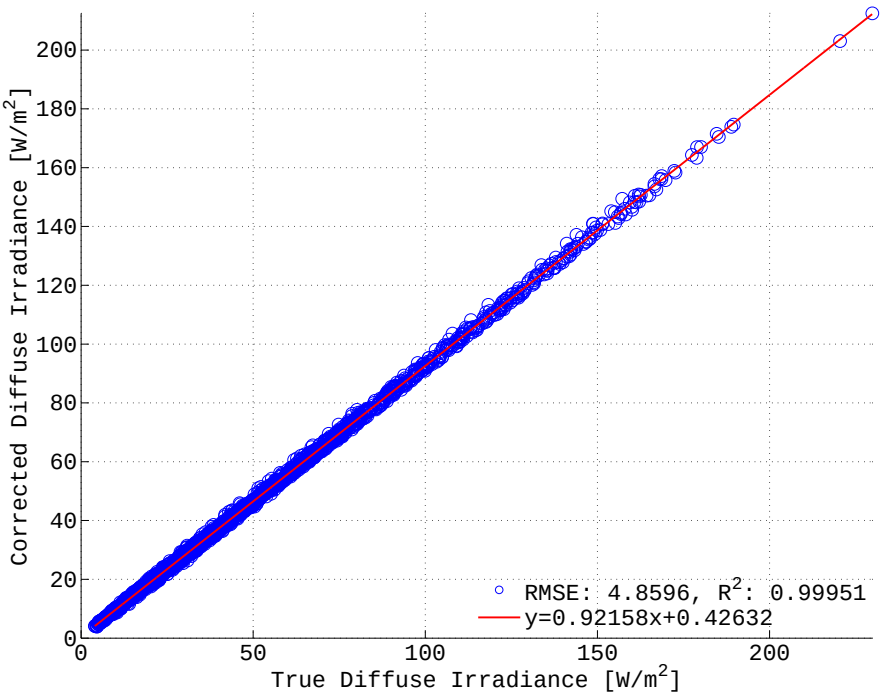


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

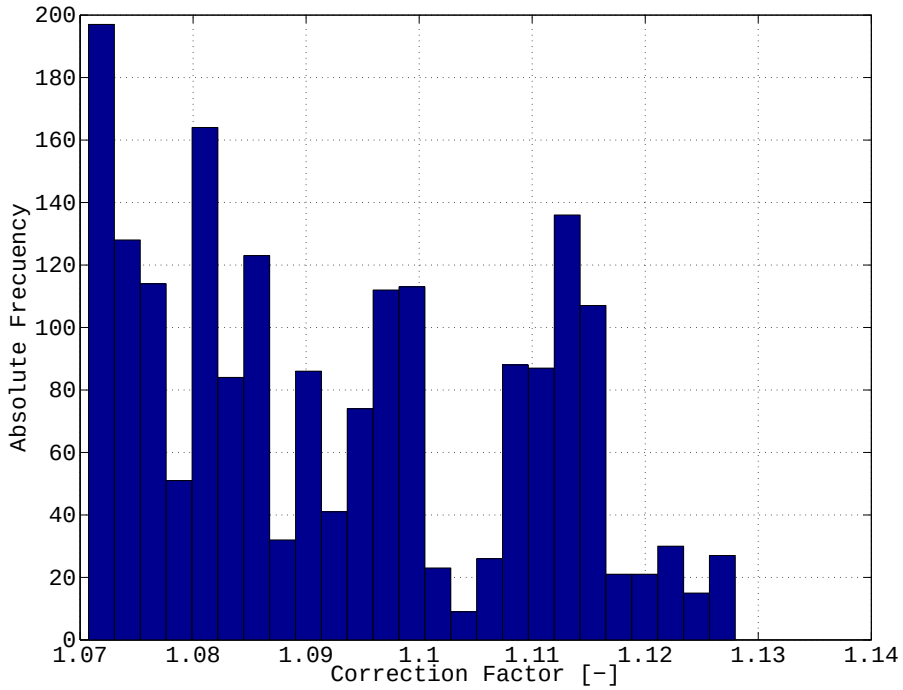


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.4: Valores con corrección geométrica para el sensor Este.

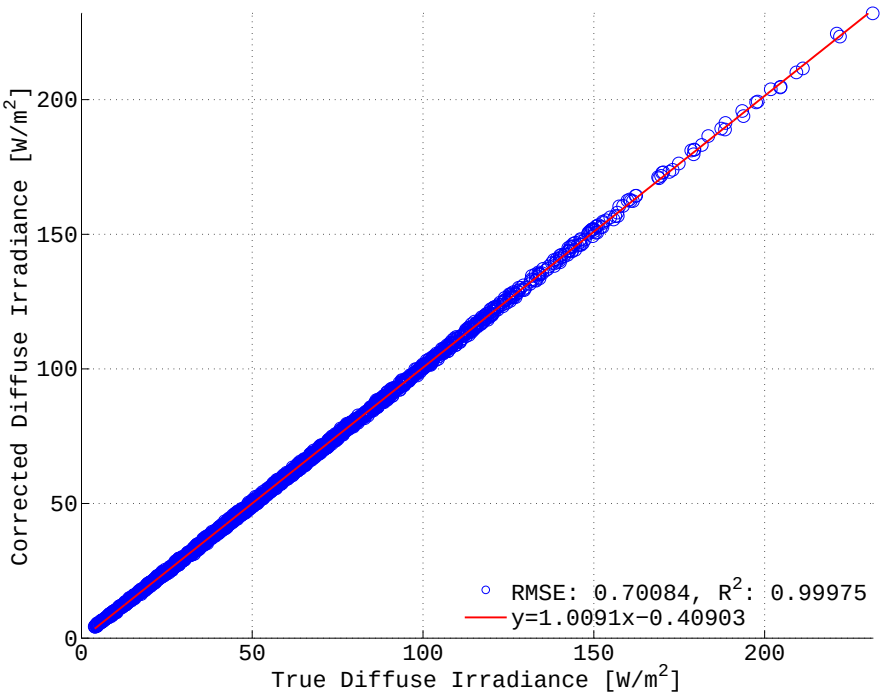


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

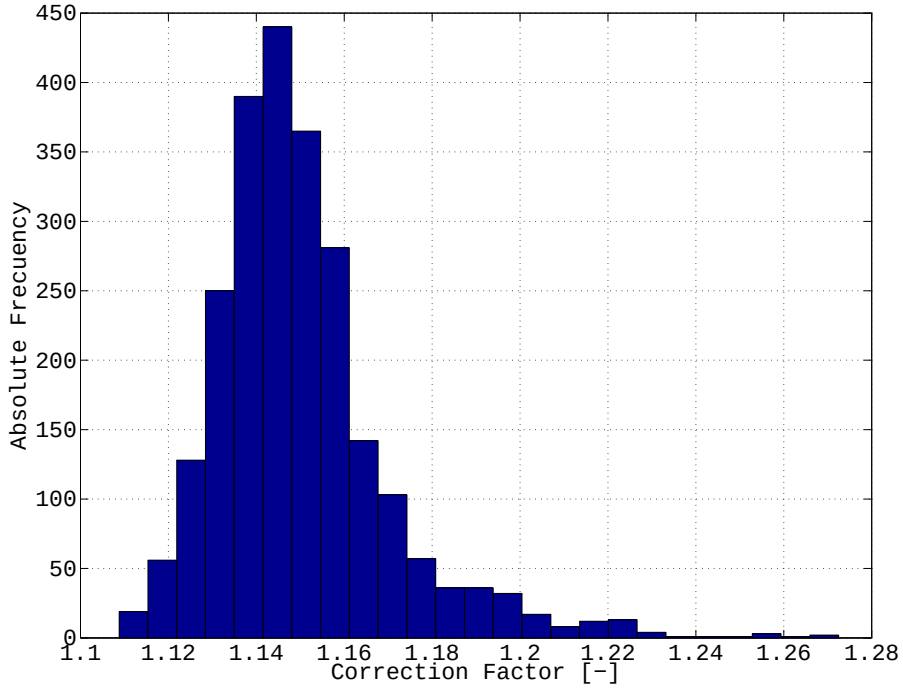


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.5: Valores con corrección geométrica para el sensor Oeste.



(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.



(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.6: Valores con corrección Batlles A para el sensor Norte.

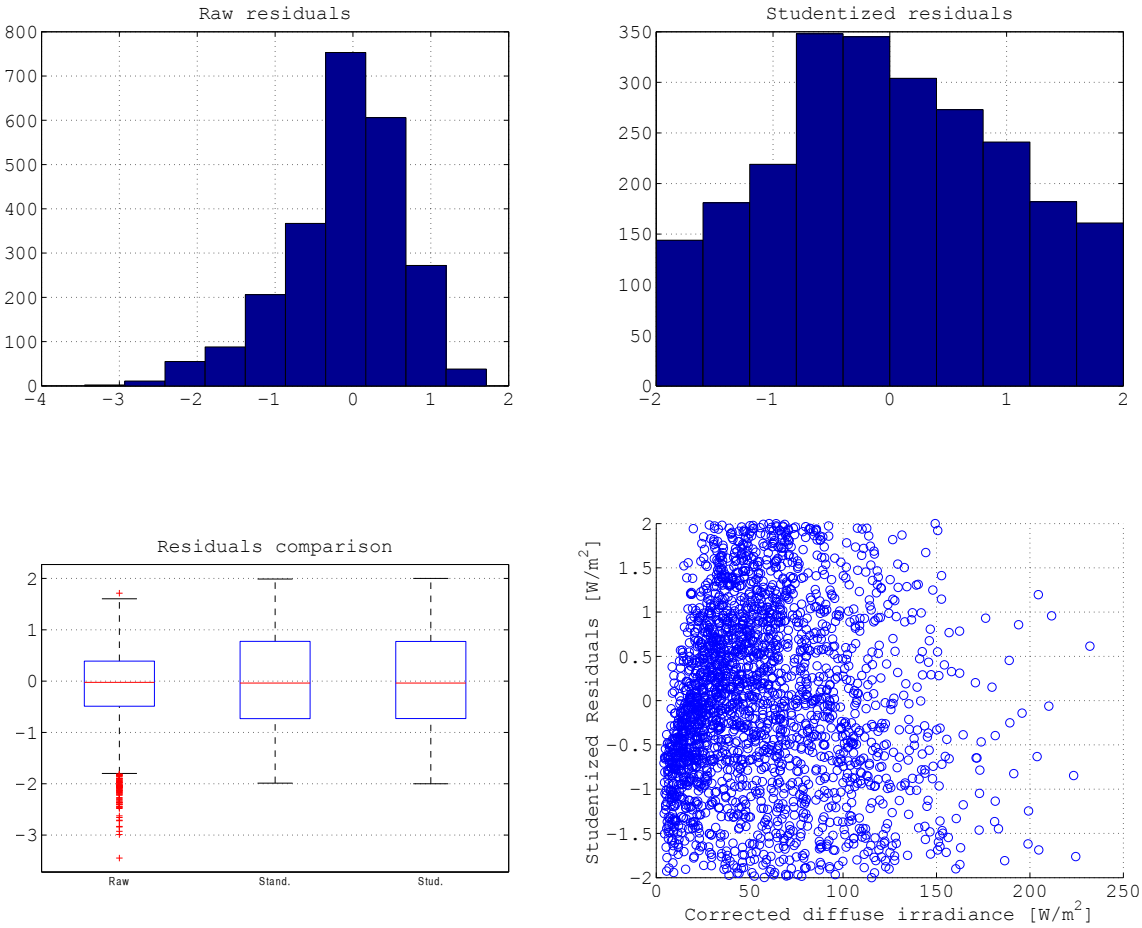
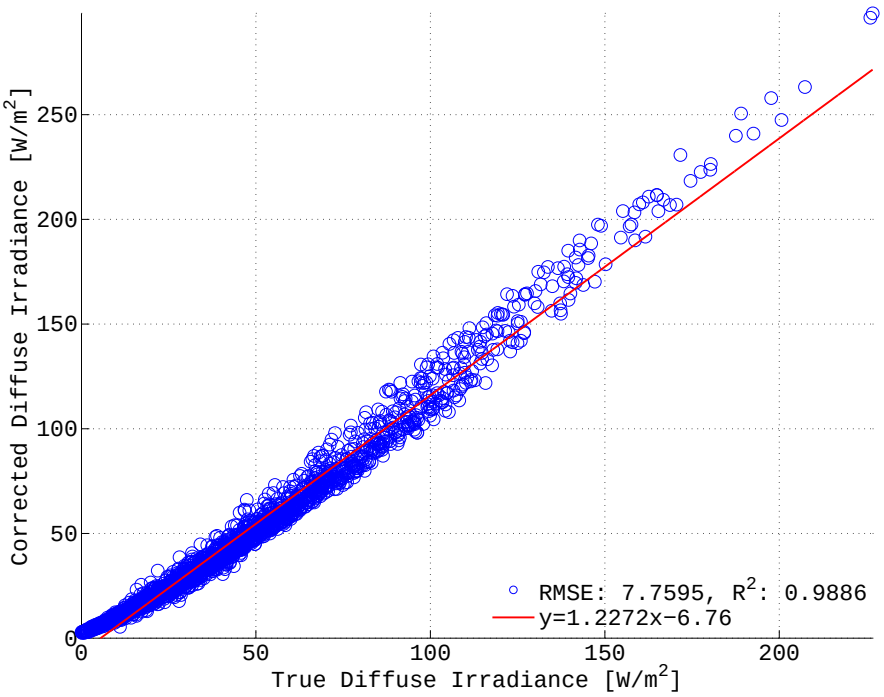
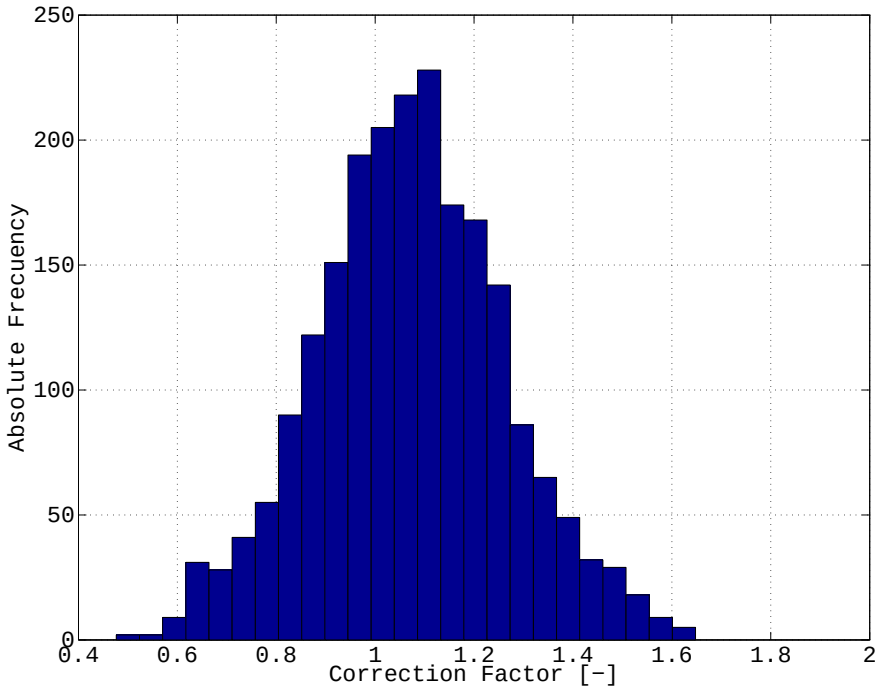


Figura 7.7: Estudio de los residuos de la corrección Batlles A para el sensor Norte.

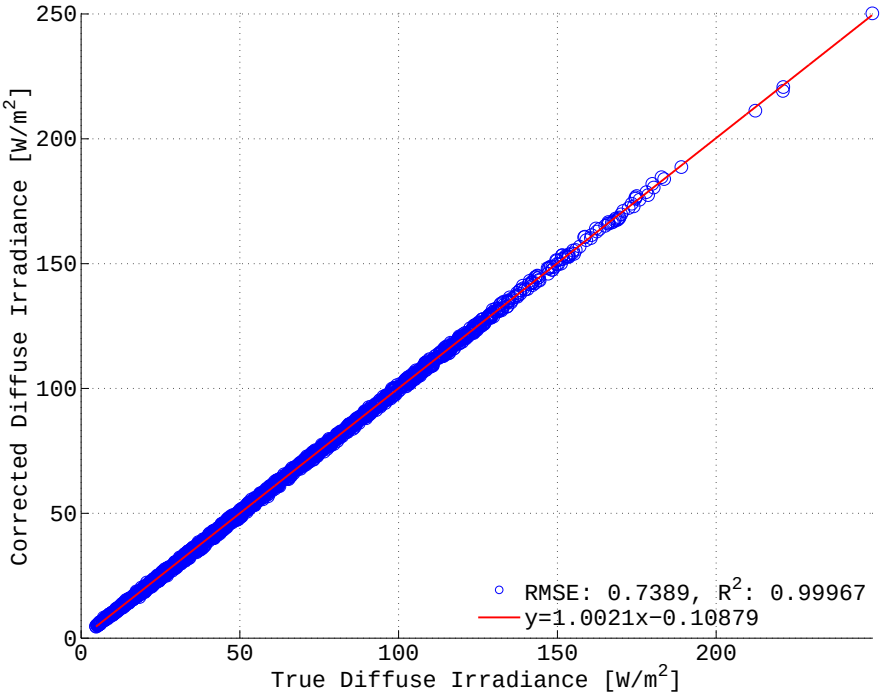


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

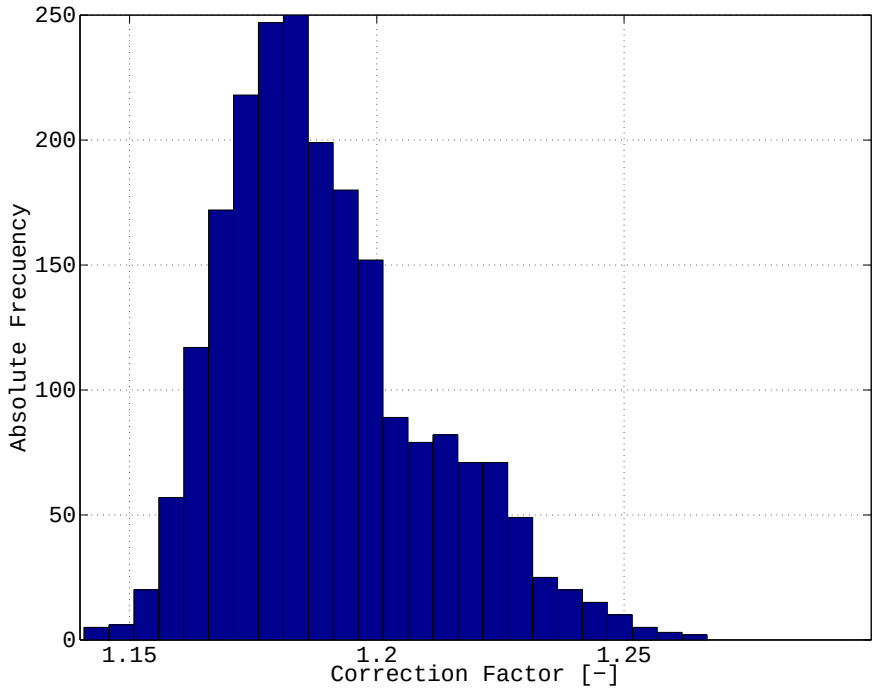


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.8: Valores con corrección Batlles A para el sensor Sur.

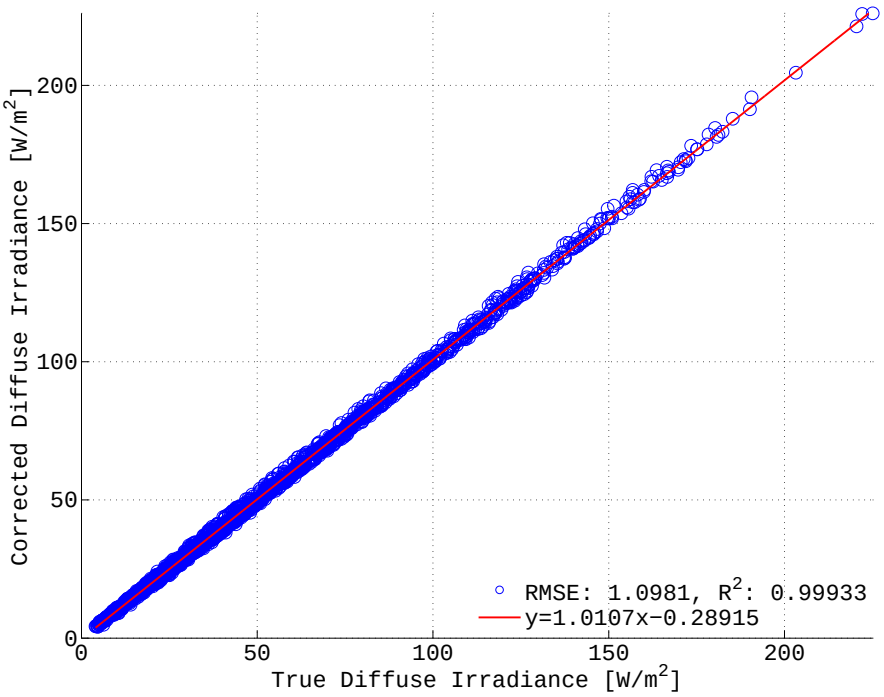


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

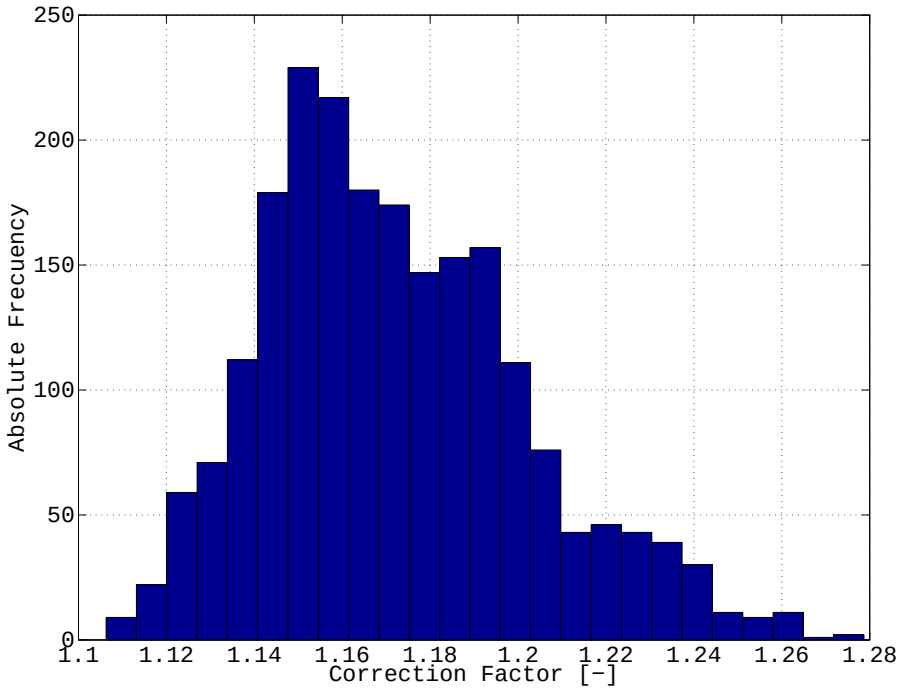


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.9: Valores con corrección Batlles A para el sensor Este.

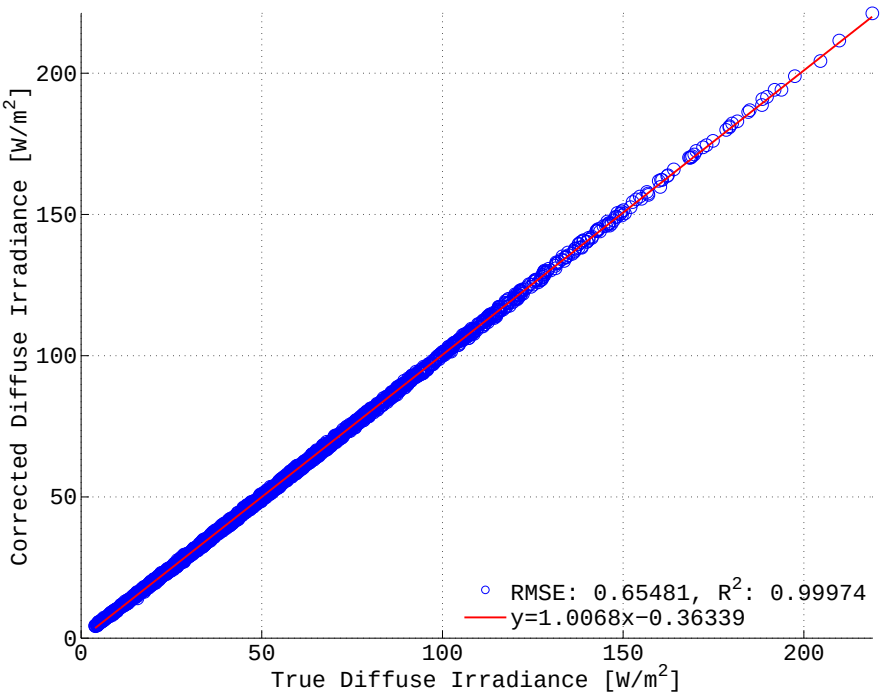


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

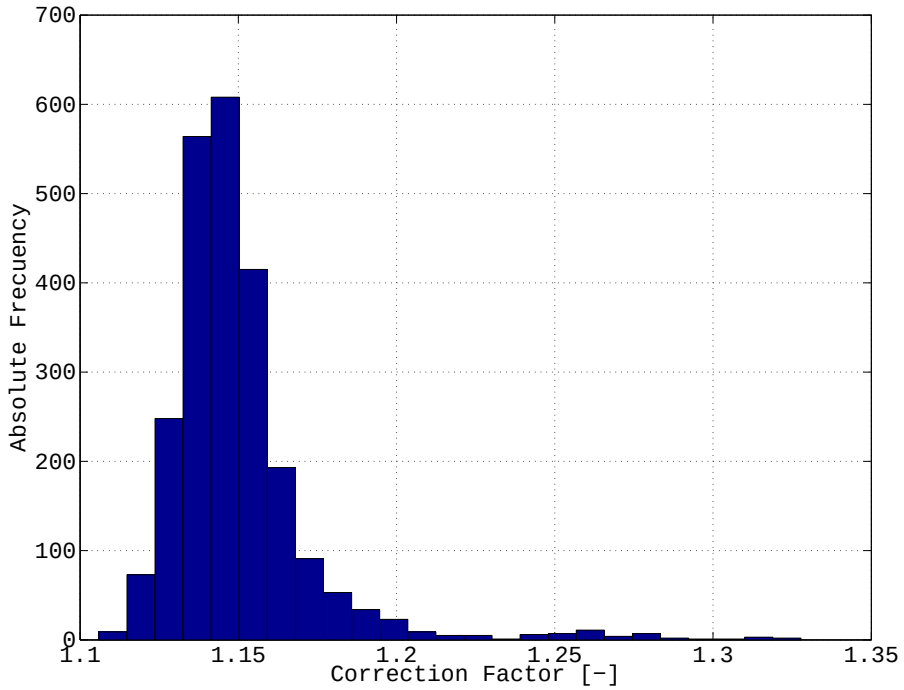


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.10: Valores con corrección Batlles A para el sensor Oeste.



(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.



(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.11: Valores con corrección Batlles B para el sensor Norte.

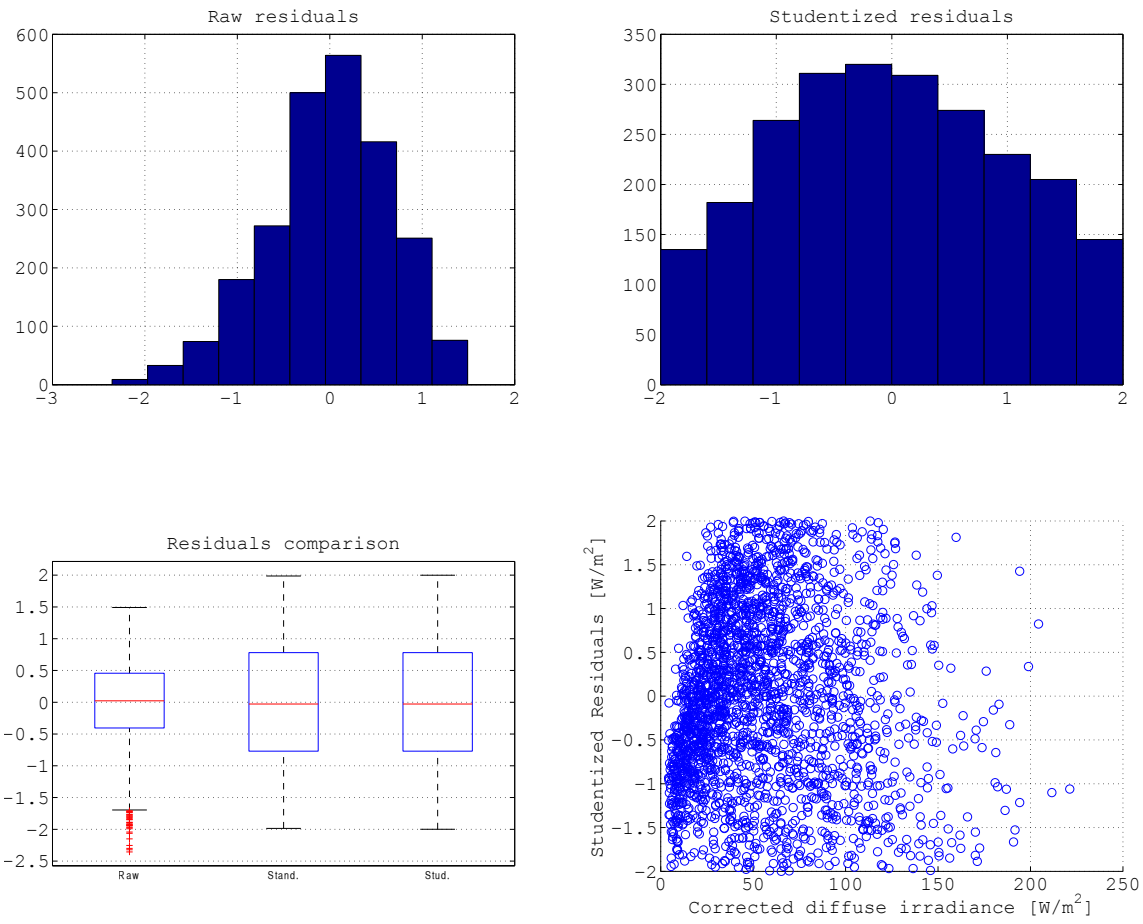
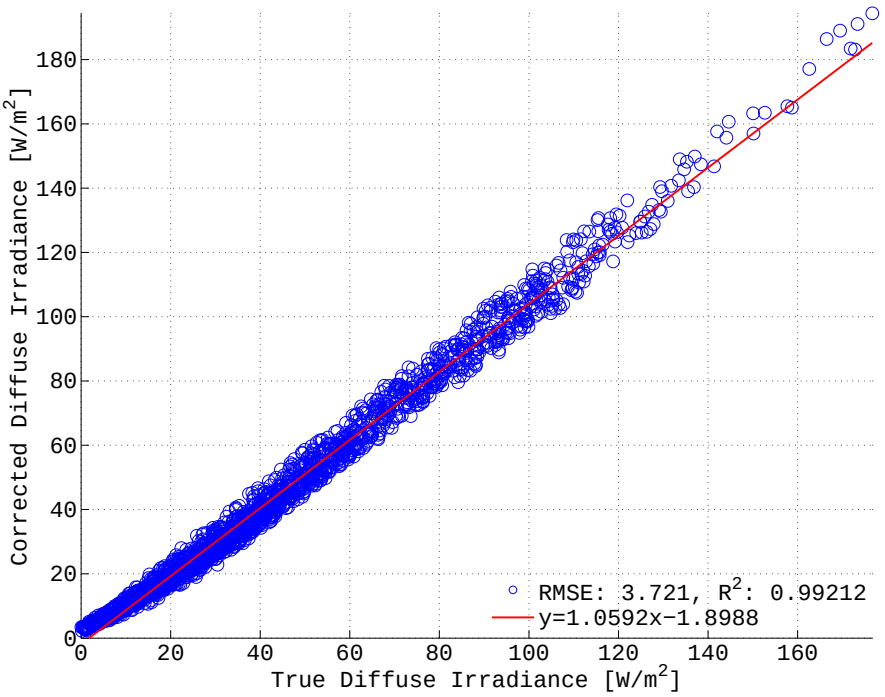
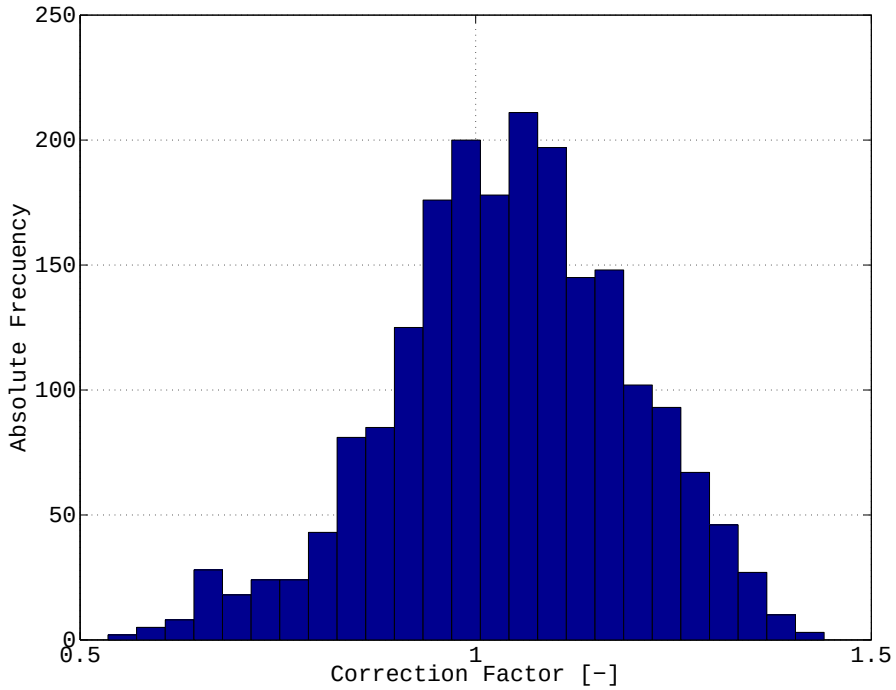


Figura 7.12: Estudio de los residuos de la corrección Batlles B para el sensor Norte.

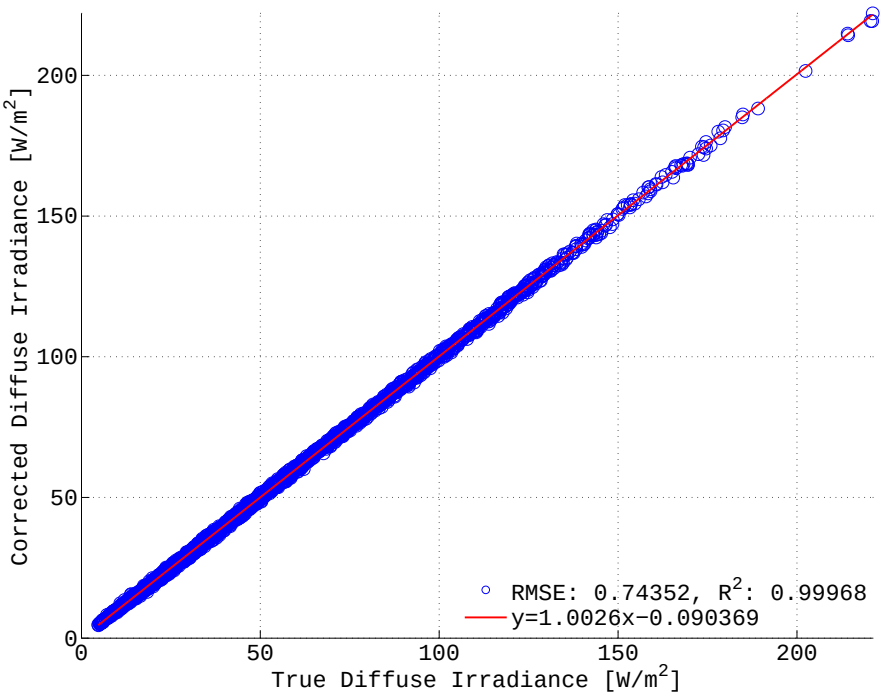


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

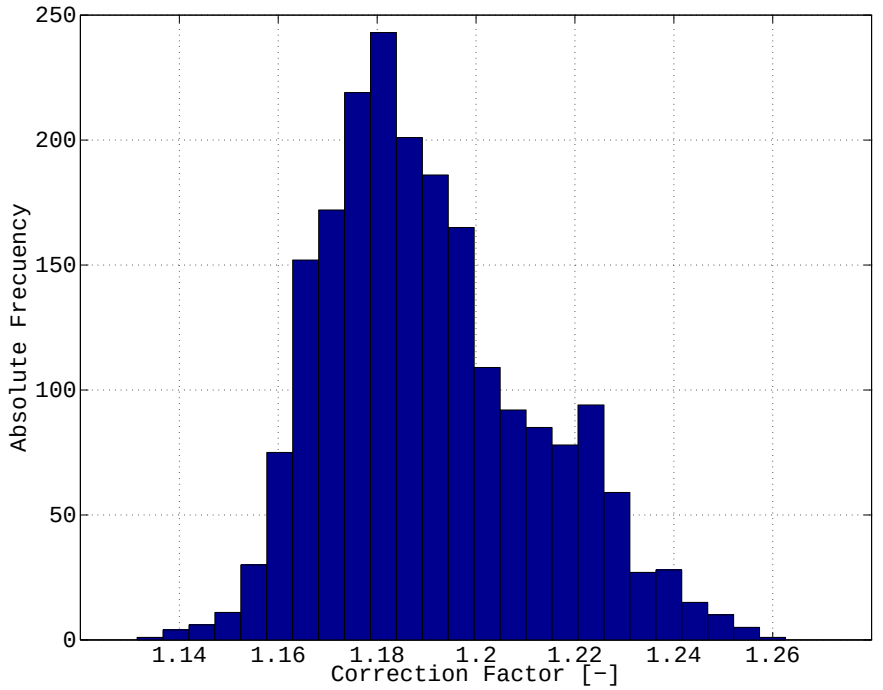


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.13: Valores con corrección Batlles B para el sensor Sur.

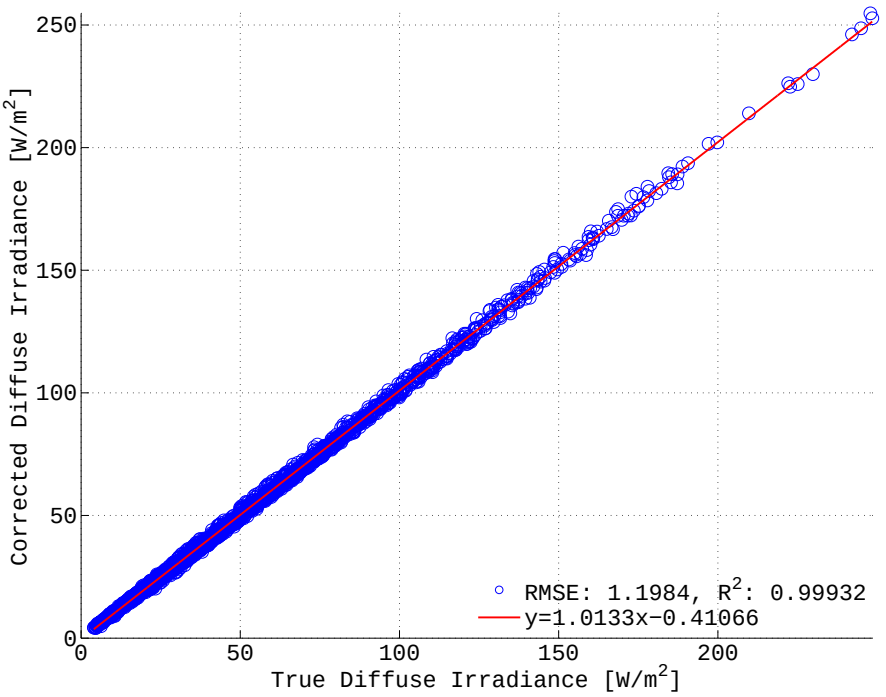


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

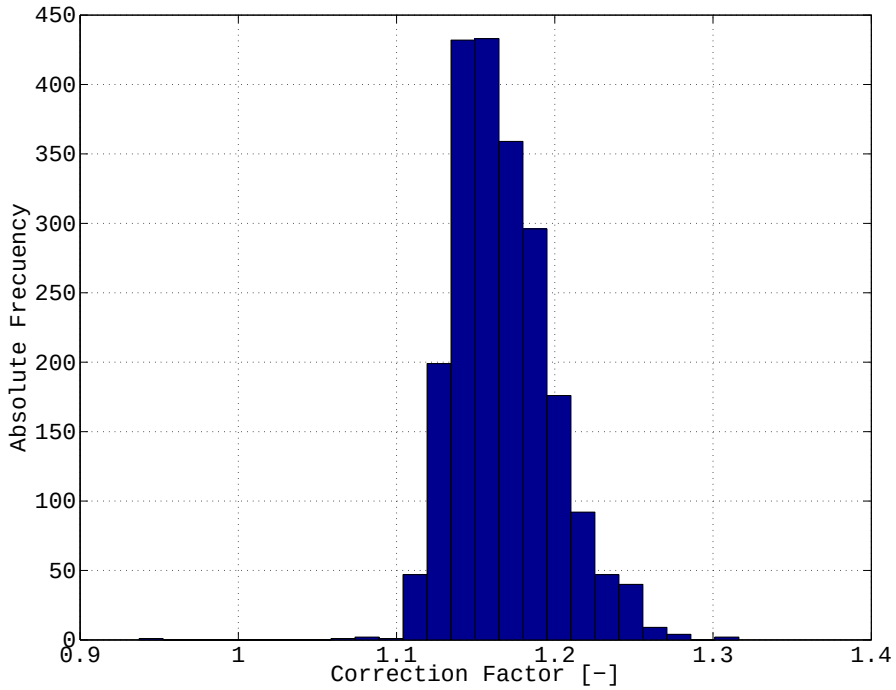


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.14: Valores con corrección Batlles B para el sensor Este.

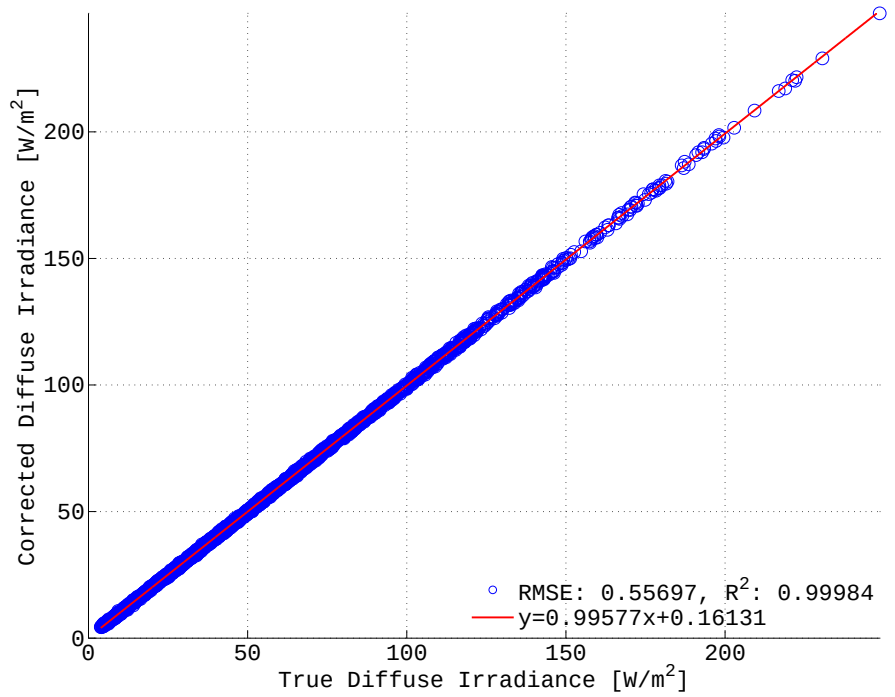


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

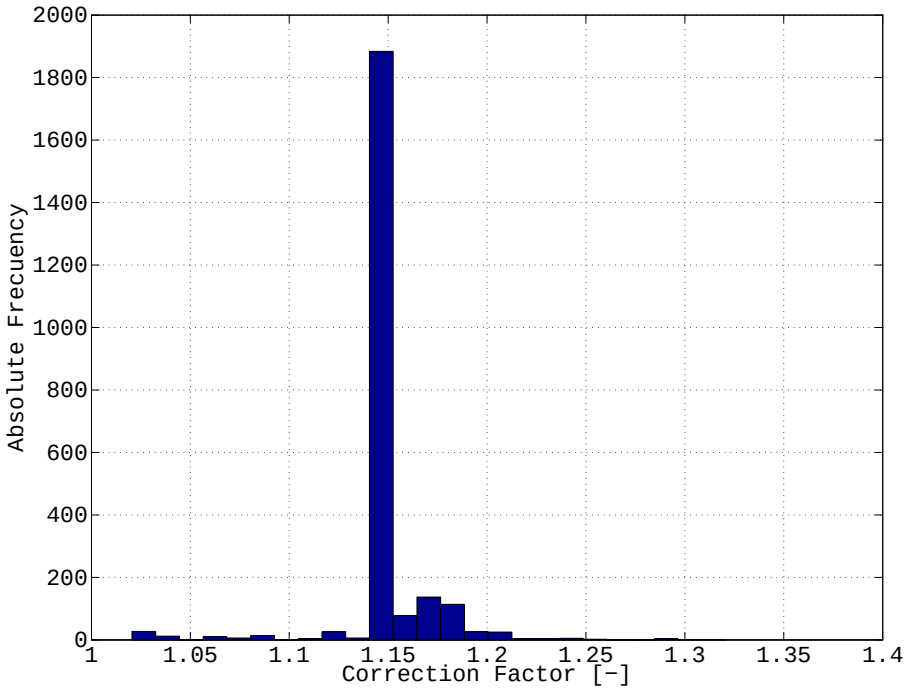


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.15: Valores con corrección Batlles B para el sensor Oeste.



(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.



(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.16: Valores con corrección LeBaron para el sensor Norte.

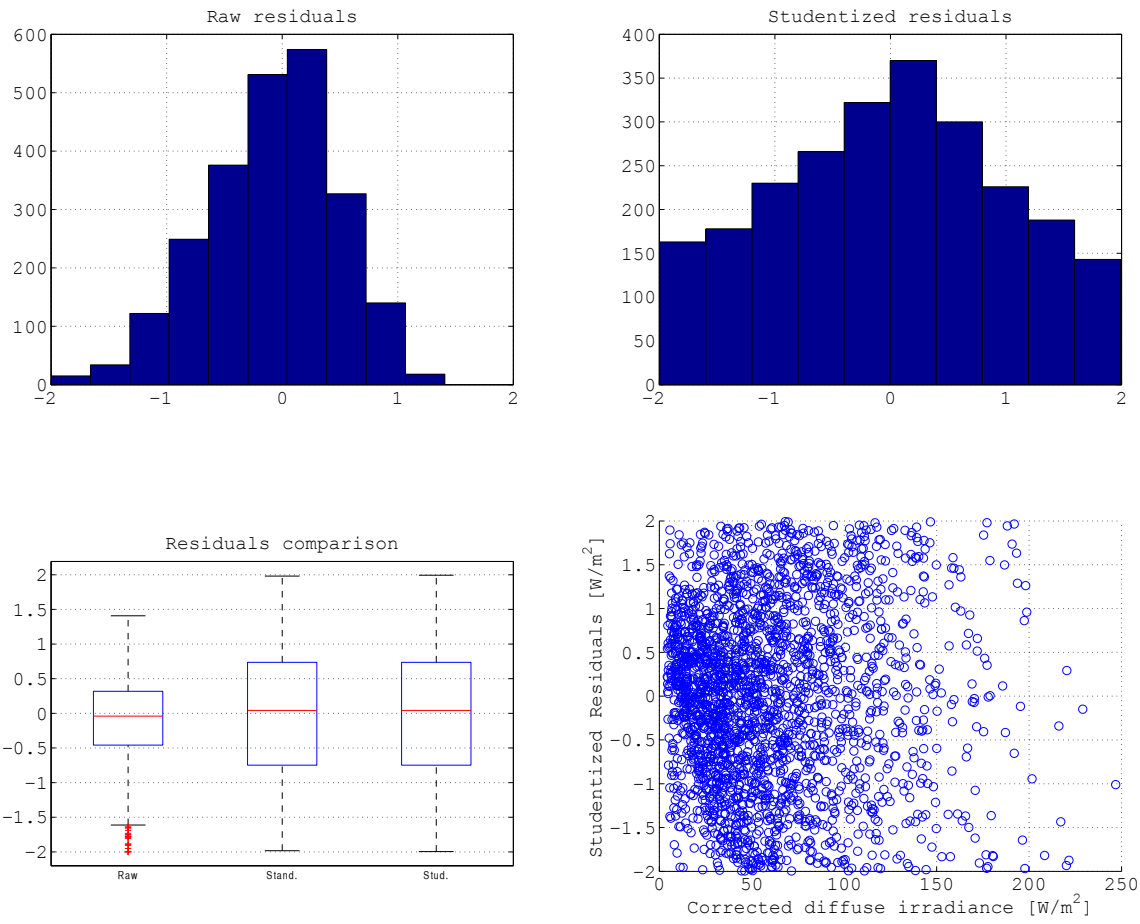
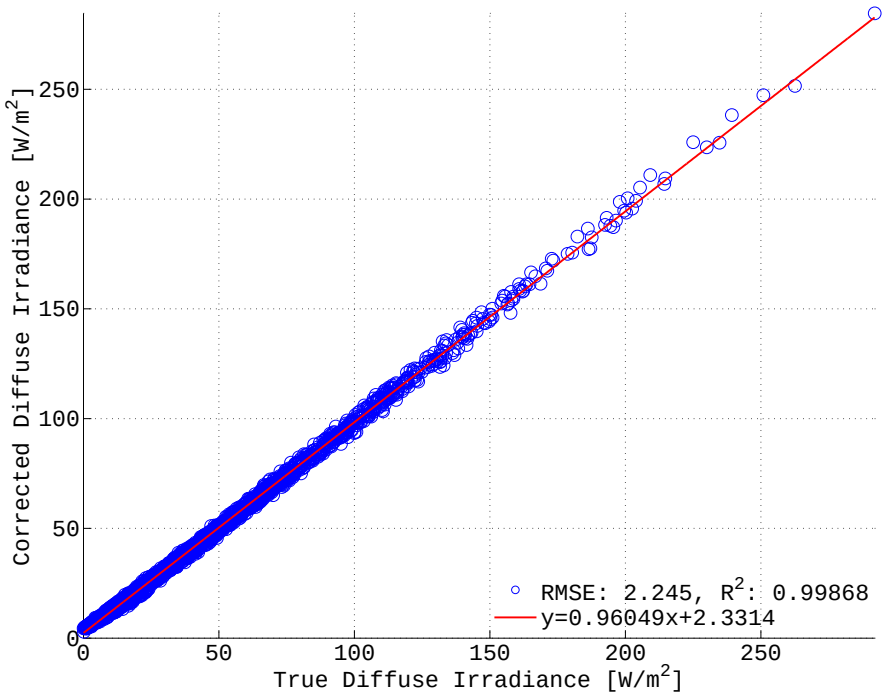
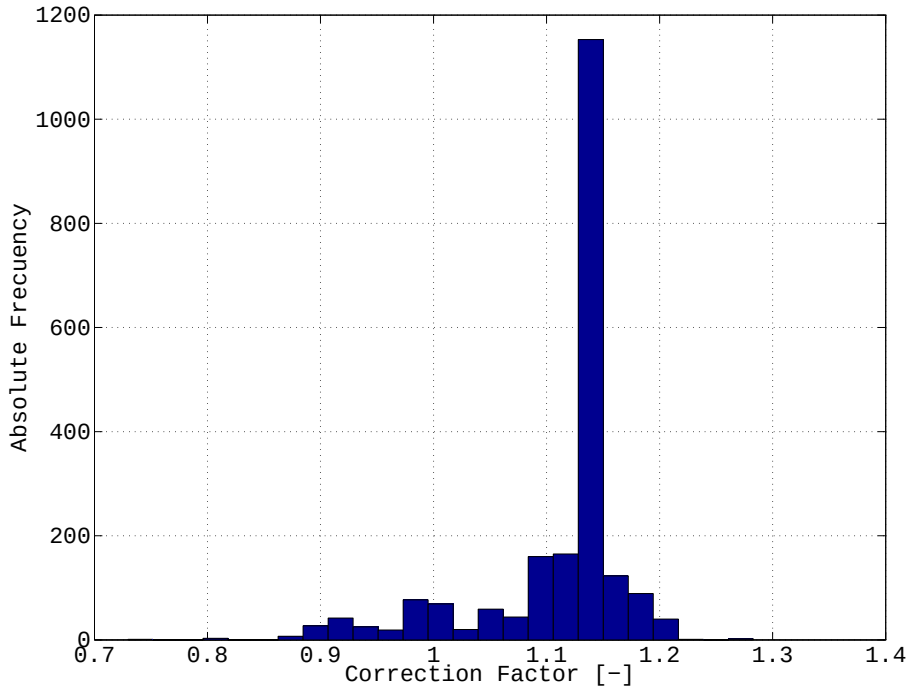


Figura 7.17: Estudio de los residuos de la corrección LeBaron para el sensor Norte.

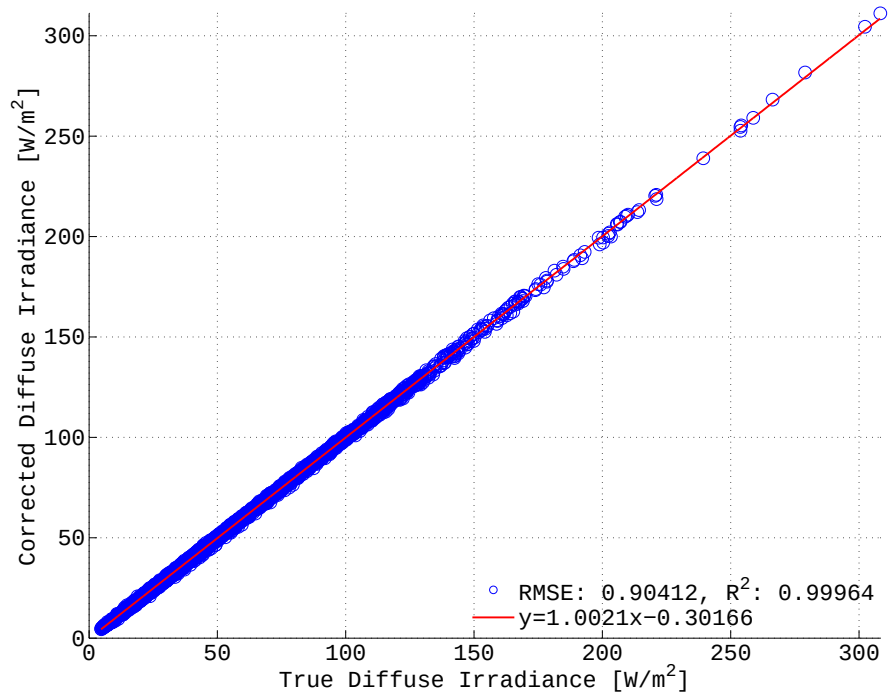


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

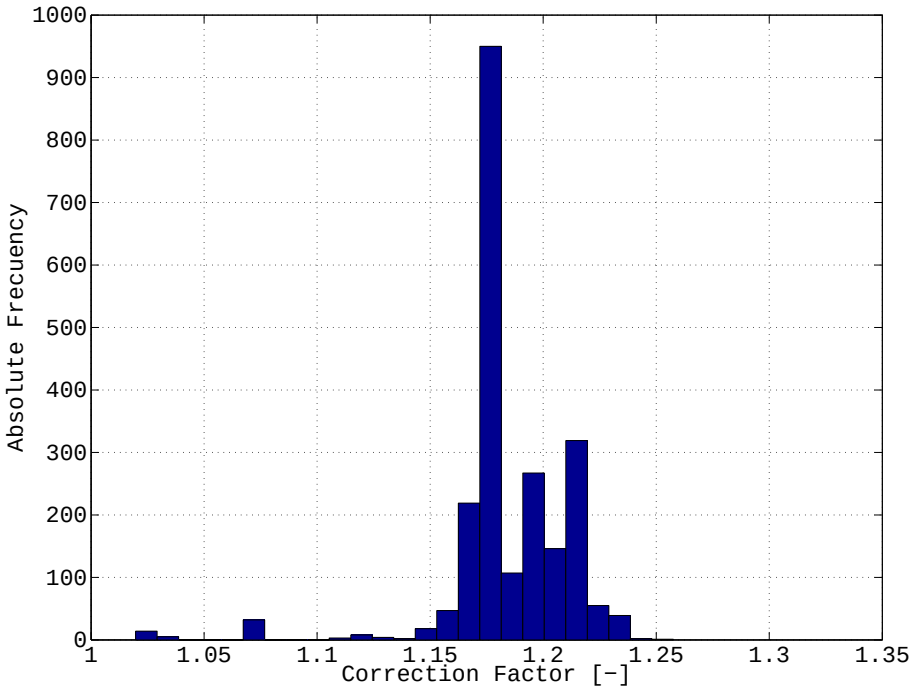


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.18: Valores con corrección LeBaron para el sensor Sur.

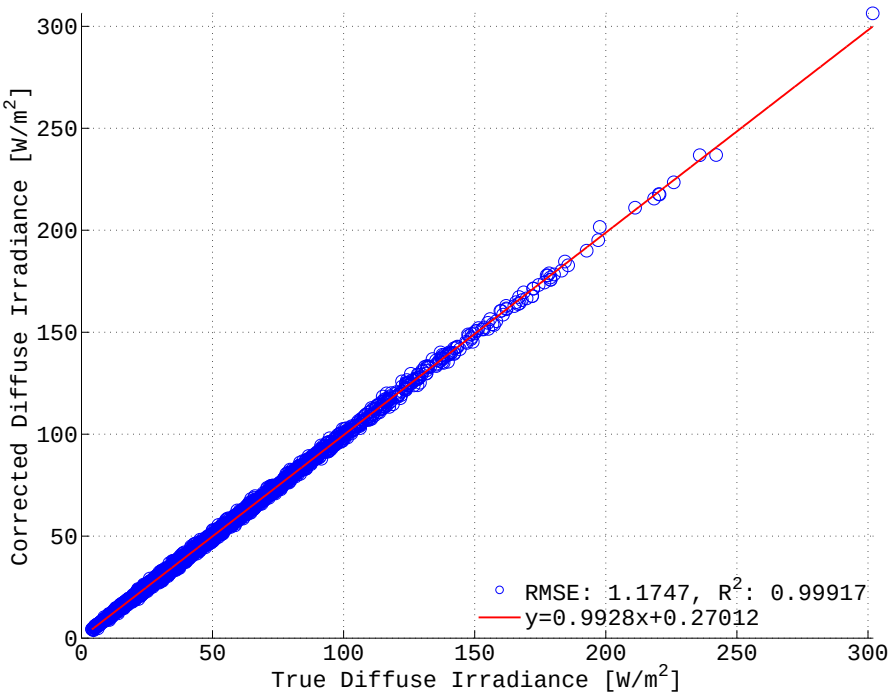


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

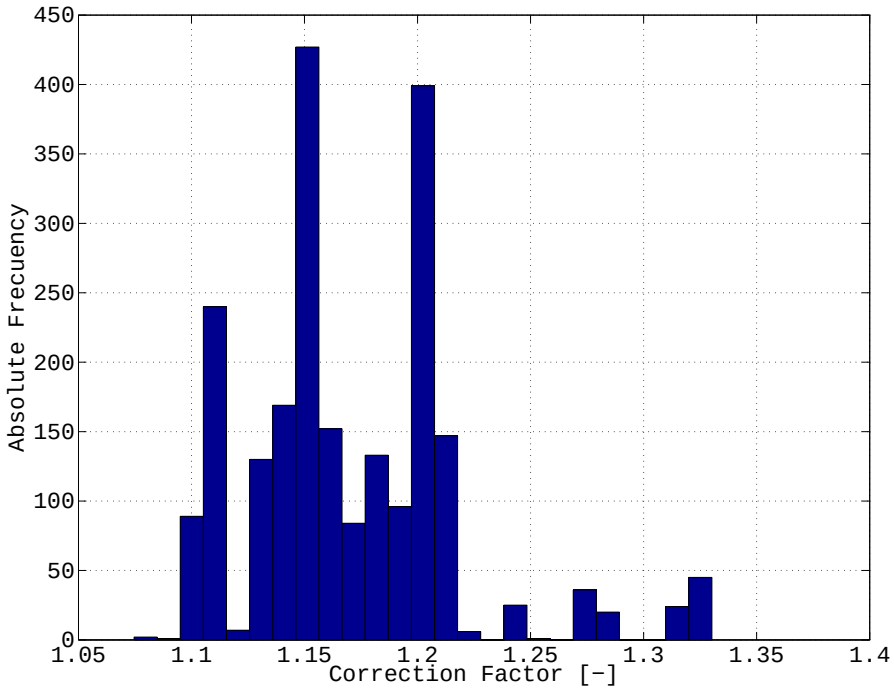


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.19: Valores con corrección LeBaron para el sensor Este.

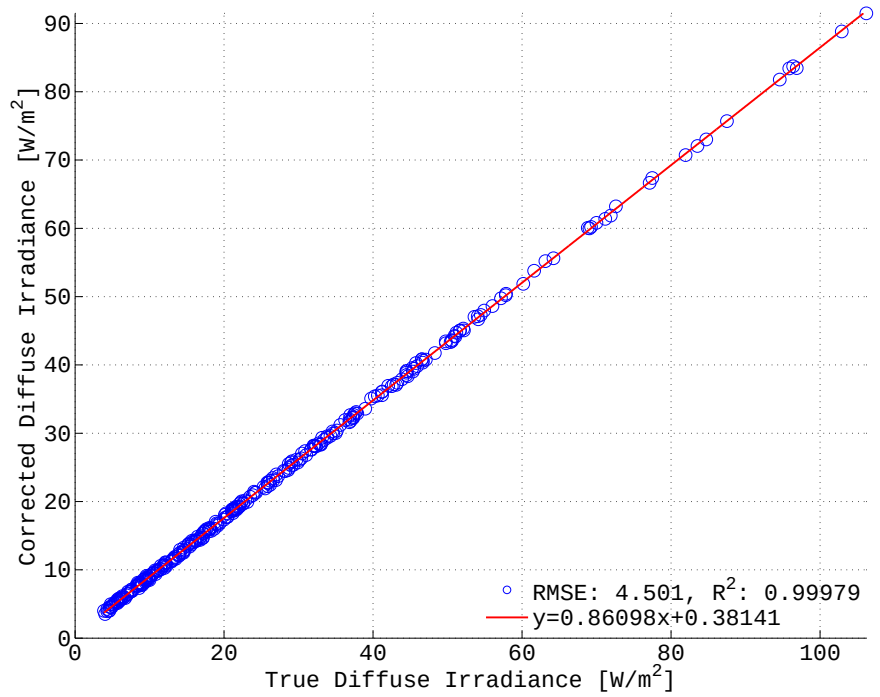


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

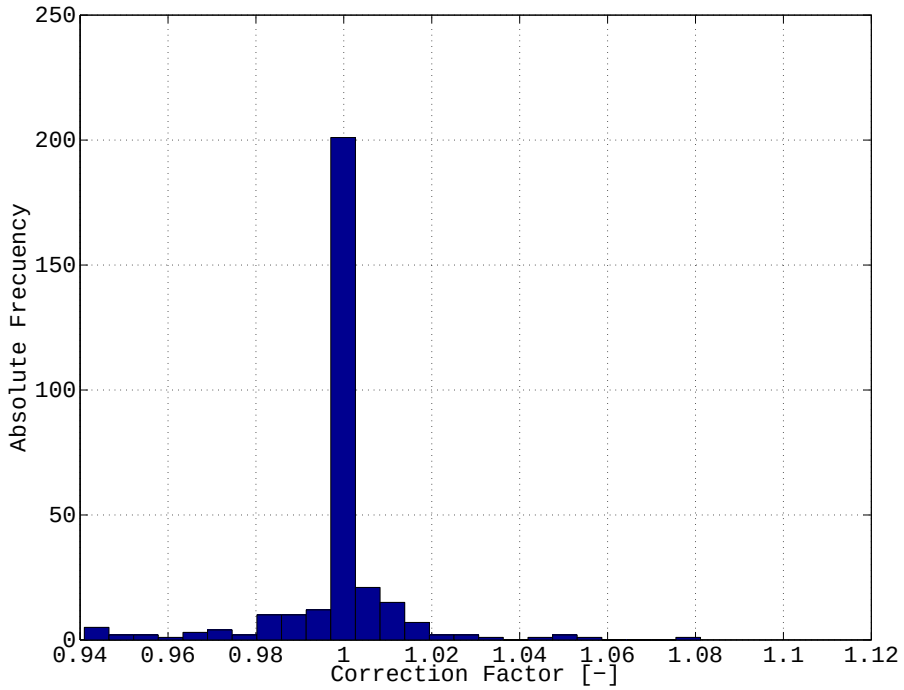


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.20: Valores con corrección LeBaron para el sensor Oeste.



(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.



(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.21: Valores con corrección Muneer & Zhang para el sensor Norte.

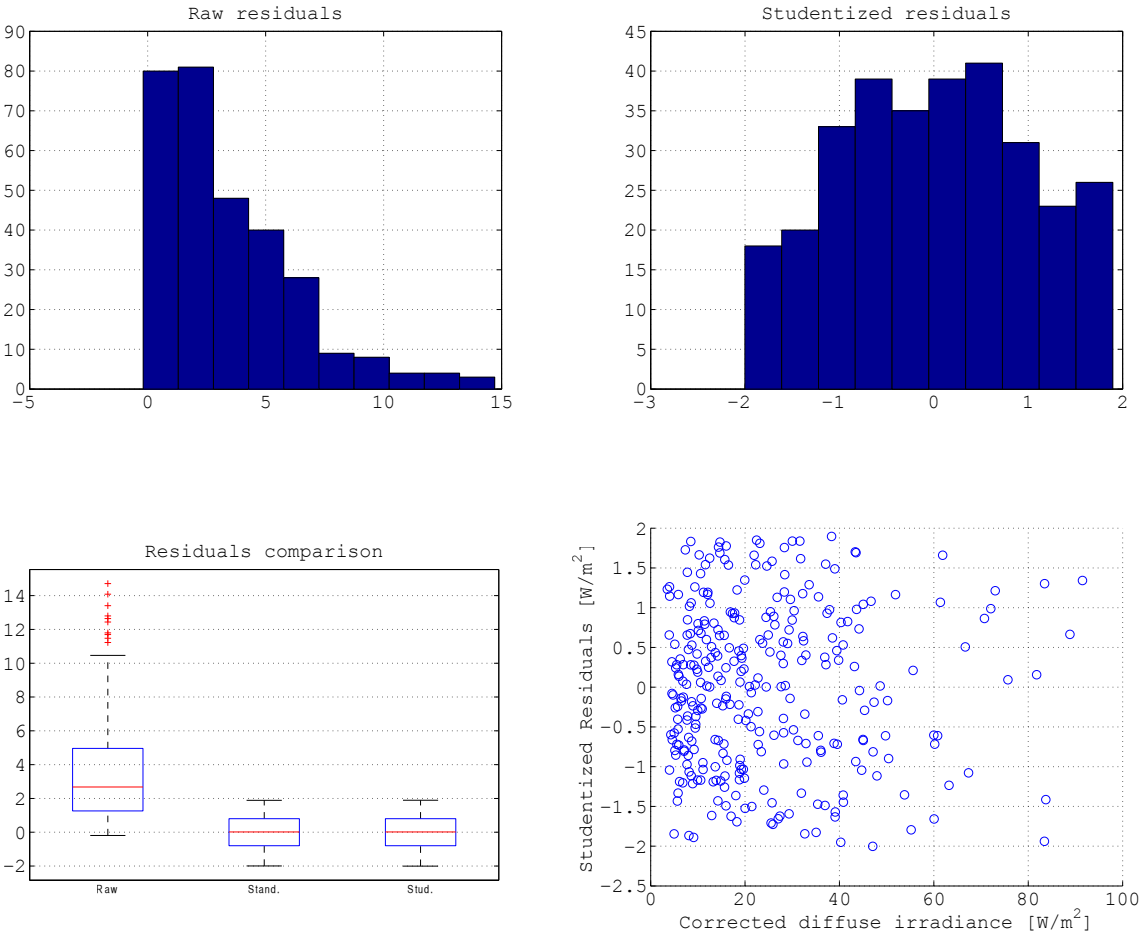
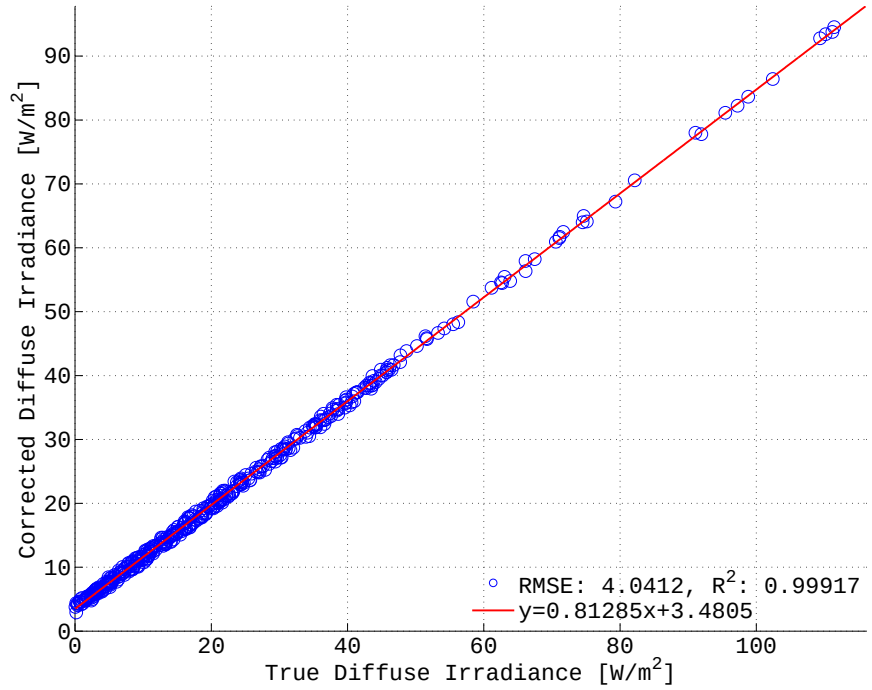
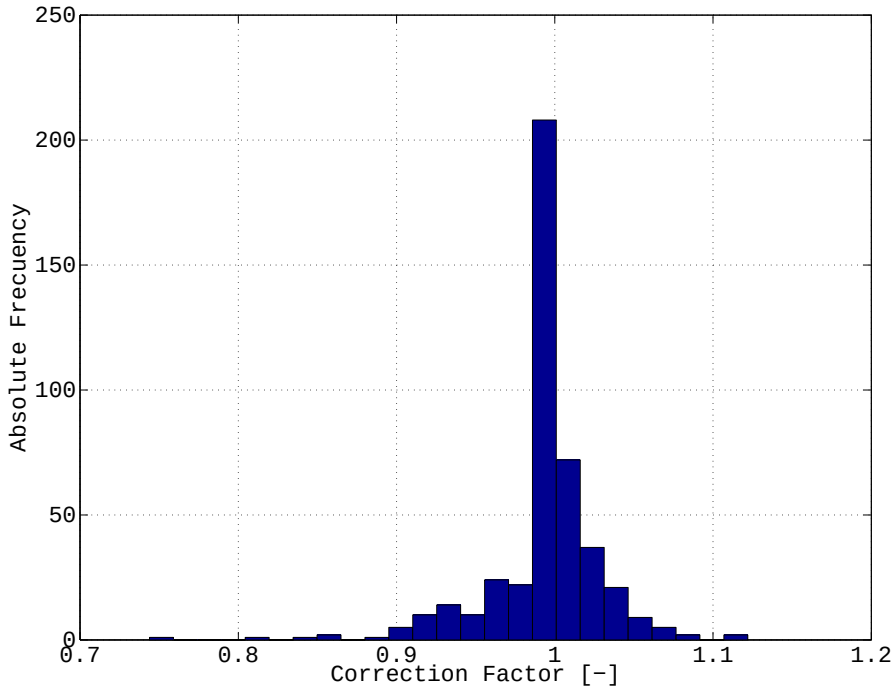


Figura 7.22: Estudio de los residuos de la corrección Muneer & Zhang sensor Norte.

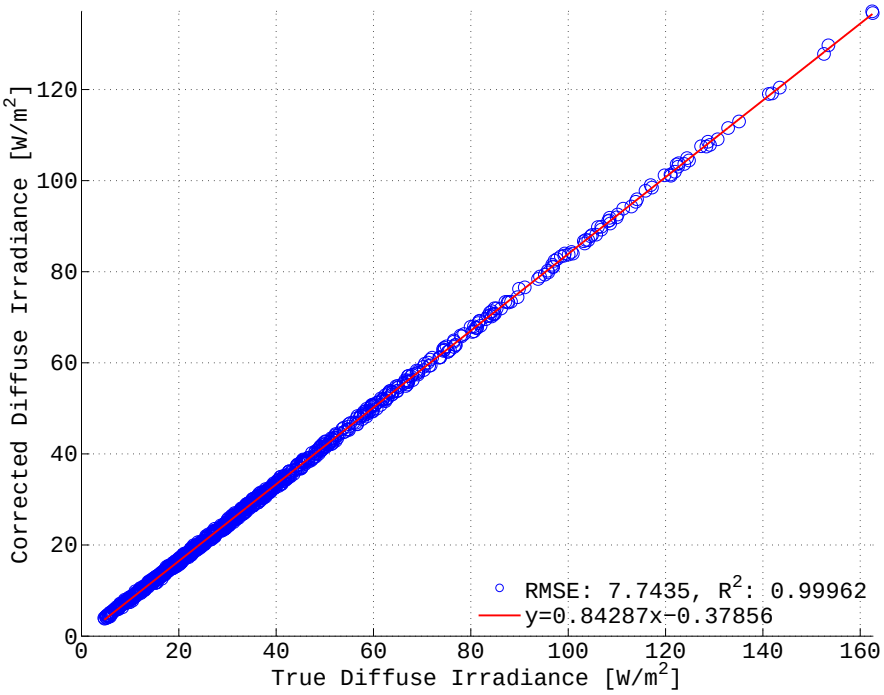


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

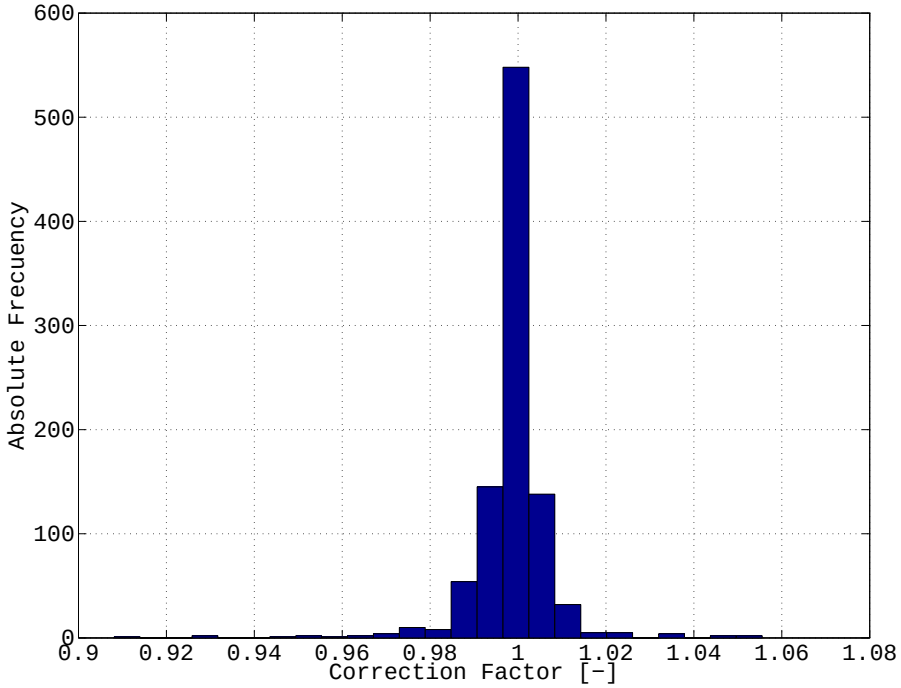


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.23: Valores con corrección Muneer & Zhang para el sensor Sur.

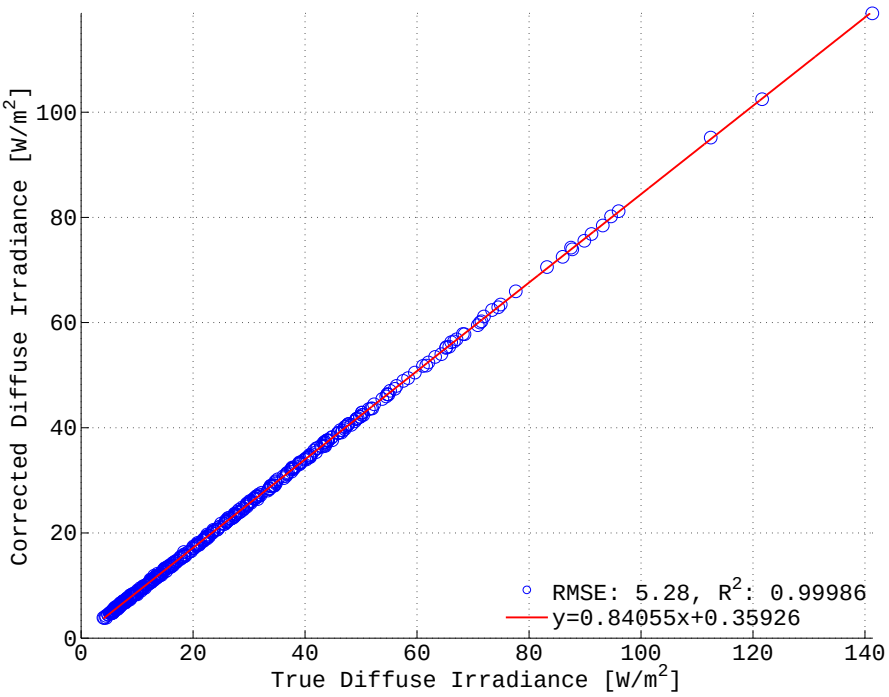


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

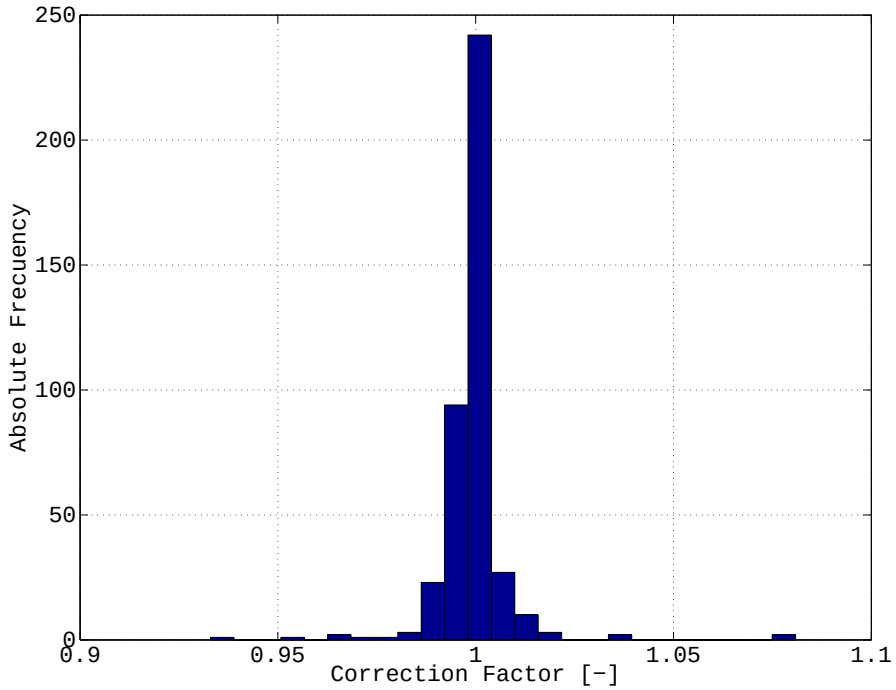


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.24: Valores con corrección Muneer & Zhang para el sensor Este.

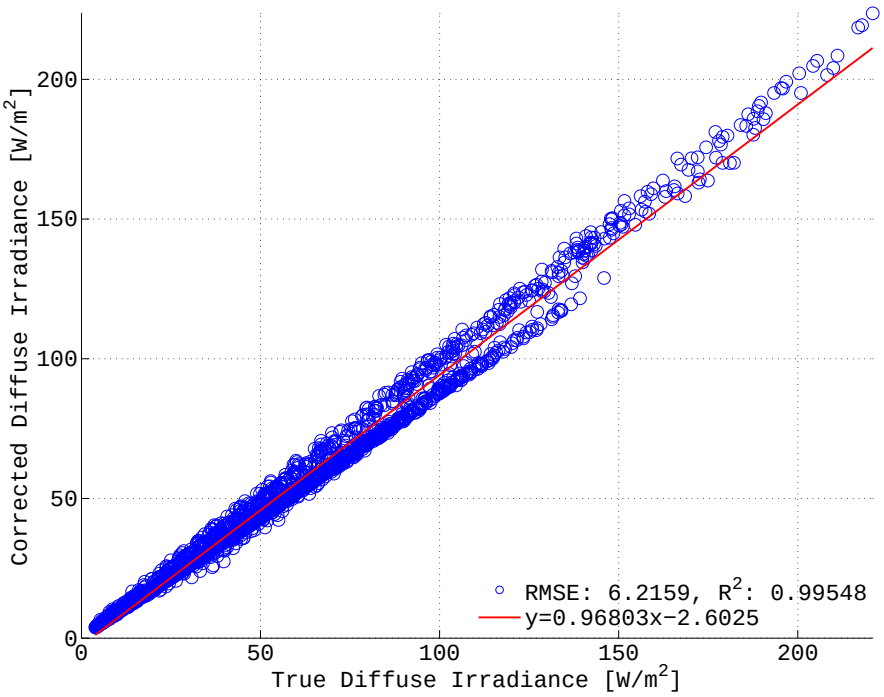


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

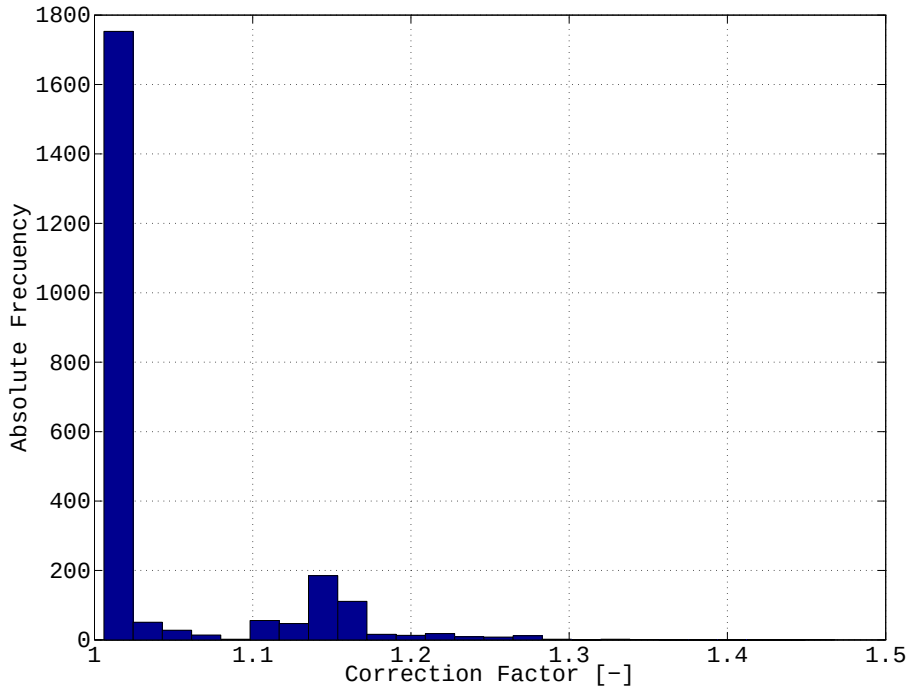


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.25: Valores con corrección Muneer & Zhang para el sensor Oeste.



(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.



(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.26: Valores con corrección Steven para el sensor Norte.

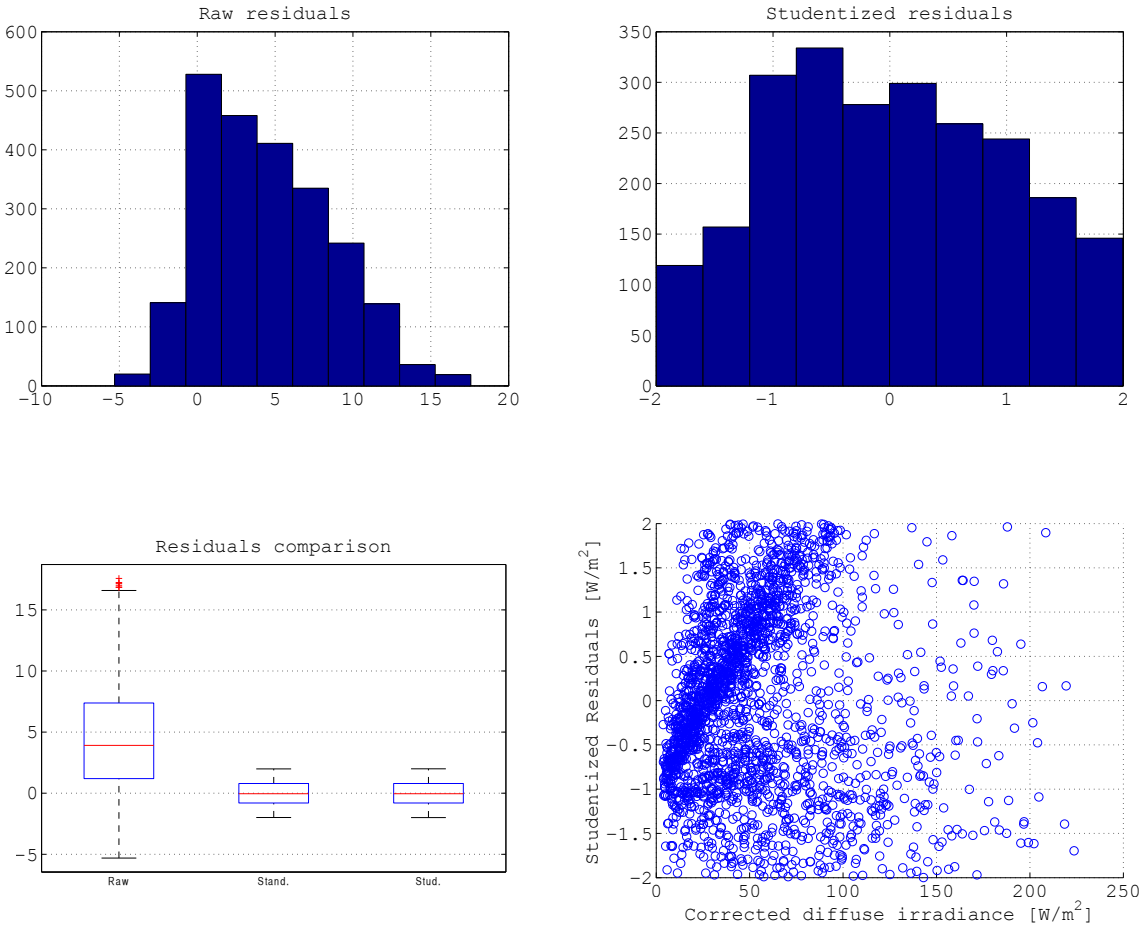
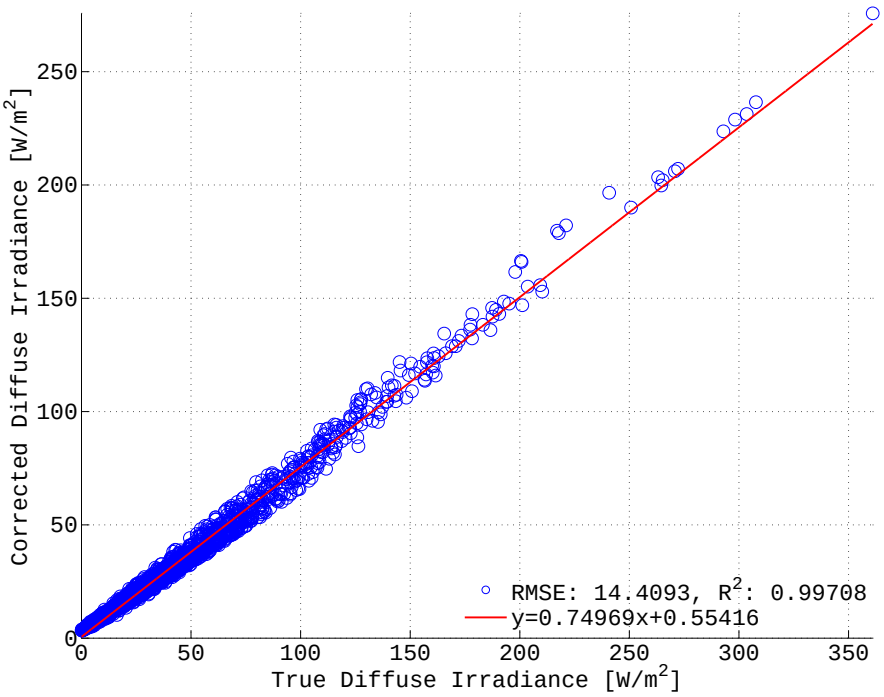
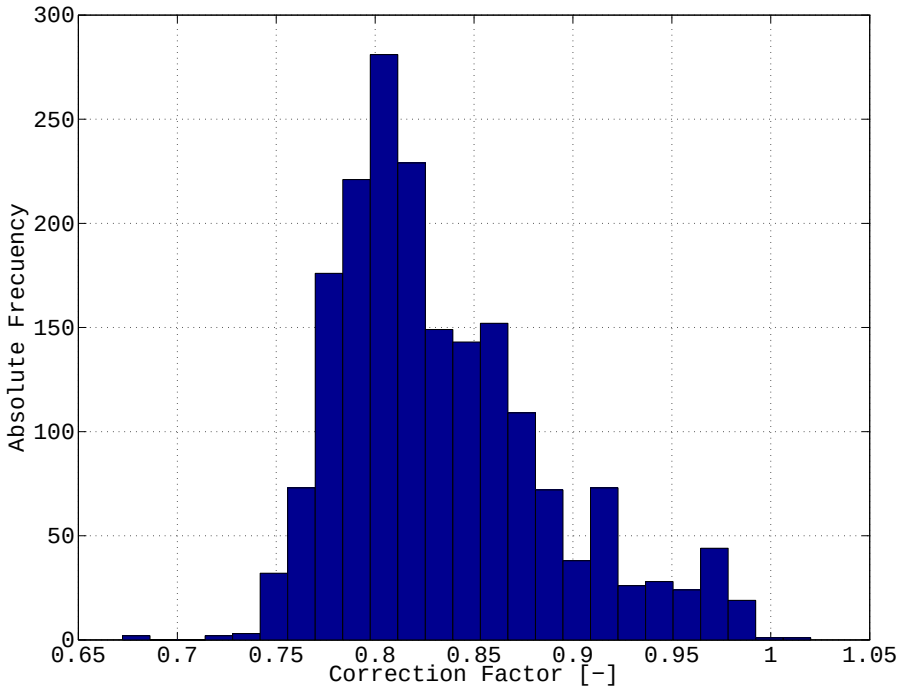


Figura 7.27: Estudio de los residuos de la corrección Steven para el sensor Norte.

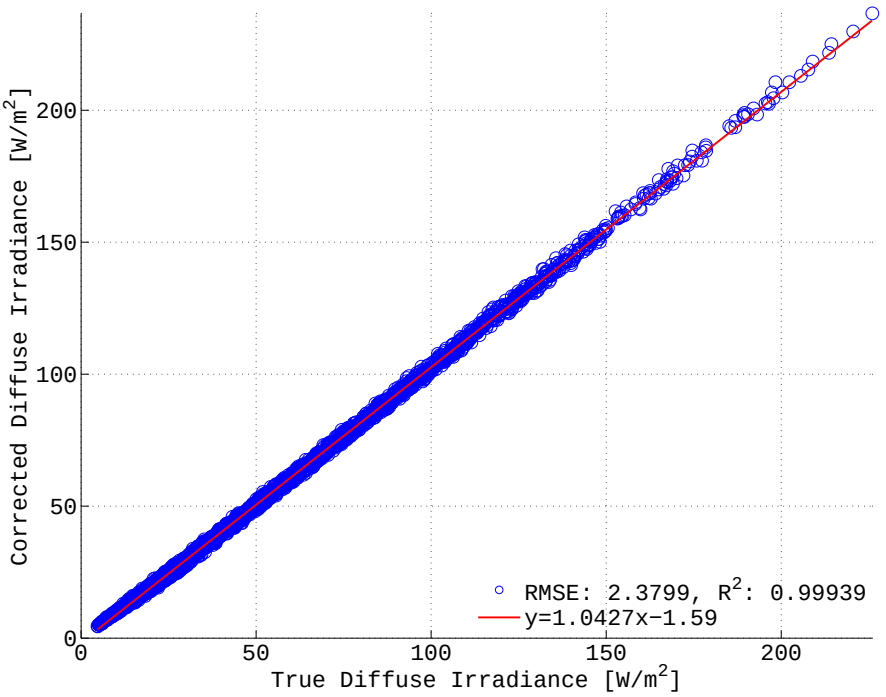


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

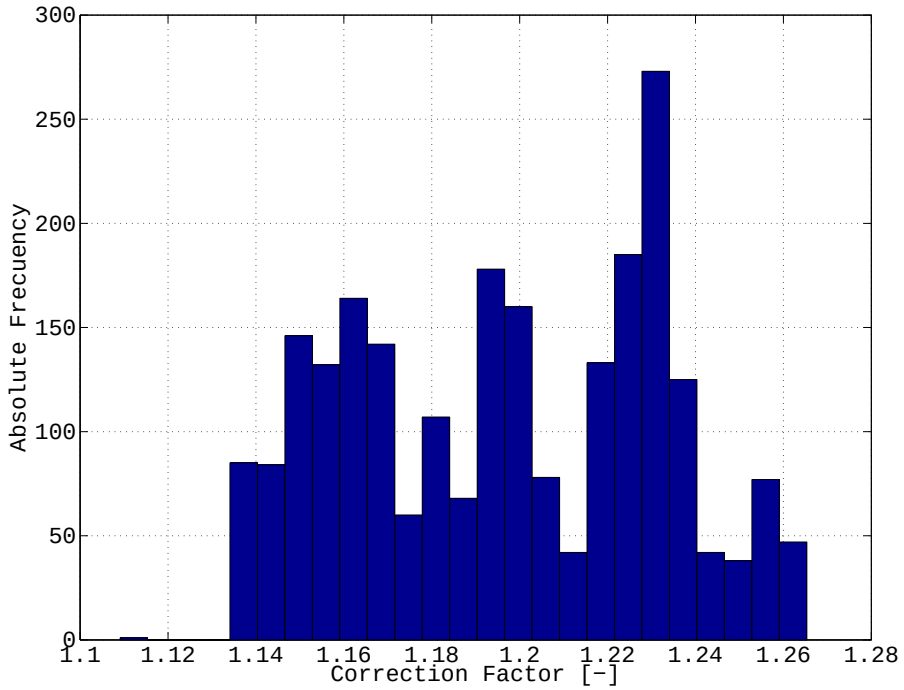


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.28: Valores con corrección Steven para el sensor Sur.

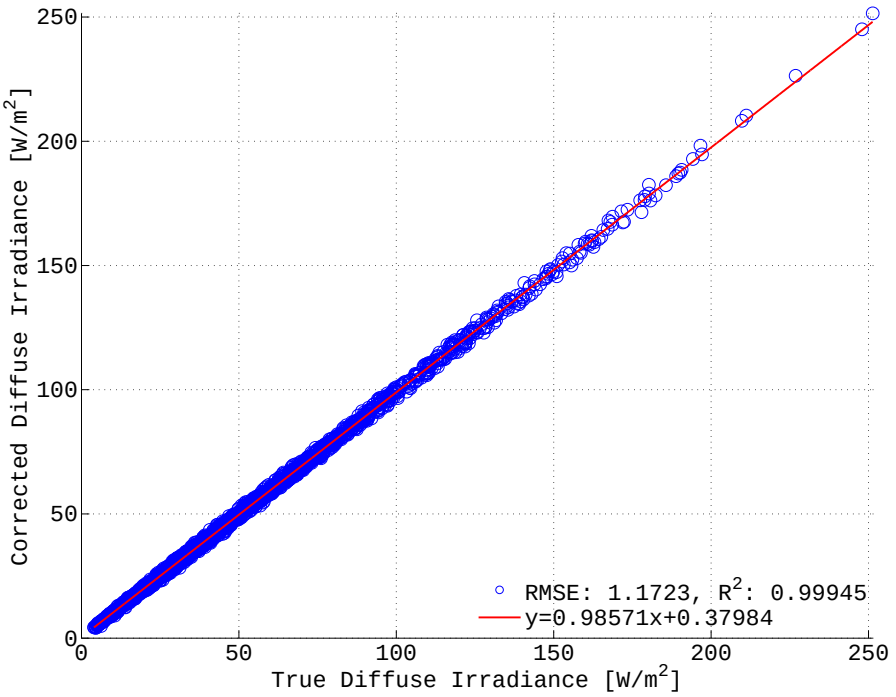


(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.

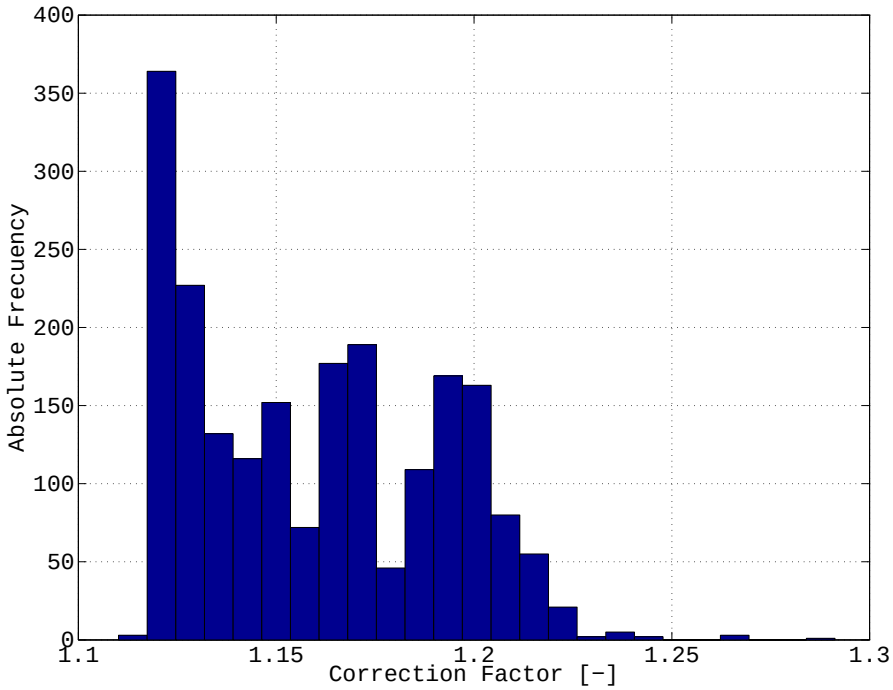


(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.29: Valores con corrección Steven para el sensor Este.



(a) Valores corregidos por el modelo respecto a valores de referencia.



(b) Histograma de los valores tomados por el factor de corrección.

Figura 7.30: Valores con corrección Steven para el sensor Oeste.

7.4. Conclusiones y elección del modelo de corrección

La tabla 7.1 muestra los resultados de los ajustes de los distintos modelos de corrección estudiados en este capítulo. Para cada uno de los indicadores estadísticos de análisis, se ha evaluado la ordenación de los modelos (valor entre paréntesis) y se ha indicado el valor para el estadístico $\mu_{0.99}$. La ordenación global se ha realizado aplicando el método de agregación no paramétrica de clasificaciones, descrito en el apartado 9.2.3.

Tabla 7.1: Ajuste de los modelos de corrección de la medida de irradiancia difusa.

Modelo	**MBD** [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	**RMSD** [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	$\mathbf{R^2}$ [-]	$\mu_{\mathbf{0.99}}$ [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]
Sensor Norte				
Sin corregir	−11.0758 (7)	13.7068 (7)	0.9866 (7)	−11.3630 (7)
Corr. geométrica	−6.5450 (6)	8.1586 (6)	0.9999 (3)	−6.8255 (6)
Batlles A	0.0973 (2)	0.7008 (3)	0.9997 (5)	+0.2427 (3)
Batlles B	0.0090 (1)	0.6548 (2)	0.9997 (4)	+0.1167 (1)
LeBaron	0.880 (3)	0.5570 (1)	1.0000 (1)	+0.1827 (2)
Muneer & Zhang	−3.455 (4)	4.501 (4)	1.0000 (2)	−3.884 (4)
Steven	−4.8148 (5)	6.2159 (5)	0.9955 (6)	−5.3790 (5)
Sensor Sur				
Sin corregir	−6.8892 (6)	12.7829 (6)	0.9762 (7)	−7.3208 (6)
Corr. geométrica	1.5944 (4)	2.8127 (2)	0.9991 (2)	+2.0227 (4)
Batlles A	3.163 (5)	7.7595 (5)	0.9886 (6)	+4.3711 (5)
Batlles B	0.6874 (2)	3.7210 (3)	0.9921 (4)	+1.4638 (3)
LeBaron	+0.2792 (1)	2.2450 (1)	0.9987 (3)	−0.6931 (1)
Muneer & Zhang	−0.9096 (3)	4.0412 (4)	0.9992 (1)	−1.3919 (2)
Steven	−10.3665 (7)	13.9386 (7)	0.9967 (5)	−12.2062 (7)
Sensor Este				
Sin corregir	−10.8913 (7)	13.9940 (7)	0.9768 (7)	−11.2289 (7)
Corr. geométrica	−4.2441 (5)	4.8546 (5)	1.0000 (1)	−4.7014 (5)
Batlles A	+0.0285 (1)	0.7389 (1)	1.0000 (2)	+0.1600 (1)

Continúa en la página siguiente.

Continuación de la página anterior.

Batlles B	+0.0783 (2)	0.7435 (2)	1.0000 (3)	+0.2079 (2)
LeBaron	+0.1545 (3)	0.9041 (3)	1.0000 (4)	+0.2946 (3)
Muneer & Zhang	−6.3097 (6)	7.7435 (6)	1.0000 (5)	−6.6826 (6)
Steven	+1.1354 (4)	2.3799 (4)	0.9994 (6)	+1.4960 (4)
Sensor Oeste				
Sin corregir	−9.6623 (7)	13.5927 (7)	0.9700 (7)	−10.0396 (7)
Corr. geométrica	−3.7057 (5)	4.8596 (5)	0.9995 (2)	−4.3731 (3)
Batlles A	+0.2345 (2)	1.0981 (1)	0.9993 (4)	+0.4274 (2)
Batlles B	+0.2701 (3)	1.1984 (3)	0.9993 (5)	+0.4491 (4)
LeBaron	+0.1179 (1)	1.1747 (2)	0.9992 (6)	+0.2997 (1)
Muneer & Zhang	−4.0240 (6)	5.2800 (6)	1.0000 (1)	−4.4603 (6)
Steven	−0.3837 (4)	1.1723 (4)	0.9994 (3)	−0.6024 (5)
Análisis global				
Sin corregir	7 (0.001)	7 (0.001)	7 (0.001)	7 (0.001)
Corr. geométrica	6, 5 (0.001)	4 (0.001)	1 (0.001)	4 (0.001)
Batlles A	3 (0.001)	2, 3 (0.001)	5 (0.001)	3 (0.001)
Batlles B	2, 1 (0.001)	3, 2 (0.001)	4 (0.001)	2 (0.001)
LeBaron	1, 2 (0.001)	1 (0.001)	3 (0.001)	1 (0.001)
Muneer & Zhang	4 (0.001)	5, 6 (0.001)	2 (0.001)	5 (0.001)
Steven	5, 6 (0.001)	6, 5 (0.001)	6 (0.001)	6 (0.001)

Se puede concluir que cualquier modelo de corrección, de entre los analizados, mejora los resultados de los valores brutos medidos con el dispositivo. En general, los valores de los parámetros MBSD y RMSD son bajos, y el coeficiente de correlación R^2 es muy próximo a 1. El sensor que muestra una mayor mejora es el sensor Norte. Se muestra así mismo que el estimador estadístico $\mu_{0.99}$ es claramente representativo de la bondad del modelo y resulta especialmente de gran utilidad para discernir conflictos entre los valores tomados de MBD y RMSD.

En vista de los resultados, se puede concluir que el modelo más adecuado para la orientación Norte ha sido el modelo de Batlles B, para la orientación Sur, el modelo de LeBaron, para la orientación Este el modelo Batlles A y para la orientación Oeste el modelo de

LeBaron nuevamente.

En términos globales, la suma no paramétrica de las ordenaciones propuestas para cada orientación indican que el mejor modelo es el de LeBaron, que alcanza la posición más alta de la clasificación para los parámetros MSD, RMSD y $\mu_{0.99}$ para un nivel de significación $\alpha \geq 0.001$ (valor entre paréntesis). Aunque alcanza el tercer puesto en el análisis del coeficiente de determinación, éste apenas resulta representativo pues las diferencias se sitúan en el entorno de las milésimas. Además, como se indica en la bibliografía, como por ejemplo en [Martínez-Rodríguez, 2005], los coeficientes R^2 no suelen ser comparables entre modelos. Por su propia definición, si se varían los estimadores en número y forma, su significado cambia. Puede probarse que cuando se añade una variable al modelo, la suma residual siempre disminuye, favoreciendo al modelo más amplio aunque el conjunto de nuevos estimadores no sean explicativos.

El modelo de corrección de LeBaron tiende a subestimar en la orientación Sur, y a sobrestimar en las demás. La mayor diferencia estimada en base al parámetro $\mu_{0.99}$ es inferior a 1 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ en cualquier caso.

PARTE III: ESTUDIOS REALIZADOS

Caracterización de la irradiancia difusa: identificación y análisis de los tipos de cielo mediante el prototipo diseñado y evaluación de los modelos de transposición.

Capítulo 8

Identificación y caracterización de los tipos de cielo en Burgos

8.1. Introducción

Las condiciones del cielo (despejado, con claros, cubierto...) guardan una estrecha relación con la distribución de radiancia en la atmósfera. Su determinación resulta, por tanto, fundamental para optimizar la estimación de la irradiancia incidente sobre una superficie cualquiera. No obstante, debido a la complejidad y la equipación necesaria, los estudios de identificación y caracterización de cielos aún no están muy extendidos y, por primera vez se realiza un estudio de este tipo en Burgos (42.351°N, −3.688°E). En este capítulo se adaptan dos métodos para poder llevarlo a cabo mediante el equipo MK6 diseñado. Además, con los resultados obtenidos, se han analizado los valores tomados por los índices de claridad clásicos para cada tipo de cielo según el Estándar CIE. Estos índices son generalmente más sencillos de obtener, dado que sólo requieren medidas en el plano horizontal.

El capítulo se estructura en tres secciones. En primer lugar se hace un análisis en detalle del índice de claridad k_t y de la fracción difusa k_d utilizados de forma clásica para caracterizar las condiciones radiativas en un instante dado. Se evalúan sus distribuciones en función de la fracción de tiempo y de la masa óptica relativa de aire, así como la relación entre ambos modelizada según 5 modelos típicos de la bibliografía. A continuación, se exponen los dos métodos de análisis adoptados para la identificación de los tipos de cielo mediante el dispositivo MK6 y se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, se realiza un estudio de los valores de 9 índices de claridad en función de los 15 Estándares CIE.

8.2. Análisis de los índices k_t y k_d

Dos de los parámetros más extendidos en la literatura, por su sencillez y representatividad de las condiciones atmosféricas, son el índice de claridad k_t y la fracción difusa k_d. Es por ello que se realiza a continuación un pequeño estudio pormenorizado de ambos, en relación con su distribución de valores, su distribución temporal y la masa óptica relativa de aire promedio, para el periodo de estudio. Además, se ha completado con la evaluación de las fracciones difusas correspondientes a superficies orientadas según las direcciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste, entendidas éstas como los cocientes:

$$k_d(\gamma_p) = \frac{D(\pi/2, \gamma_p)}{G(0)}, \tag{8.1}$$

siendo γ_p el ángulo acimutal del sensor. Propiamente, el cociente de la expresión anterior debería ser el valor de irradiancia global de la misma superficie, pero el parámetro expresado así resulta de menor interés porque requeriría la evaluación de la irradiancia global sobre la misma superficie, que no se suele medir habitualmente.

8.2.1. Función de distribución de densidad

La figura 8.1 muestra las funciones de distribución de densidad de probabilidad de los parámetros k_t y k_d medidos[1]. Puede observarse en ambos casos una aproximación a una distribución bimodal con máximos 0.2 y 0.7 para k_t y 0.1 y 0.9 para k_d. Destaca especialmente la elevada frecuencia relativa de valores elevados de la fracción difusa, debido a que la mayor parte del periodo analizado comprende la estación invernal, caracterizada por cielos nubosos y cubiertos. Estos datos son muy característicos de las condiciones climatológicas de la zona de estudio. Prácticamente la cuarta parte de los datos evaluados indican una fracción difusa superior a 0.9 y casi el 22 % un índice de claridad de 0.2.

La figura 8.2 muestra las funciones de distribución de densidad de probabilidad para las fracciones difusas direccionales. Se observa que las cuatro son muy similares y unimodales, en contraposición con la fracción difusa horizontal. La moda en todos los casos, se sitúa en el rango $(0.5, 0.6)$ y los valores extremos son muy poco frecuentes. Destaca que no existe un comportamiento similar entre la fracción difusa horizontal y la fracción difusa sobre las superficies verticales, por lo que el conocimiento únicamente del primero no es suficiente información para realizar una modelización adecuada del potencial solar sobre otras superficies. Por otro lado, nótese que el comportamiento similar en las cuatro direcciones indica que no se observan diferencias aparentes entre aquellas superficies con mayor número de horas de incidencia solar respecto de las opuestas, en términos globales.

[1] Para facilitar la visualización del gráfico el ancho de las columnas es inferior al intervalo.

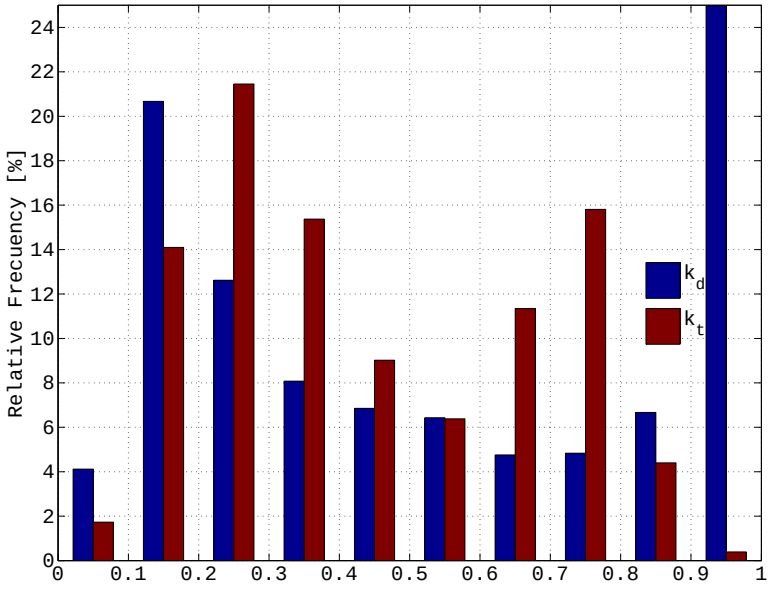


Figura 8.1: Funciones de distribución de densidad de k_t y k_d.

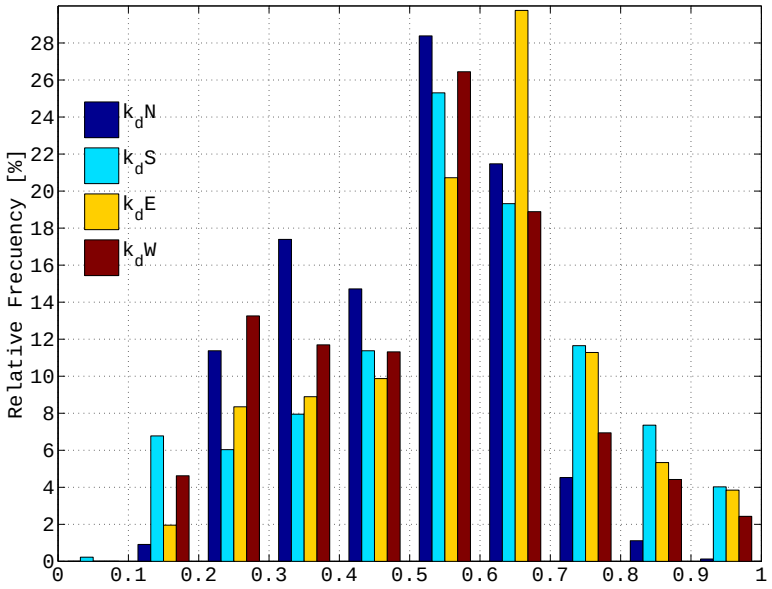


Figura 8.2: Funciones de distribución de densidad de $k_d(\gamma_p)$.

8.2.2. Análisis en función de la distribución fraccional del tiempo

El análisis en función de la distribución fraccional del tiempo es el análogo al estudio de la función de distribución acumulada de la variable, teniendo en cuenta que en la representación gráfica, los ejes aparecen invertidos, es decir, la probabilidad acumulada o fracción de tiempo se representa en el eje de abcisas, y el valor adoptado por la variable de estudio, aparece en el eje de ordenadas. Este tipo de gráficos son típicos del campo de estudio [Díez-Mediavilla, 2001].

En la figura 8.3 puede observarse el comportamiento del índice de claridad y de la fracción difusa horizontal en función de la distribución fraccional de tiempo. Se puede concluir que la mediana del índice de claridad es aproximadamente 0.4, lo que indica que el clima se caracteriza por cielos principalmente cubiertos. Además, al ser linealmente creciente, indica una distribución aproximadamente constante a lo largo del tiempo.

Por otro lado, la distribución de la fracción difusa horizontal es claramente diferente. La mediana se sitúa próxima a la unidad, reforzando la conclusión realizada en el apartado anterior de que el periodo de estudio se caracteriza por cielos eminéntemente cubiertos. De acuerdo a la fracción difusa horizontal, menos del 20 % de los datos corresponden a cielos claros.

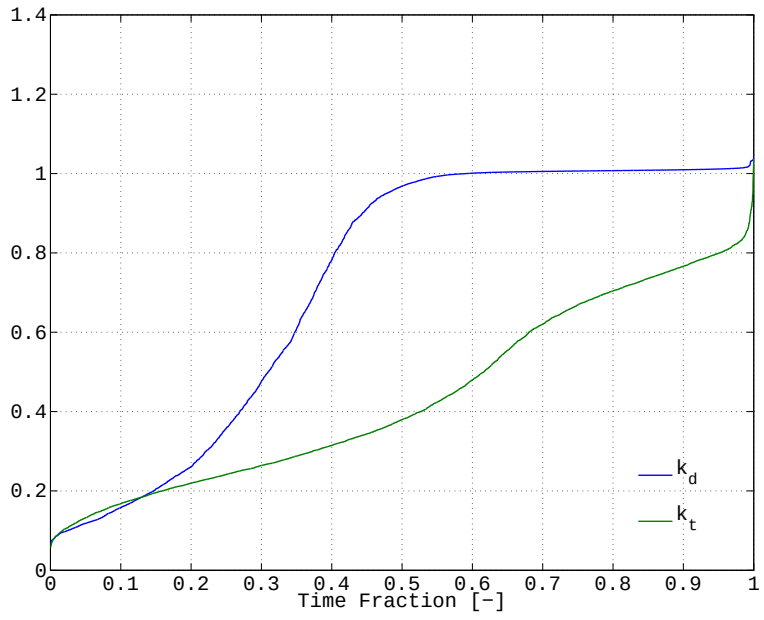


Figura 8.3: k_t y k_d en función de la distribución fraccional del tiempo.

La figura 8.4 muestra la distribución las fracciones difusas según planos orientados en

la direcciones cardinales en función del tiempo. Su comportamiento nuevamente dista en gran medida del adoptado por la fracción difusa horizontal. Su distribución es, en general, monótona creciente en las cuatro direcciones y el valor de la mediana se sitúa próximo a 0.6. La dirección que presenta mayores valores de fracción difusa es la dirección Sur, en contraposición con la dirección Norte. Las direcciones Este y Oeste muestran un comportamiento similar.

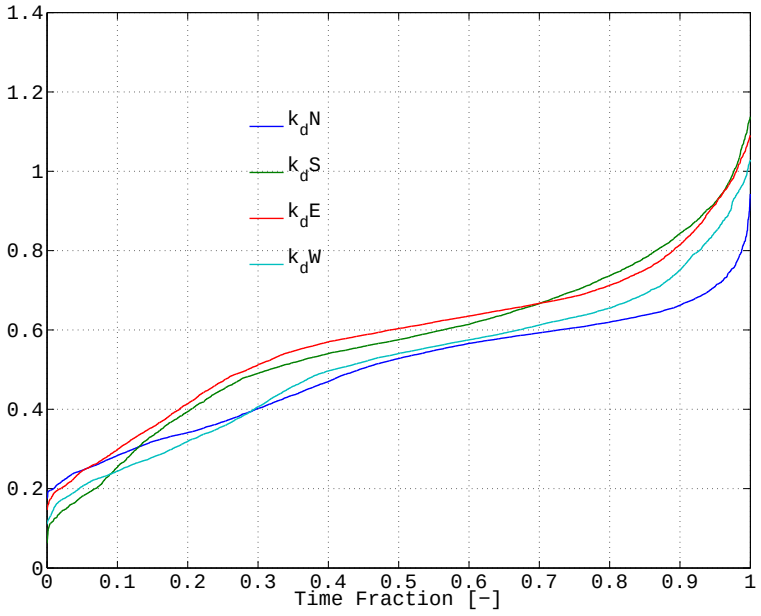


Figura 8.4: $k_d(\gamma_p)$ en función de la distribución fraccional del tiempo.

8.2.3. Análisis en función de la masa óptica relativa de aire

Finalmente, se ha analizado la distribución de los parámetros anteriormente indicados en función de la masa óptica relativa de aire, definida según la ecuación (A.14), incluyendo la corrección por presión atmosférica. Se han evaluado únicamente los tres intervalos de la masa óptica relativa de aire más representativos: $(0.5, 1.5]$[2], $(1.5, 2.5]$ y $(2.5, 3.5]$. Recuérdese que este índice corresponde aproximadamente con el inverso del coseno del ángulo cenital solar, por lo que los intervalos representados corresponden con 0°, 60° y 70.5^o de ángulo cenital solar (θ_{zs}) respectivamente. Los resultados se muestran en la figura 8.5.

La primera subfigura de la figura 8.5 muestra la distribución de la fracción difusa hori-

[2]Para homogeneizar la notación de los intervalos se han representado de igual amplitud, aunque físicamente, siempre se verifica que el valor de $m \geq 1$.

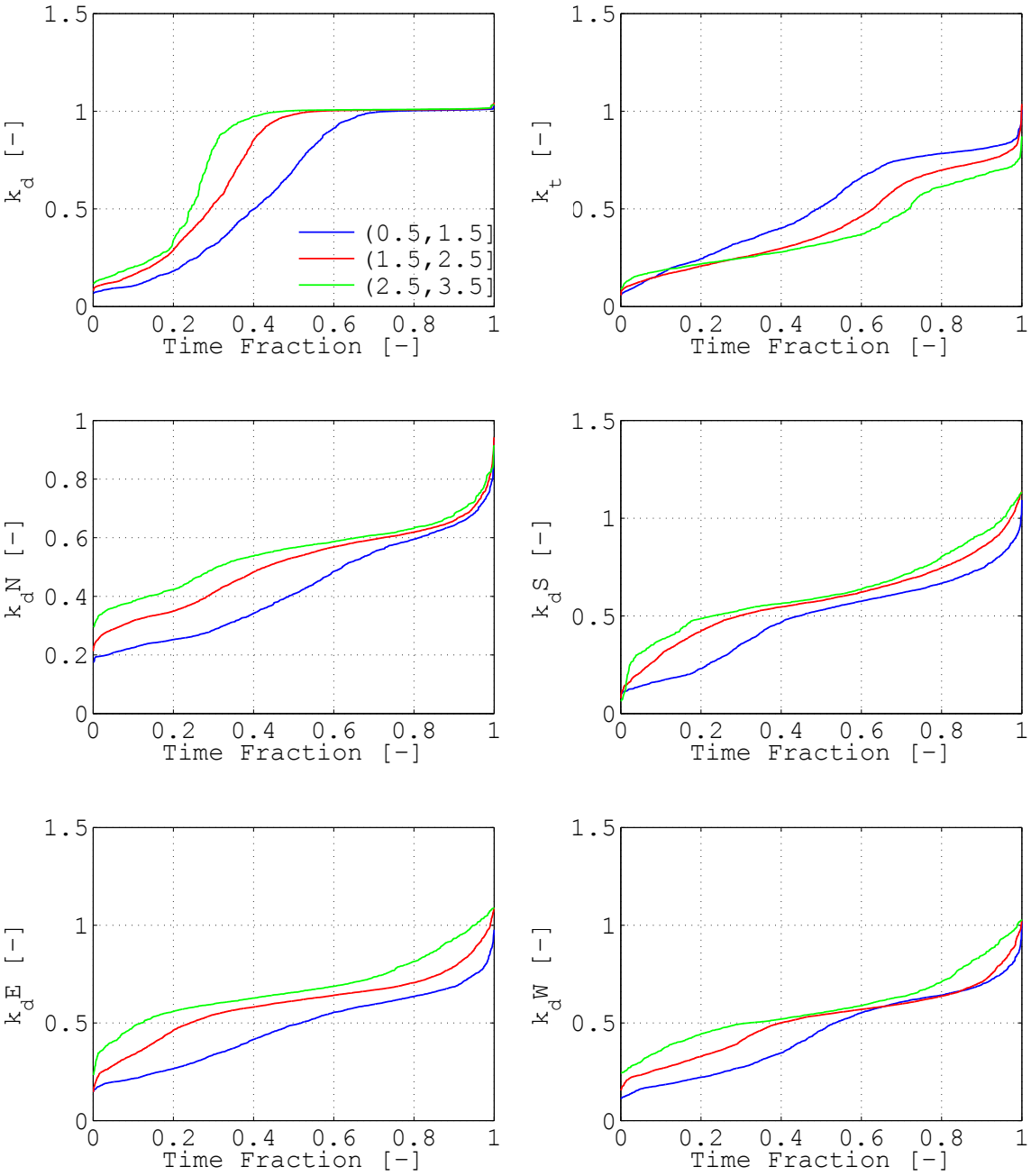


Figura 8.5: Distribución en función de la masa óptica relativa de aire.

zontal, respecto a la fracción de tiempo, para los tres intervalos de masa óptica relativa de aire indicados. Se observa que cuanto menor es la masa de aire menor es el valor de la fracción difusa, indicando que para ángulos cenitales elevados el cielo tiende a estar más despejado.

La segunda subfigura analiza el comportamiento del índice de claridad, observándose muy escasas diferencias entre los tres intervalos de masa de aire. En este caso, cuanto menor es el valor de la masa de aire, mayor es el valor de k_t, como era de esperar, en base al comportamiento de la fracción difusa.

El resto de subfiguras muestran la evolución de las fracciones difusas direccionales definidas según (8.1). Los cuatro parámetros muestran un comportamiento muy similar y más parecido al del índice de claridad que al de la fracción difusa horizontal en cuanto a la evolución respecto a la fracción de tiempo. Sin embargo, al igual que la fracción difusa horizontal, cuanto menor es el valor de la masa óptica relativa de aire, menor es el valor de la fracción difusa direccional.

8.2.4. Relación entre el índice de claridad y la fracción difusa

De los modelos evaluados se observa que aquellos que producen un menor valor de MBD y RMSD son el modelo de Muneer & Saluja y el modelo de Boland et al. El primero tiende a sobrestimar ligeramente, mientras que el segundo tiende a subestimar. No obstante, el valor de RMSD de los 5 modelos es muy similar y próximo al 20 % del valor de k_d observado. Se deduce que el excelente ajuste del modelo de Muneer & Saluja es en gran parte debido a considerar que la fracción difusa tiende a aumentar ligeramente en el último intervalo del índice de claridad. No obstante, el modelo de Boland et al. presenta la ventaja de ser derivable en todo el rango de k_t.

8.3. Frecuencia de los cielos Estándar CIE

Utilizando las medidas tomadas por el equipo MK6 diseñado, se ha realizado un estudio de caracterización de los cielos Estándar CIE que han tenido lugar desde septiembre de 2014 a abril de 2015 a intervalos diez minutales. Para realizar la identificación de la tipología de cielo se han seguido dos procedimientos, que se detallan a continuación.

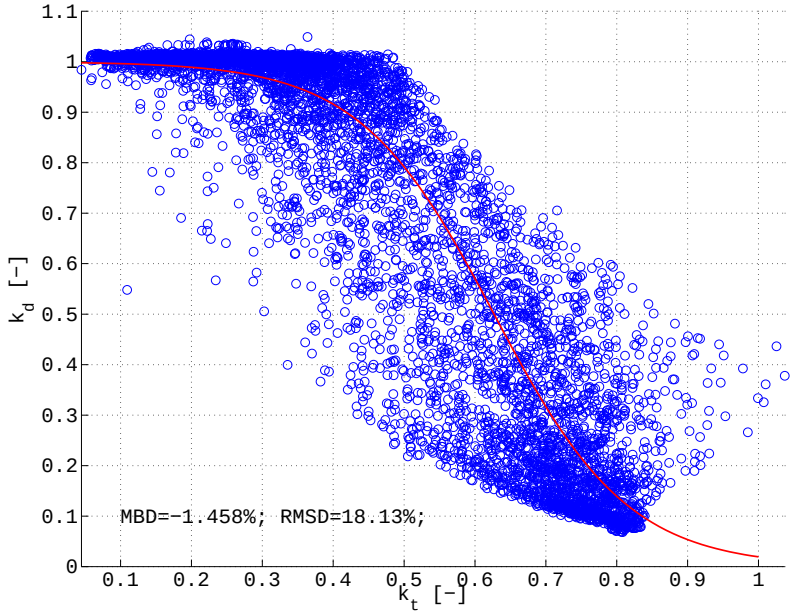


Figura 8.6: Modelo de Boland et al. para la relación $k_d = f(k_t)$.

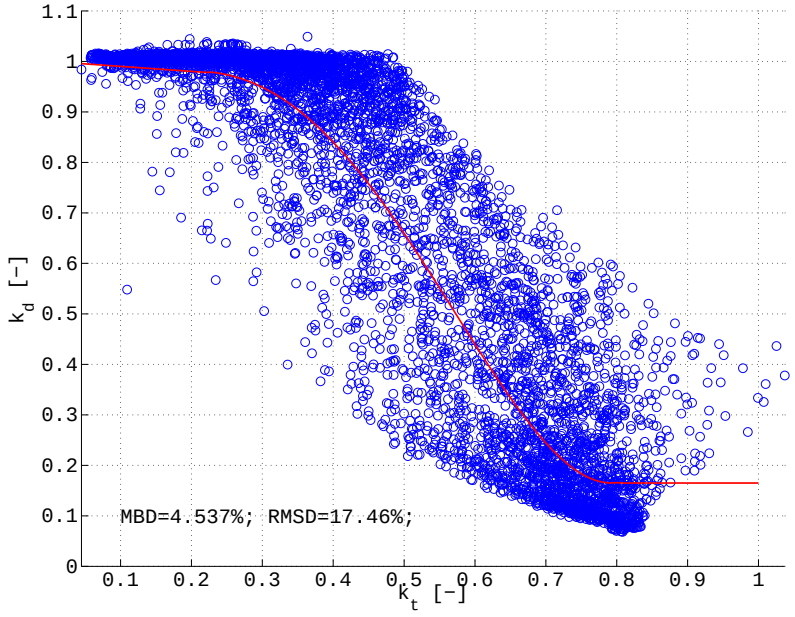


Figura 8.7: Modelo de Erbs et al. para la relación $k_d = f(k_t)$.

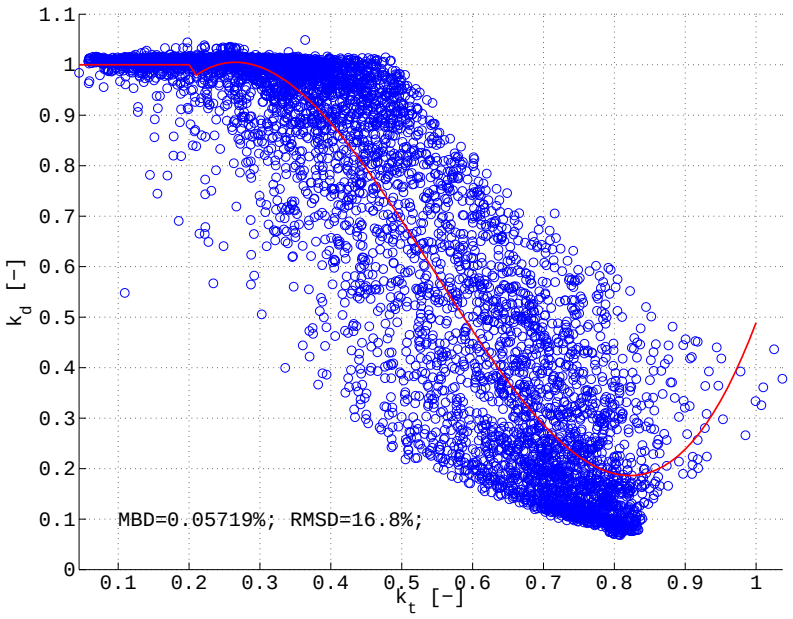


Figura 8.8: Modelo de Muneer & Saluja para la relación $k_d = f(k_t)$.

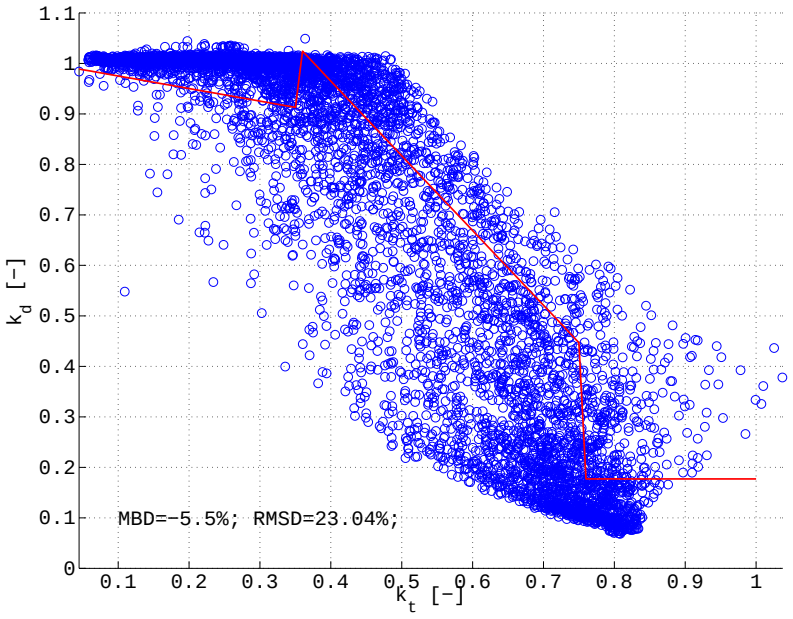


Figura 8.9: Modelo de Orgill & Hollands para la relación $k_d = f(k_t)$.

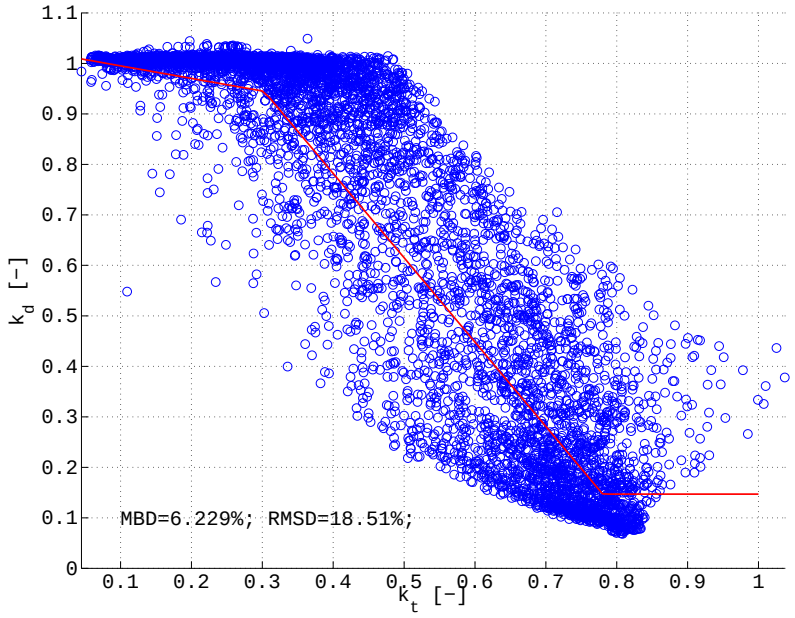


Figura 8.10: Modelo de Reindl et al. para la relación $k_d = f(k_t)$.

Procedimiento A

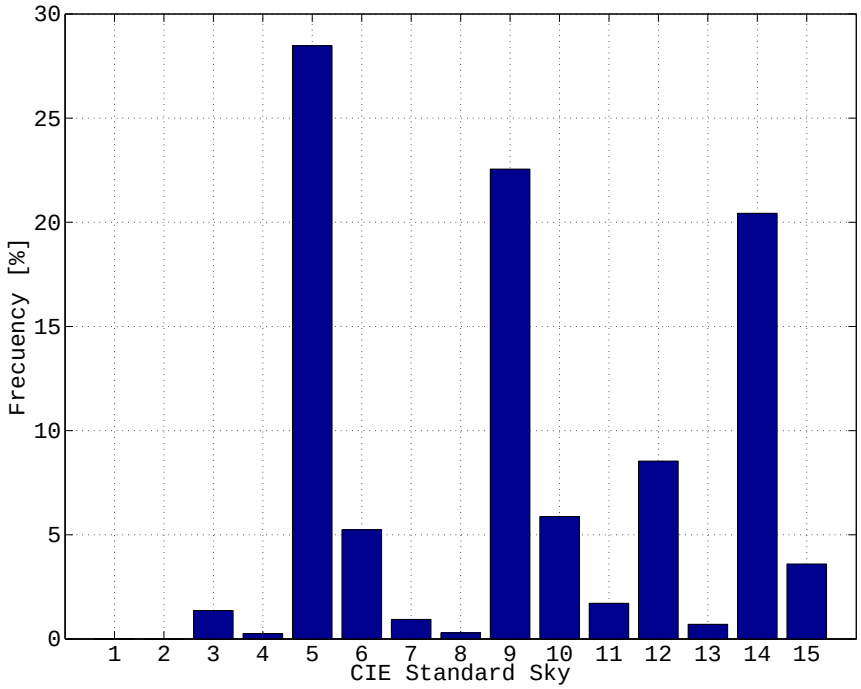
Este procedimiento consiste en comparar los valores de irradiancia difusa vertical en las cuatro direcciones cardinales con las estimaciones dadas por los distintos Estándares CIE. A partir del valor de irradiancia difusa horizontal, $D(0)$, es posible determinar el valor de radiancia cenital I_z, mediante la expresión (1.94). Integrando adecuadamente la función de radiancia, $i(\theta, \gamma) = g(\theta)f(\xi)$, en las coordenadas horizontales que definen al cuadrante de la bóveda celeste observado por cada sensor y multiplicando por la radiancia cenital calculada, se puede determinar el valor estimado de irradiancia vertical según la dirección deseada:

$$D(\pi/2, \gamma_p) = I_z \int_{\gamma_p - \pi/2}^{\gamma_p + \pi/2} \int_0^{\pi/2} i_r(\theta, \gamma) \cos \xi_p \sin \theta d\theta d\gamma. \tag{8.2}$$

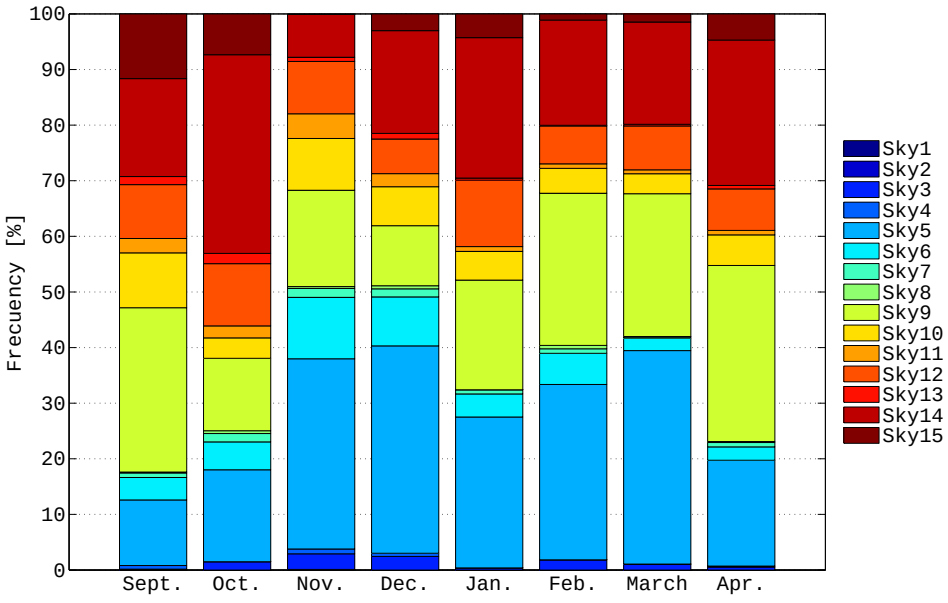
A cada una de las condiciones analizadas se la clasificará y asociará con el tipo de cielo Estándar CIE que minimice la raíz de la diferencia relativa cuadrática media para las cuatro direcciones, evaluada como:

$$\mathrm{RMSD}_r = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^{4} \left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right)^2}, \tag{8.3}$$

siendo $\hat{y}_i$ el valor estimado de irradiancia difusa vertical en la dirección i-ésima (Norte, Sur, Este y Oeste), e y_i el valor observado.

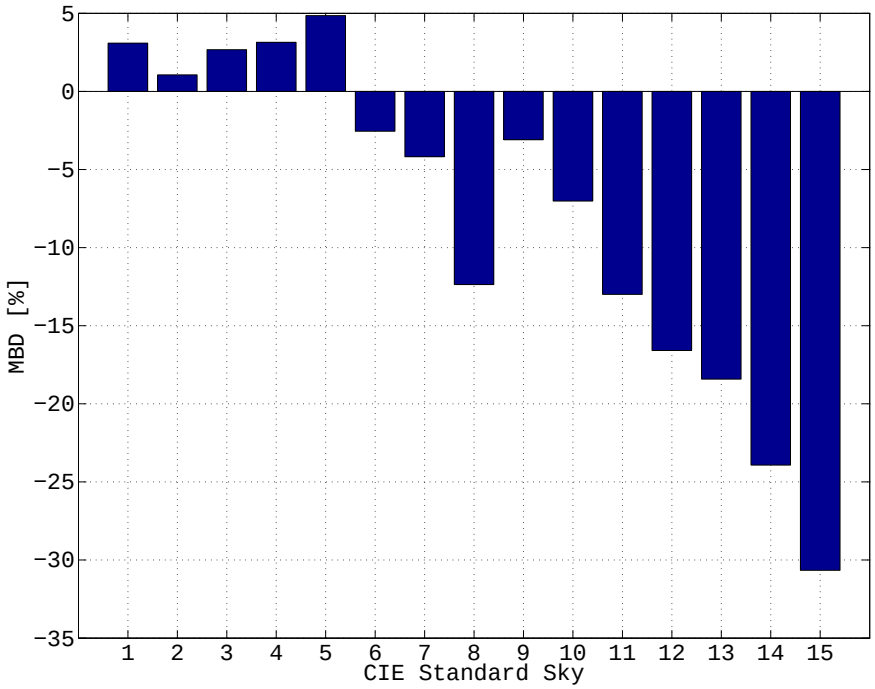


(a) Frecuencias durante todo el periodo de estudio.

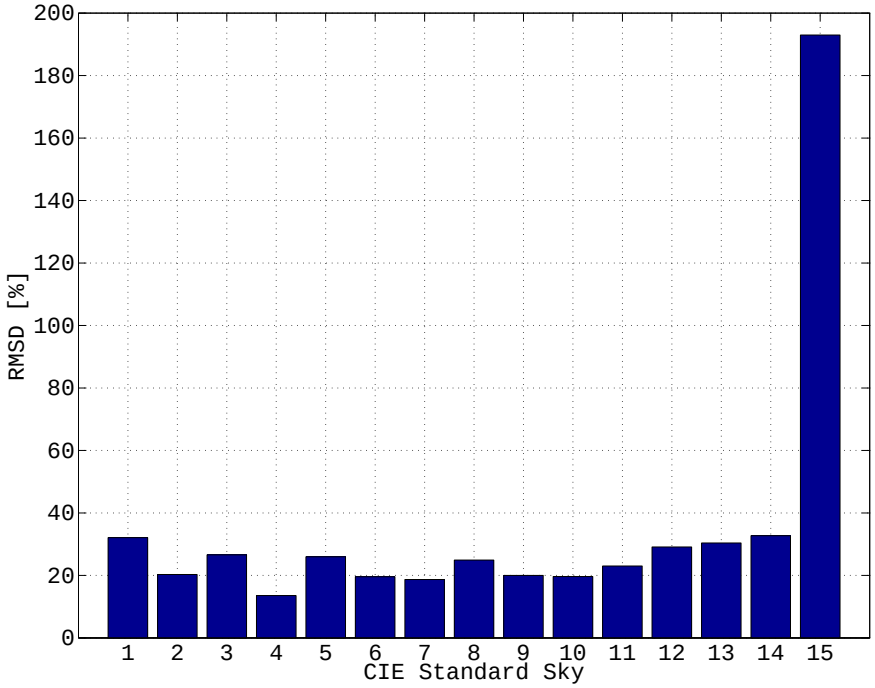


(b) Distribución de frecuencias mensuales.

Figura 8.11: Frecuencia de los cielos Estándar CIE (proc. A).

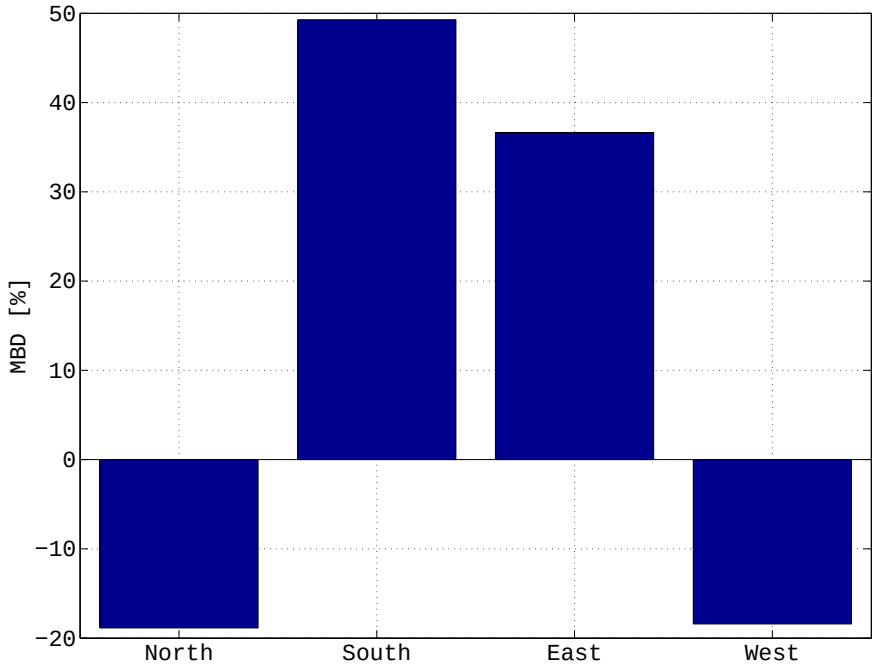


(a) MBD en función del Estándar CIE.

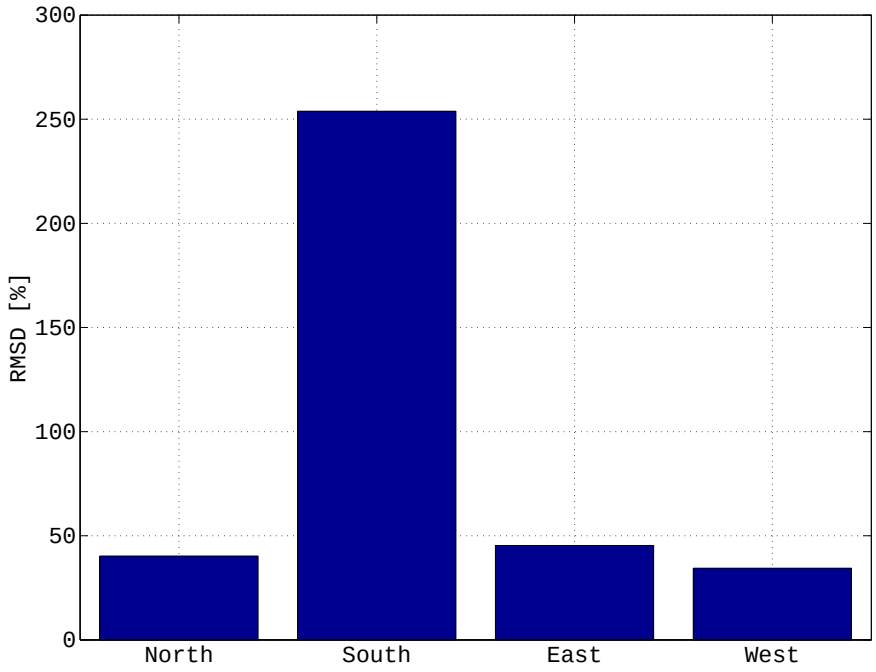


(b) RMSD en función del Estándar CIE.

Figura 8.12: Diferencias en la clasificación del Estándar CIE (proc. A).



(a) MBD en función de la orientación.



(b) RMSD en función de la orientación.

Figura 8.13: Diferencias en la clasificación del Estándar CIE por orientaciones (proc. A).

La figura 8.11 muestra las frecuencias obtenidas para los distintos Estándares CIE en la muestra de estudio. La subfigura (a) expone las frecuencias relativas a lo largo de toda la muestra, mientras que la subfigura (b) indica las distribuciones mensuales. Puede observarse, que de acuerdo a este procedimiento, casi el 30 % de los instantes analizados se clasificarían como un cielo Estándar 5 y más del 40 % se asocian a Estándares 9 y 14. Apenas se han registrado casos de Estándares 1, 2, 4 y 8.

Atendiendo a la distribución mensual, la distribución de los Estándares es muy similar en todos los casos, variando únicamente de forma destacada, la distribución del Estándar 14, que representa entre el 23 y el 35 % de los casos en los meses de septiembre y octubre, pero apenas el 20 % en el resto. La proporción de cielos clasificados según el Estándar 5 ha ido aumentando según avanza el periodo, salvo en el mes de enero.

De acuerdo a las descripciones de los distintos Estádares, dada en la tabla 3.9, parece coherente la elevada frecuencia de cielos caracterizados como Estándar 5 pues son cielos cubiertos y escasa gradiancia, característicos del periodo invernal analizado. Sorprende entonces la alta frecuencia de los cielos clasificados como tipo 14, propios de atmósferas despejadas y claras. No obstante, debe tenerse en cuenta que la mayoría de los cielos así clasificados se asocian a los meses de septiembre y octubre, que en el año 2014 fueron meteorológicamente atípicos y más propios de periodos primaverales.

Las figuras 8.12 y 8.13 muestran las diferencias de sesgo (MBD) y cuadráticas (RMSD) relativas a los valores observados, por tipos de cielo y orientaciones. Se puede apreciar en la primera de las figuras citadas que los Estándares 1 a 5 tienden a sobrestimar ligeramente, con diferencias de sesgo menores al 5 %, mientras que el resto de Estándares presentan mayor tendencia a subestimar, aumentando la diferencia de sesgo hasta el 30 % en el caso del Estándar 15. Las diferencias cuadráticas se sitúan prácticamente en todos los Estándares entre el 20 y el 30 %, salvo nuevamente el caso del Estándar 15, donde llama la atención que el valor de RMSD alcanza casi el 200 % respecto del valor observado de irradiancia difusa. Este fenómeno podría apuntar a un posible error de clasificación, bien por condiciones meteorológicas inestables, errores en la medición, o presencia de escasas nubes, pero que ocultan total o parcialmente el disco solar.

Si se analiza la figura 8.13 puede determinarse la diferencia entre los valores estimados por la adecuación al Estándar y los valores registrados en las diferentes orientaciones. Obsérvese que las orientaciones Norte y Oeste tienden a ser sub-estimadas, caso contrario de las orientaciones Sur y Este. Los valores extremos de MBD y RMSD corresponden a la orientación Sur.

Aunque los valores de MBD y RMSD relativos aquí indicados pueden parecer elevados en comparación con los obtenidos por otros autores, como por ejemplo [Li et al., 2014], debe tenerse en cuenta que aquí se están expresando en función del valor observado de irra-

diancia difusa, y no de irradiancia global. Esto afecta significativamente a los resultados, especialmente cuanto mayor es la componente de irradiancia directa.

Procedimiento B

La aplicación del procedimiento A presenta dos problemas fundamentales:

1. Requiere de un excesivo tiempo de cómputo pues, para la identificación de cada Estándar requiere calcular, normalmente mediante procedimientos de integración numérica[3], la irradiancia en cuatro direcciones y para 15 Estándares más el cálculo de la radiancia cenital. Es decir, el número de operaciones de integración es:

$$o_A = (4+1)15n, \tag{8.4}$$

   siendo o_A el número de operaciones requeridas y n el número de datos de la muestra (recordemos que en nuestro caso más de 6 000).

2. Dado que no se dispone de la instrumentación necesaria para determinar la radiancia de múltiples puntos de la bóveda y evaluar el ajuste de la función de radiancia, ésta se evalúa mediante resultados de integración, pudiéndose obtener varios Estándares posibles para una determinada situación.

Como mejora del procedimiento A, y fundamentado en los métodos descritos en la bibliografía, como por ejemplo [Igawa et al., 2004, Li et al., 2013, Igawa, 2014, Li et al., 2014], se plantea un segundo algoritmo para la determinación del Estándar CIE que mejor ajuste a unas condiciones de radiancia dadas. Dicho algoritmo se descompone en los siguientes pasos:

1. Para la condición objeto de estudio se calcula los ángulos θ_{sp} correspondientes a cada una de las direcciones cardinales, según las expresiones (A.43) ó (A.44).

2. Se observa que, de forma universal para cualquier latitud geográfica ϕ_g el cociente entre las irradiancias difusas medidas en dos superficies verticales opuestas, como por ejemplo, Este-Oeste o Norte-Sur, para los 15 tipos de cielos Estándar CIE se organizan aproximadamente en 6 grupos, tal y como muestra la figura 8.14. La tabla 8.1 indica los Estándares que pertenecen a cada grupo. Obsérvese en la mencionada figura que, para un ángulo θ_{sp} comprendido entre 0 y 90º ninguno de los grupos se cruzan entre sí, y que para ángulos entre 15 y 45º, las diferencias son máximas. Debe

[3] No se puede calcular de forma exacta la integral de la función de radiancia para ningún Estándar salvo los tipos 1, 3 y 5.

tenerse en cuenta que la distribución de las curvas en función del ángulo θ_{sp} a lo largo del año varía ligeramente. La figura 8.14 ha sido obtenida para el día del equinoccio, cuando las superficies Este y Oeste pueden presentar un ángulo $\theta_{sp} \in [0, 90]$.

Tabla 8.1: Agrupación de Estándares CIE.

Grupo	**Estándares CIE**
01	1, 3, 5
02	2, 4, 6, 9
03	7, 10
04	8, 11, 12
05	13, 14
06	15

Obsérvese que entonces, mediante el cociente de las irradiancias difusas sobre dos superficies verticales opuestas, es posible determinar el grupo al que pertenecen y reducir así el problema de clasificación de 15 Estándares a un máximo de 4 Estándares diferentes (grupo 2). La identificación al grupo se realiza como aquel que presente una menor diferencia cuadrática respecto del valor observado.

3. Una vez identificado el grupo, se observa que el cociente entre la irradiancia difusa vertical y la irradiancia difusa horizontal R_d para una determinada dirección, genera curvas respecto del ángulo θ_{sp} que no se cruzan, es decir, que un determinado valor de R_d sólo puede pertenecer a un único Estándar CIE. La figura 8.15 muestra, para cada uno de los grupos descritos, la apariencia de dichas curvas para la componente vertical Este u Oeste de la irradiancia, para los equinoccios. La misma propiedad se observa para las componentes Norte o Sur, pero sus curvas son diferentes[4].

   Se obtiene de esta forma una condición unívoca para realizar la identificación del tipo de cielo. Como se aprecia en la figura 8.15, las diferencias entre los Estándares dentro de cada grupo (salvo el grupo 1, donde éstas son constantes), aumentan conforme menor es el ángulo θ_{sp}, por lo que se escogerá para la clasificación aquella superficie (y su opuesta para la determinación del grupo) que presente un menor ángulo y minimizar así el posible error.

   Nuevamente, la clasificación se determinará en base a la menor distancia cuadrática entre valor de R_d observado y el dado por los Estándares CIE.

[4]Obsérvese que conforme aumenta la latitud geográfica ambos conjuntos de curvas se van aproximando hasta el solape total en el Polo, pues la vertical del lugar y el eje del mundo coinciden y las cuatro superficies presentan las mismas distribuciones del ángulo θ_{sp}, aunque desplazadas 90° respectivamente.

El procedimiento descrito no sólo minimiza la posibilidad de que varios Estándares puedan responder con la misma diferencia al valor observado, sino que también el número de operaciones de alto coste computacional disminuye drásticamente a:

$$o_B \leq (6 \cdot 2 + 4)n. \tag{8.5}$$

El número de operaciones o_B puede minimizarse aún más si se realiza una adecuada parametrización de las curvas citadas, como por ejemplo una aproximación polinómica, o el método propuesto en [Igawa, 2014].

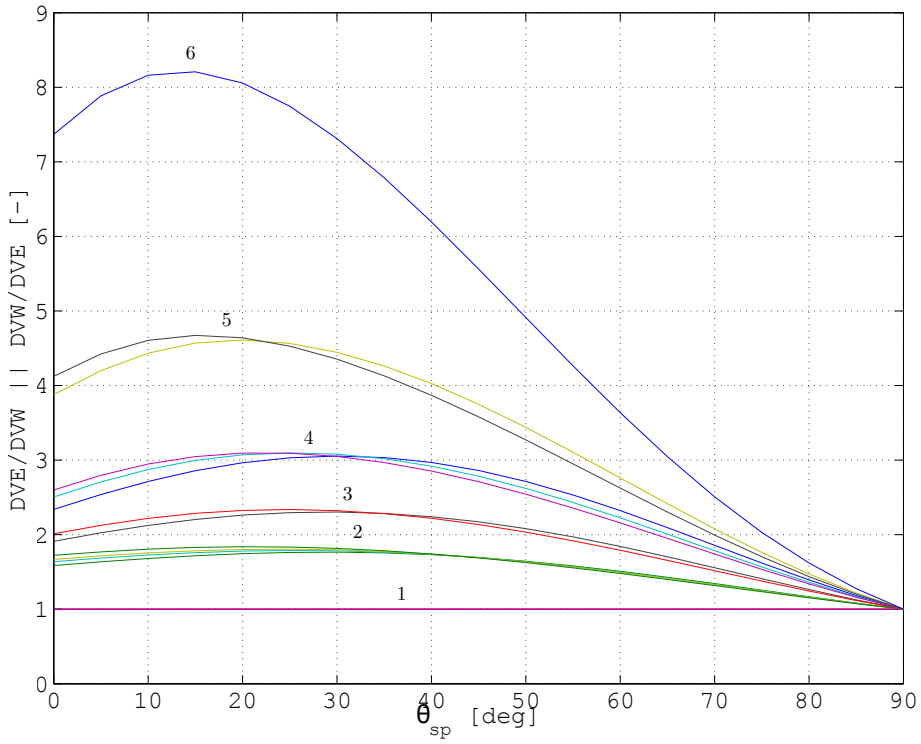
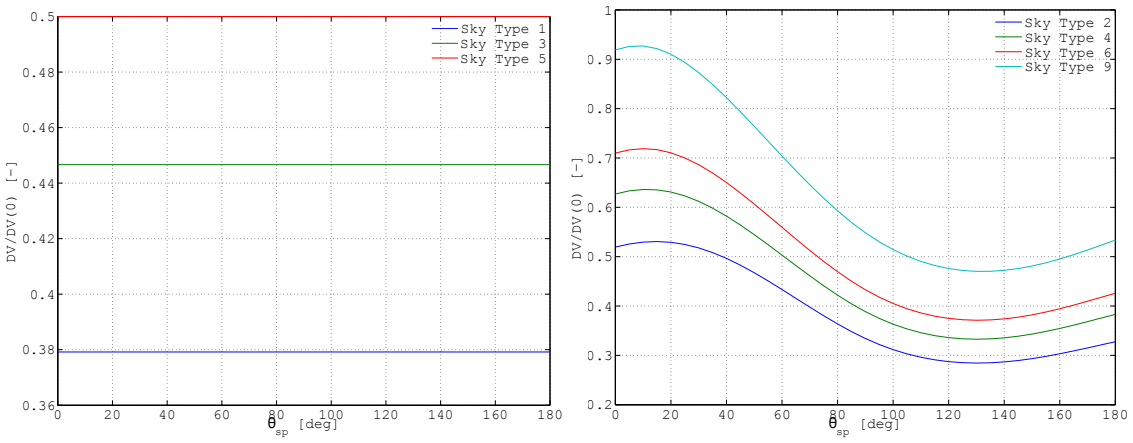


Figura 8.14: Grupos en función del cociente de irradiancias verticales.

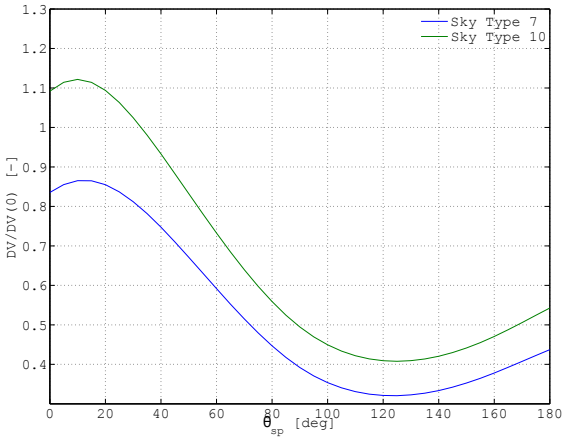
La figura 8.16 muestra las frecuencias obtenidas para los distintos Estándares CIE en la muestra de estudio según el procedimiento B. La subfigura (a) expone las frecuencias relativas a lo largo de toda la muestra, mientras que la subfigura (b) indica las distribuciones mensuales. Puede observarse, que de acuerdo a este procedimiento, casi el 40 % de los instantes analizados se clasificarían como un cielo Estándar 5 y más del 22 % se asocian al Estándar 9. La distribución resulta ciertamente similar a la obtenida en el procedimiento A. Únicamente discrepan notablemente la frecuencia de Estándares 5, 10, 14 y 15. El procedimiento A parece más proclive a identificar cielos despejados y el procedimiento B a cielos cubiertos, normalmente más complejos de identificar.

Atendiendo a la distribución mensual, se observan pocas variaciones en la distribución de los tipos de cielo a lo largo de los meses estudiados. Conforme nos acercamos a la época

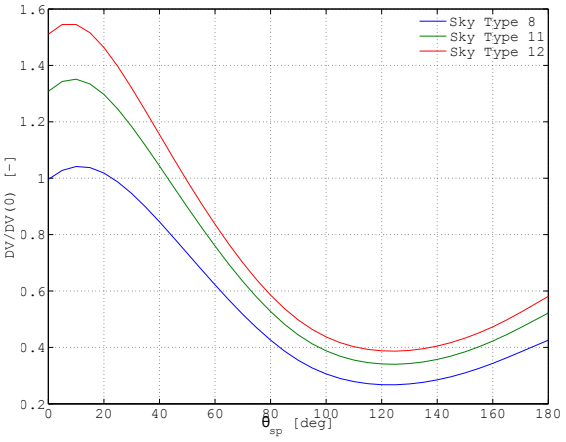


(a) Grupo 1.

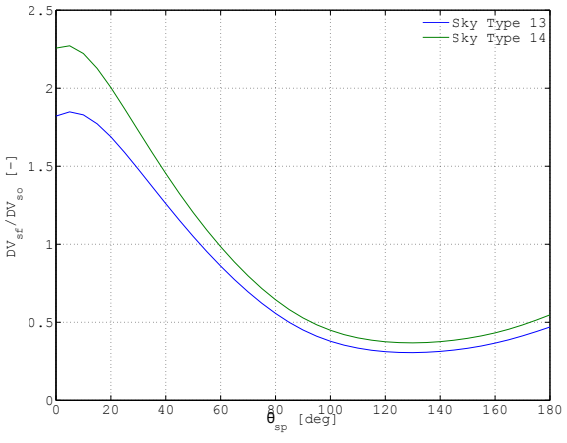
(b) Grupo 2.



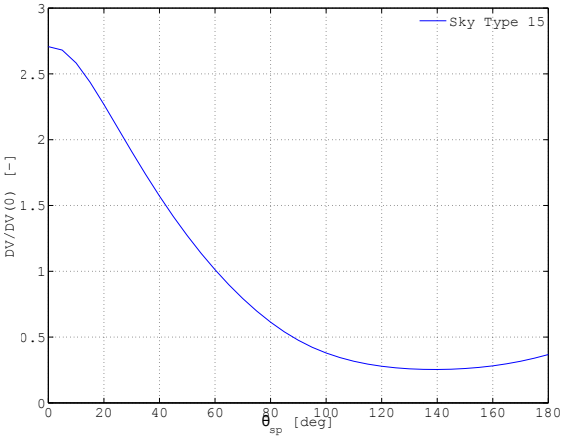
(c) Grupo 3.



(d) Grupo 4.



(e) Grupo 5.



(f) Grupo 6.

Figura 8.15: Estándares CIE en función de la proporción de la irradiancia difusa vertical.

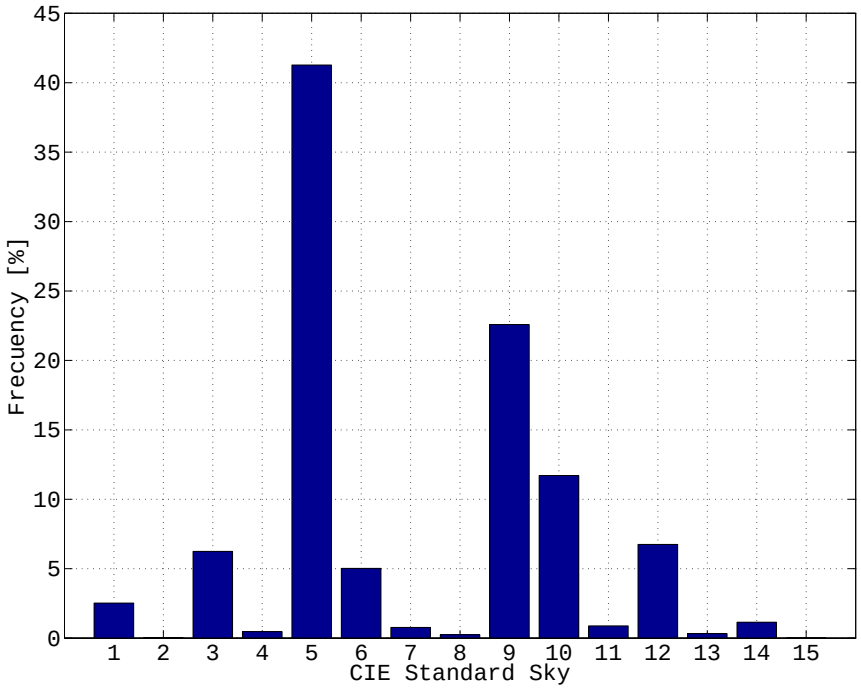
primaveral, la proporción del Estándar 5 aumenta, en detrimento de los Estándares 13, 14 y 15. El Estándar 10, que caracteriza cielos parcialmente nubosos con región circunsolar brillante es el que presenta mayores fluctuaciones a lo largo de los meses. Así mismo destaca la fuerte presencia de cielos según el Estándar 3 (cielos cubiertos con gradancia moderada y uniformidad acimutal) en los meses de noviembre, diciembre y enero.

La clasificación obtenida de acuerdo a este procedimiento parece coherente para el periodo de estudio. Era esperable una elevada frecuencia de cielos caracterizados como Estándar 5, pues describen cielos cubiertos y con escasa gradiancia, propios del periodo invernal. Por otro lado, igual que indicábamos que no era esperable una proporción tan elevada de Estándares 15 en el periodo, pero que podría ser posible dadas las condiciones atípicas para el periodo en los años 2014-2015, resulta coherente, e incluso más verosímil, la frecuencia obtenida de Estándares 9 y 10.

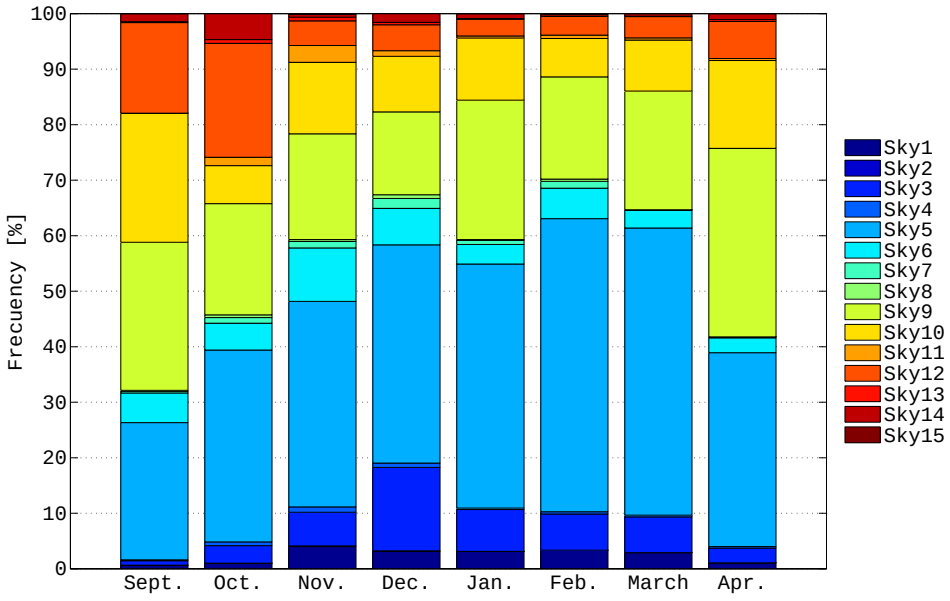
Las figuras 8.17 y 8.18 muestran las diferencias de sesgo (MBD) y cuadráticas (RMSD) relativas por tipos de cielo y orientaciones. Se puede apreciar en la primera de las figuras citadas que los Estándares 11, 13 y 15 tienden a sobrestimar ligeramente, con diferencias de sesgo menores al 3 %, mientras que el resto de Estándares presentan mayor tendencia a subestimar, aumentando la diferencia de sesgo hasta el 8 % en el caso del Estándar 5. Las diferencias cuadráticas se sitúan prácticamente en todos los Estándares entre el 5 y el 12 % (mucho menores que en el procedimiento A), salvo los Estándares 10 y 12, donde llama la atención que el valor de RMSD alcanza el 43 % y 26 % del valor observado de irradiancia difusa respectivamente. No obstante, estos valores siguen siendo notablemente inferiores al 200 % de diferencia cuadrática obtenida mediante el procedimiento A. En este caso, las diferencias, tanto MBD como RMSD, se consideran dentro de los valores esperables dadas las características del algoritmo de clasificación.

Si se analiza la figura 8.18 puede determinarse la diferencia entre los valores estimados por la adecuación al Estándar y los valores registrados en las diferentes orientaciones. Obsérvese que todas las orientaciones parecen tender a ser subestimadas, mientras que la orientación Sur presenta el menor valor de MBD, es el que alcanza la mayor diferencia RMSD. Esto indica que, aunque para esta orientación se tiende a subestimar, el modelo estima valores muy superiores al valor observado. En cualquier caso, salvo para la orientación Sur, las diferencias evaluadas son inferiores al 12 % respecto del valor observado.

Dados los resultados de los parámetros MBD y RMSD para ambos procedimientos, se considera más fiable y robusto el procedimiento de clasificación B. Muy pocos estudios de esta naturaleza se han llevado a cabo en España. En [Torres et al., 2010] se realiza un análisis mediante skyscanner en Pamplona (42.83ºN, -1.60ºE) durante el verano, mostrando una distribución similar de Estándares CIE a la obtenida en el procedimiento B expuesto, salvo los Estándares CIE 5 y 13. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que aunque los climas de ambos emplazamientos no difieren significativamente, el periodo considerado no ha sido el

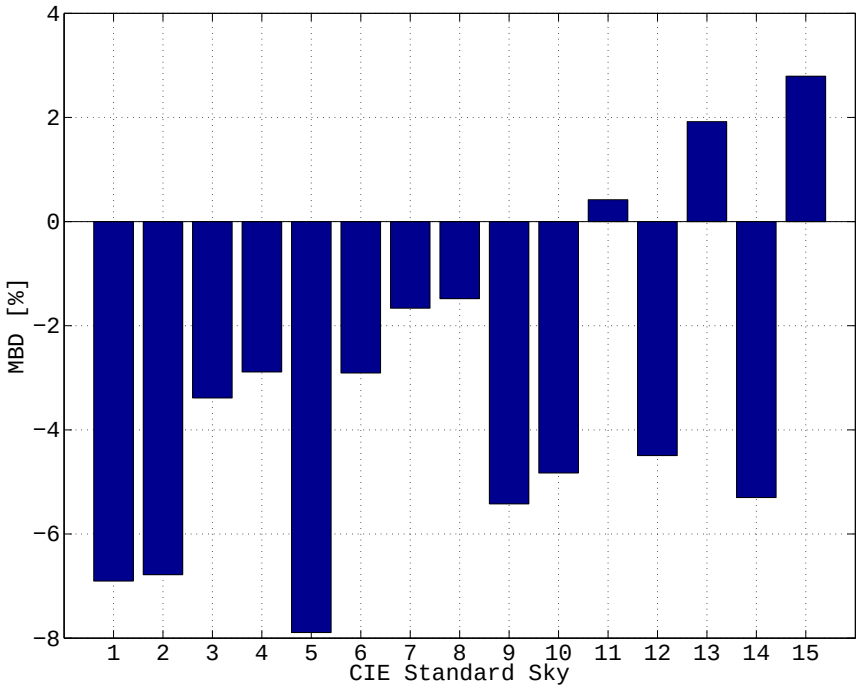


(a) Frecuencias durante todo el periodo de estudio.

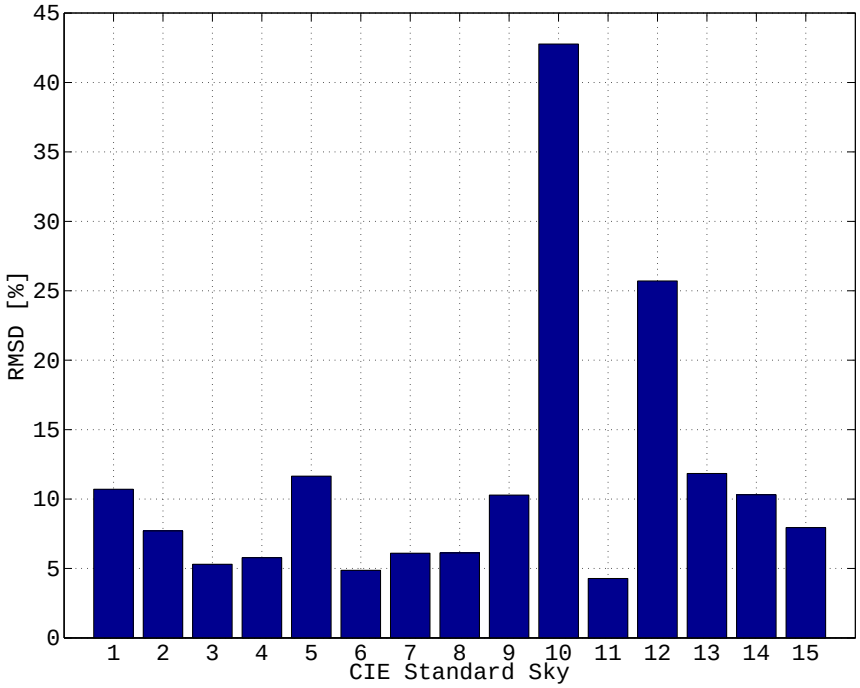


(b) Distribución de frecuencias mensuales.

Figura 8.16: Frecuencia de los cielos Estándar CIE (proc. B).

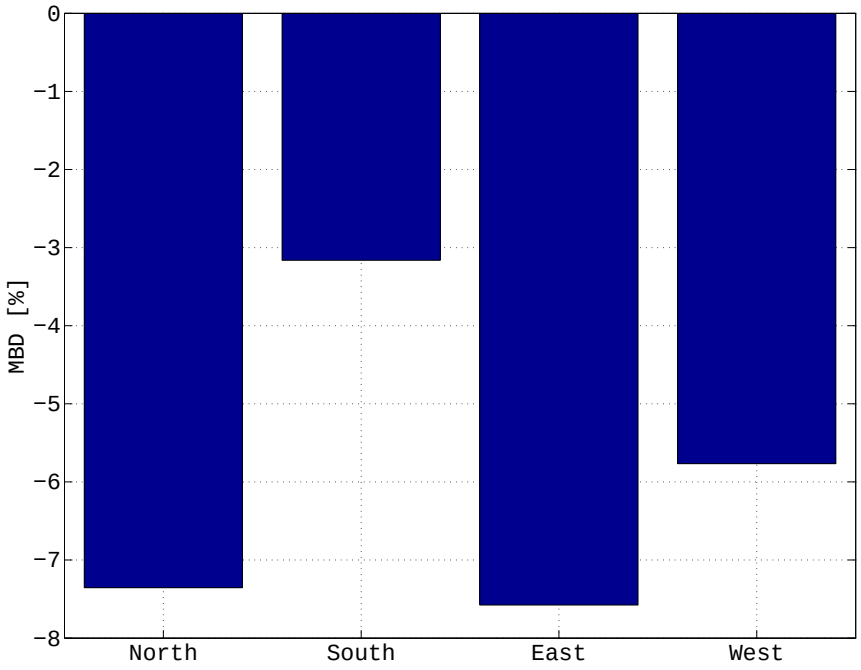


(a) MBD en función del Estándar CIE.

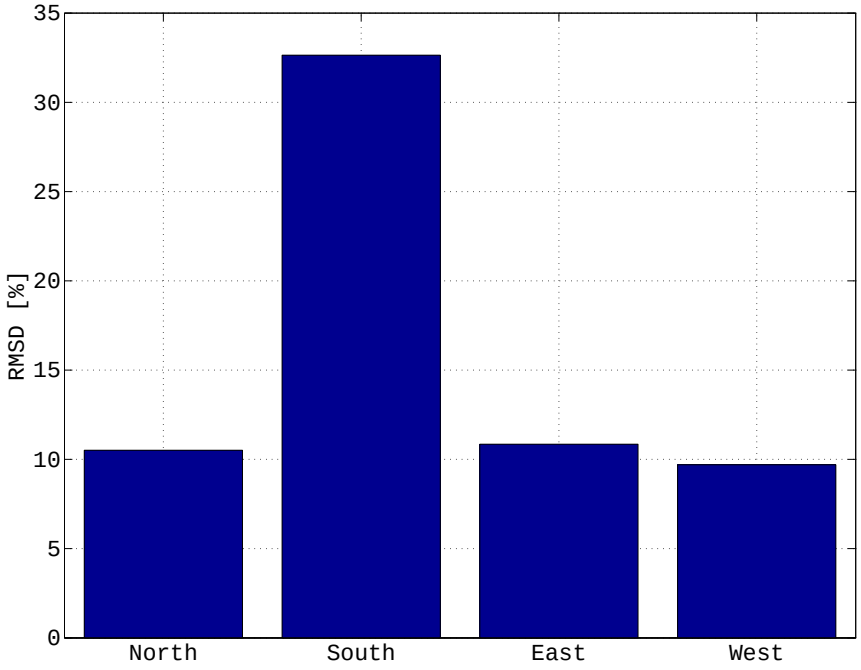


(b) RMSD en función del Estándar CIE.

Figura 8.17: Diferencias en la clasificación del Estándar CIE (proc. B).



(a) MBD en función de la orientación.



(b) RMSD en función de la orientación.

Figura 8.18: Diferencias en la clasificación del Estándar CIE por orientaciones (proc. B).

mismo, lo que puede modificar la distribución frecuencias.

8.4. Índices de claridad respecto al Estándar CIE

Tomando como referencia la clasificación de los cielos en Estándares CIE según el procedimiento B, se ha evaluado el comportamiento de los diferentes índices de claridad expuestos en la sección 3.2 de este capítulo. El análisis se ha realizado evaluando la distribución de los diferentes índices en función de los 15 Estándares CIE mediante diagramas de caja o box plots que muestran el valor de la mediana, los percentiles 0.25 y 0.75, así como los valores mínimo y máximo respectivamente. Se marcan como valores atípicos (aspas coloreadas) a aquellos que distan más de 1.5 veces la distancia intercuartílica de la mediana.

La figura 8.19 muestra el estudio realizado para la fracción difusa k_d. Puede observarse que para los Estándares 1, 2, 3, 4, 6, 7 y 8, que caracterizan cielos cubiertos, su valor siempre es muy próximo a la unidad. Para el Estándar CIE 5 el 25 % de los datos es inferior a 0.2, pero un 25 % es próximo a la unidad. Los Estándares CIE 9 y 10 presentan una mediana entre 0.70 y 0.75, mientras que los Estándares CIE 12 y 14 la mediana se sitúa entre 0.60 y 0.65. Los Estándares CIE 11 y 13 presentan una mediana comprendida entre 0.9 y 1.0. El único valor de cielo Estándar CIE 15 presenta un valor de fracción difusa de $k_d = 0.58$. Destaca el número de valores atípicos observados en el Estándar CIE 6, lo que indica una gran dispersión de este parámetro para este tipo de cielo en particular.

La figura 8.20 muestra el estudio realizado para la fracción directa k_b. Como cabía esperar por su definición, los resultados son complementarios a los de la fracción difusa analizada.

Se puede observar en la figura 8.21 el valor de la función de claridad para los distintos Estándares CIE. En términos generales destaca la escasa presencia de valores atípicos para todos los tipos de cielo, permitiendo caracterizar los distintos Estándares. Los resultados muestran que cuanto mayor es el Estándar, mayor es el valor de la mediana de este índice, salvo para los Estándares 12, 13 y 14 analizados. En todos los casos se verifica que $F \leq 0.5$.

El valor del índice de claridad k_t para cada tipo de cielo Estándar CIE se recoge en la figura 8.22. Se observa que también es un índice que presenta escasos valores atípicos y una cierta progresión en su valor conforme aumenta el número del Estándar CIE. La dispersión de sus valores es relativamente baja salvo para los Estándares CIE 5, 9 y 10, en los que puede adoptar prácticamente cualquier valor en el rango $[0, 1]$.

Los índices k_t y k_k propuestos por Batlles et al. son evaluados en las figuras 8.23 y 8.24 respectivamente. Como el criterio de Batlles et al. sólo permite identificar cielos despejados si se cumple la condición $k_t > k_{tt} \cup k_d < k_k$, se observa que aquellos Estándares corres-

pondientes a cielos cubiertos no pueden verificar nunca dicha condición, pues los valores de k_{tt} son claramente mayores que k_t, y los valores de k_k, adoptan valores inferiores a k_d. Para los Estándares correspondientes a cielos despejados, parece cumplirse el criterio en la gran mayoría de los casos.

La figura 8.25 muestra la distribución del índice de claridad de Klucher para cada Estándar CIE. El Estándar CIE 6 presenta una distribución muy heterogénea de ese índice, dado el elevado número de valores atípicos observados. Por otro lado, parece un índice poco significativo para los Estándares CIE 5, 9, 10 y 12. Para los Estándares 1, 2, 3, 4, 6, 7 y 8, aunque tiene una mucha menor dispersión tampoco permite identificarlos, pues adopta valores muy similares en el entorno de 0. En ocasiones puede tomar valores negativos, pues la irradiancia difusa horizontal puede llegar a alcanzar valores 1.2 veces superiores a los de la irradiancia global horizontal, debido fundamentalmente a los fenómenos de brightening y dimming.

En las figuras 8.26, 8.27 y 8.28 se puede evaluar la distribución de los valores de los índices indicados por Perez et al. para la descripción de las condiciones radiativas. La figura 8.26 muestra la distribución del logaritmo neperiano del índice propuesto por los autores en 1987 según la expresión (3.11) mientras que la figura 8.27 incluye los valores calculados según la expresión (3.12) propuesta por los mismos autores en 1990. En ambos casos se observa que el valor del índice sigue una distribución prácticamente similar para cada tipo de cielo Estándar CIE y, para los Estándares CIE 5, 9, 10, 12 y 14 adopta valores muy elevados en comparación con el límite mínimo de 6.2 indicado por los autores para cielos despejados. No obstante, para cielos cubiertos o parcialmente cubiertos sí parece corresponderse con la clasificación propuesta por los autores. Sin embargo, sí se encuentra una gran analogía para el índice de brillo Δ de Perez et al., mostrado en la figura 8.28. Puede observarse que el valor del índice Δ puede asociarse con cielos más o menos brillantes según la clasificación del Estándar CIE. Así Estándares característicos de cielos claros o despejados corresponden con valores próximos a 0.42, y Estándares asociados con cielos cubiertos, dan lugar a índices de brillo próximos a 0.1.

La distribución en función del tipo de cielo Estándar CIE del índice de nebulosidad de Parradeau puede observarse en la figura 8.29. Si se omiten aquellos valores en los que la fracción difusa k_d es superior a la unidad, se observa que en todos los casos el índice se distribuye en el rango $[0, 1]$ y, salvo el caso de los cielos Estándar CIE 2, y 11, de forma muy asimétrica. No obstante, sí permitiría apreciar una distinción entre cielos cubiertos y despejados.

Finalmente, el índice de cielo Si indicado por Igawa se muestra en la figura 8.30. Aunque las distribuciones se solapan para los distintos Estándares CIE sí se aprecia que son bastante simétricas en la mayoría de los casos. La dispersión de sus valores también es reducida, salvo para los Estándares CIE 5, 9, 10 y 12.

La tabla 8.2 muestra los intervalos en los que se sitúan las medianas de los diferentes índices para cada tipo de cielo, clasificados en tres categorías: cubiertos, intermedios y despejados, de acuerdo a los Estándares CIE. Al final de la tabla se indica el número de puntos tomados, n. Puede observarse que los intervalos de cielos cubiertos y despejados no suelen solaparse, pero sí en los cielos intermedios, con ambos o uno sólo de los intervalos anteriores. En este sentido, la función de claridad F y el índice de cielo de Igawa, Si, se muestran como los indicadores más adecuados.

La tabla 8.3 recoge las medias, μ y desviaciones típicas, σ, de los valores tomados por los distintos índices en función de cada Estándar CIE[5]. Cuanto menor sean las desviaciones típicas y mayores las diferencias entre los valores medios, más identificativo es el índice. De nuevo, F y Si se muestran como los indicadores más efectivos.

Tabla 8.2: Relación entre los índices de claridad y la clasificación de cielos.

Cielo	**Cubierto**	**Intermedio**	**Despejado**
CIE	**01-05**	**06-10**	**11-15**
k_d	$[1.00, 1.10]$	$[0.71, 1.00]$	$[0.62, 0.95]$
k_b	$[0.00, 0.10]$	$[0.00, 0.28]$	$[0.05, 0.36]$
F	$[0.12, 0.28]$	$[0.33, 0.34]$	$[0.24, 0.39]$
k_t	$[0.14, 0.30]$	$[0.32, 0.50]$	$[0.34, 0.51]$
k_{tt}	$[1.75, 1.89]$	$[1.18, 1.87]$	$[1.24, 1.58]$
k_k	$[0.52, 0.55]$	$[0.54, 0.71]$	$[0.60, 0.68]$
F_k	$[-0.01, 0.00]$	$[0.00, 0.50]$	$[0.09, 0.61]$
$\ln \varepsilon_1$	$[0.00, 0.00]$	$[0.00, 0.51]$	$[0.20, 1.25]$
$\ln \varepsilon_2$	$[0.00, 0.00]$	$[0.00, 0.46]$	$[0.01, 0.50]$
Δ	$[0.12, 0.25]$	$[0.26, 0.30]$	$[0.22, 0.34]$
FP	$[0.00, 0.50]$	$[0.00, 0.80]$	$[0.65, 1.00]$
Si	$[0.35, 0.46]$	$[0.48, 1.23]$	$[0.82, 1.41]$
n	3 664	2 924	661

[5]Los valores han sido calculados en función de la clasificación realizada en el apartado 8.3. Nótese que para el Estándar CIE 15 sólo se dispone de un dato, por lo que el resultado puede no ser representativo.

Tabla 8.3: Relación entre los índices de claridad y los Estándares CIE.

	CIE	k_d	k_b	F	k_t	k_{tt}	k_k	F_k	ε_1	ε_2	Δ	FP	Si
Cubierto	01	0.92, 0.27	0.09, 0.26	0.15, 0.07	0.22, 0.21	1.90, 0.17	0.51, 0.05	0.10, 0.29	2.60, 4.95	1.90, 2.77	0.14, 0.07	0.11, 0.30	0.38, 0.54
	02	1.00, 0.01	0.01, 0.01	0.18, 0.09	0.18, 0.09	1.78, 0.02	0.54, 0.01	0.01, 0.01	1.02, 0.02	1.01, 0.01	0.16, 0.08	0.50, 0.50	0.29, 0.05
	03	0.98, 0.15	0.03, 0.14	0.18, 0.06	0.20, 0.12	1.86, 0.19	0.52, 0.06	0.03, 0.17	1.36, 2.20	1.21, 1.24	0.17, 0.06	0.04, 0.19	0.29, 0.30
	04	1.00, 0.03	0.01, 0.03	0.27, 0.07	0.28, 0.08	1.71, 0.21	0.56, 0.06	0.02, 0.06	1.03, 0.07	1.01, 0.03	0.24, 0.06	0.11, 0.25	0.39, 0.18
	05	0.72, 0.39	0.28, 0.38	0.21, 0.09	0.42, 0.25	1.87, 0.23	0.52, 0.06	0.34, 0.45	4.76, 6.05	2.80, 2.86	0.18, 0.08	0.41, 0.47	0.88, 0.76
Intermedio	06	0.98, 0.05	0.02, 0.05	0.31, 0.08	0.32, 0.09	1.73, 0.29	0.55, 0.08	0.04, 0.09	1.06, 0.12	1.03, 0.06	0.28, 0.08	0.23, 0.29	0.50, 0.21
	07	1.00, 0.02	0.01, 0.02	0.32, 0.09	0.32, 0.09	1.42, 0.32	0.64, 0.08	0.02, 0.03	1.04, 0.05	1.01, 0.02	0.28, 0.08	0.21, 0.31	0.51, 0.17
	08	0.97, 0.05	0.03, 0.04	0.32, 0.08	0.33, 0.09	1.24, 0.26	0.68, 0.07	0.06, 0.09	1.18, 0.25	1.05, 0.07	0.28, 0.07	0.46, 0.36	0.64, 0.23
	09	0.65, 0.31	0.34, 0.31	0.29, 0.11	0.51, 0.19	1.83, 0.30	0.53, 0.08	0.47, 0.39	3.92, 4.51	2.26, 1.85	0.26, 0.10	0.71, 0.33	1.17, 0.56
	10	0.69, 0.26	0.30, 0.26	0.32, 0.10	0.49, 0.16	1.73, 0.32	0.55, 0.09	0.46, 0.33	3.21, 3.42	1.85, 1.18	0.28, 0.09	0.76, 0.26	1.17, 0.46
Despejado	11	0.94, 0.07	0.06, 0.07	0.37, 0.08	0.40, 0.10	1.47, 0.32	0.63, 0.08	0.12, 0.12	1.23, 0.25	1.08, 0.09	0.33, 0.07	0.57, 0.31	0.80, 0.25
	12	0.61, 0.24	0.38, 0.24	0.28, 0.09	0.49, 0.14	0.45, 0.12	0.61, 0.09	0.57, 0.30	4.64, 4.55	2.17, 1.31	0.24, 0.08	0.88, 0.17	1.32, 0.40
	13	0.86, 0.15	0.13, 0.14	0.33, 0.09	0.4, 0.15	0.65, 0.12	0.09, 0.28	0.24, 0.22	1.58, 0.46	1.24, 0.31	0.29, 0.08	0.82, 0.22	0.95, 0.34
	14	0.63, 0.20	0.35, 0.20	0.26, 0.07	0.44, 0.15	0.65, 0.10	0.10, 0.23	0.56, 0.25	4.46, 3.21	2.02, 0.89	0.22, 0.06	0.96, 0.07	1.31, 0.35
	15	0.58, 0.00	0.40, 0.00	0.44, 0.00	0.74, 0.00	1.84, 0.00	0.53, 0.00	0.67, 0.00	2.55, 0.00	1.65, 0.00	0.38, 0.00	0.74, 0.00	1.63, 0.00

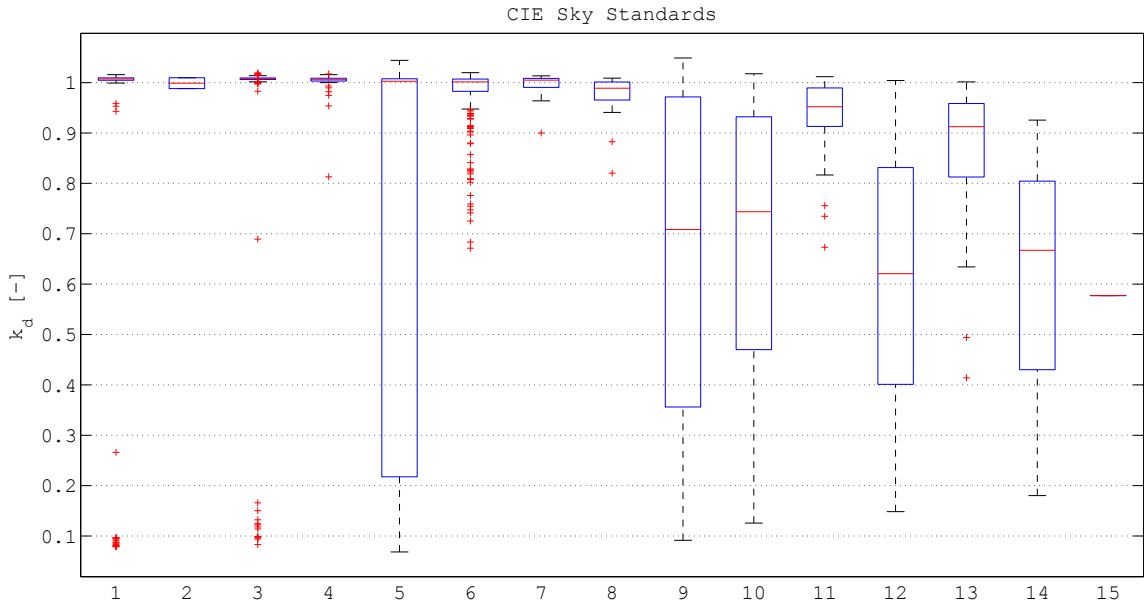


Figura 8.19: Distribución de la fracción difusa para cada Estándar CIE.

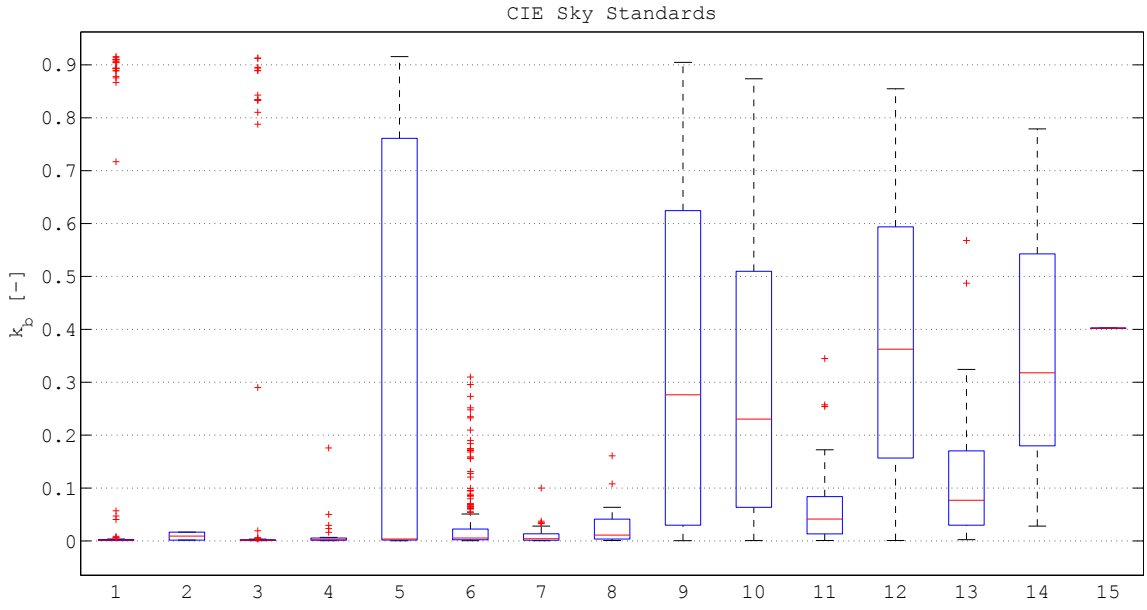


Figura 8.20: Distribución de la fracción directa para cada Estándar CIE.

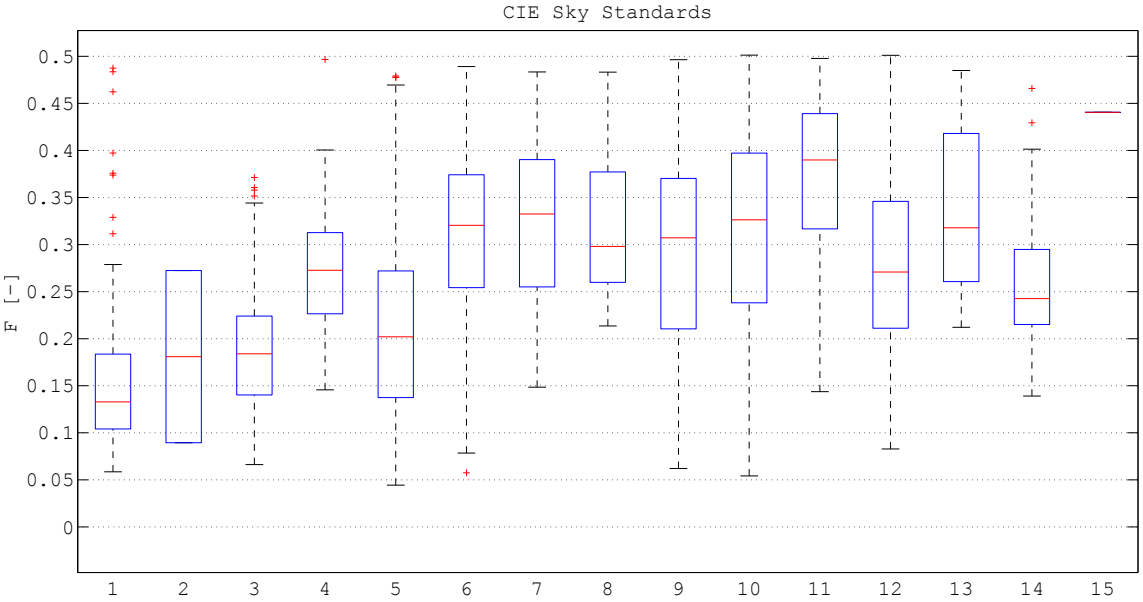


Figura 8.21: Distribución de la función de claridad para cada Estándar CIE.

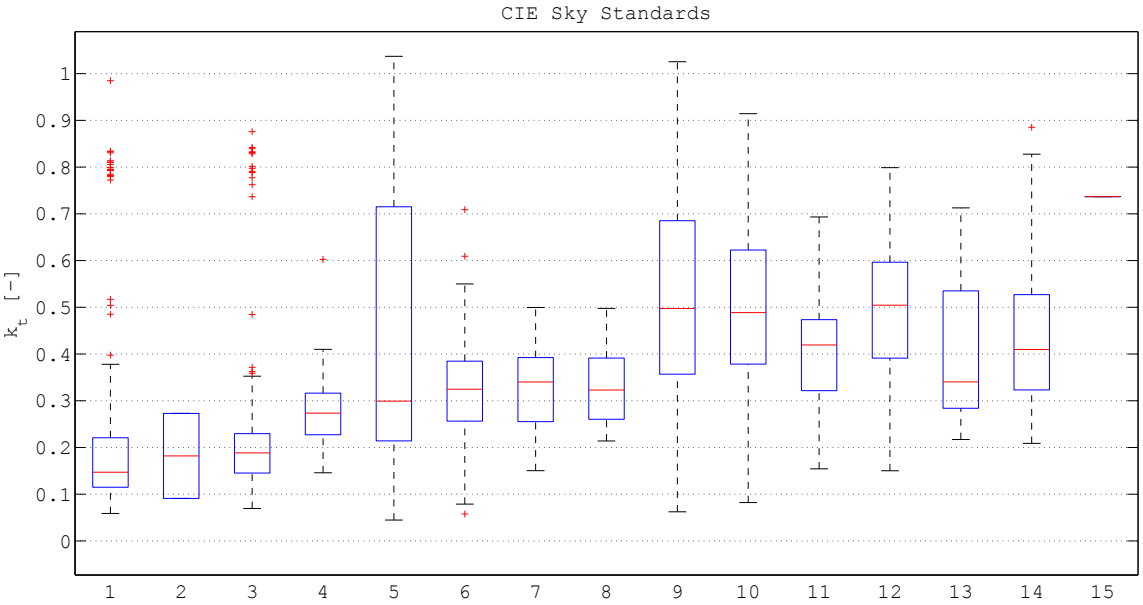


Figura 8.22: Distribución del índice de claridad para cada Estándar CIE.

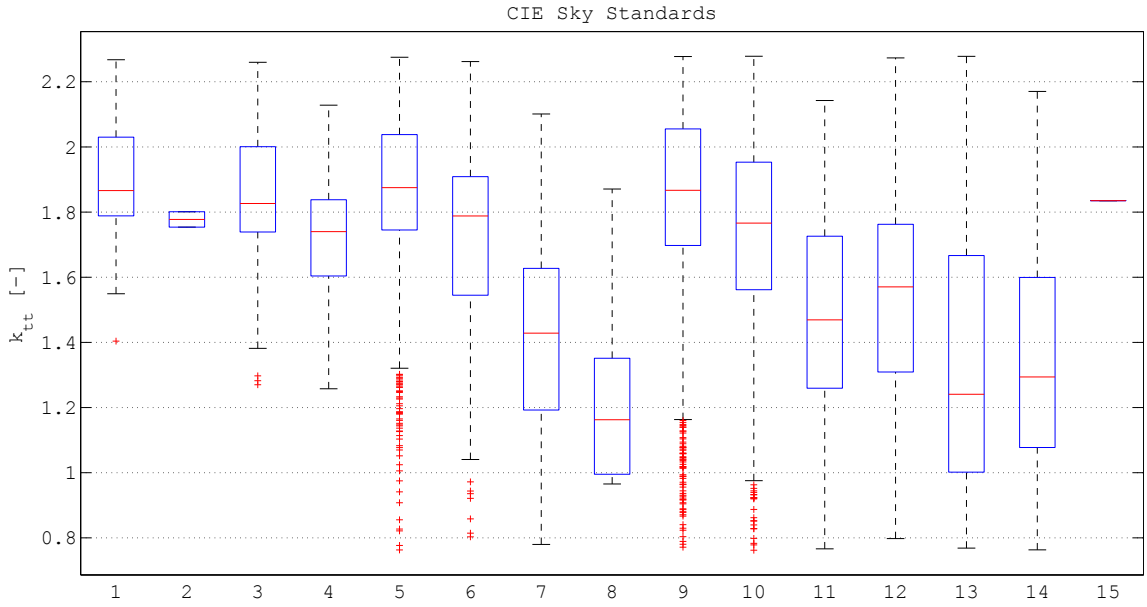


Figura 8.23: Distribución del índice k_{tt} de Batlles et al. para cada Estándar CIE.

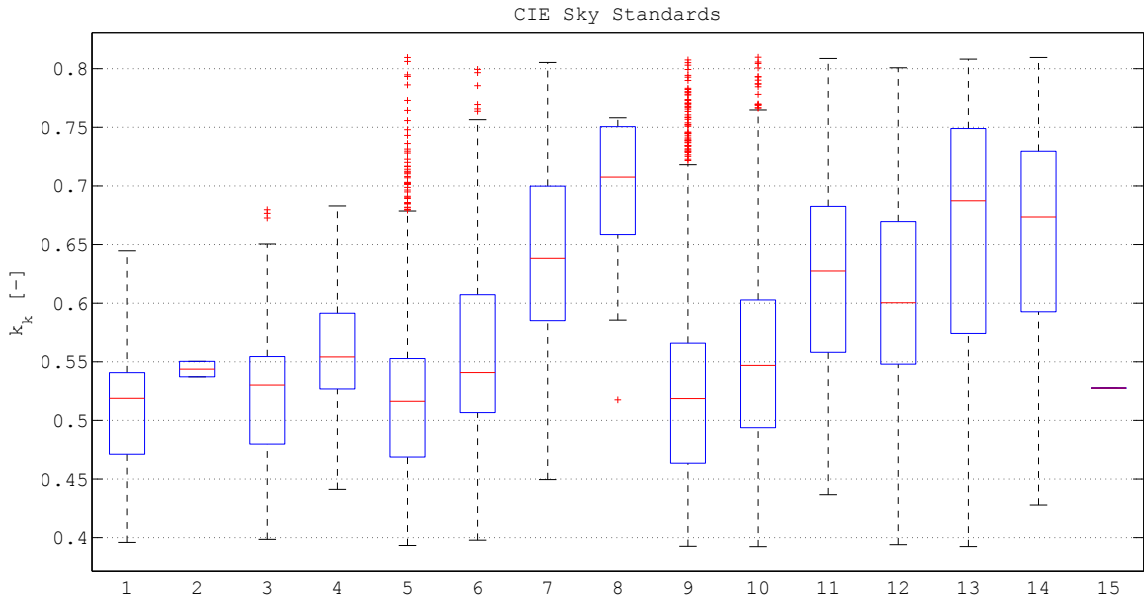


Figura 8.24: Distribución del índice k_k de Batlles et al. para cada Estándar CIE.

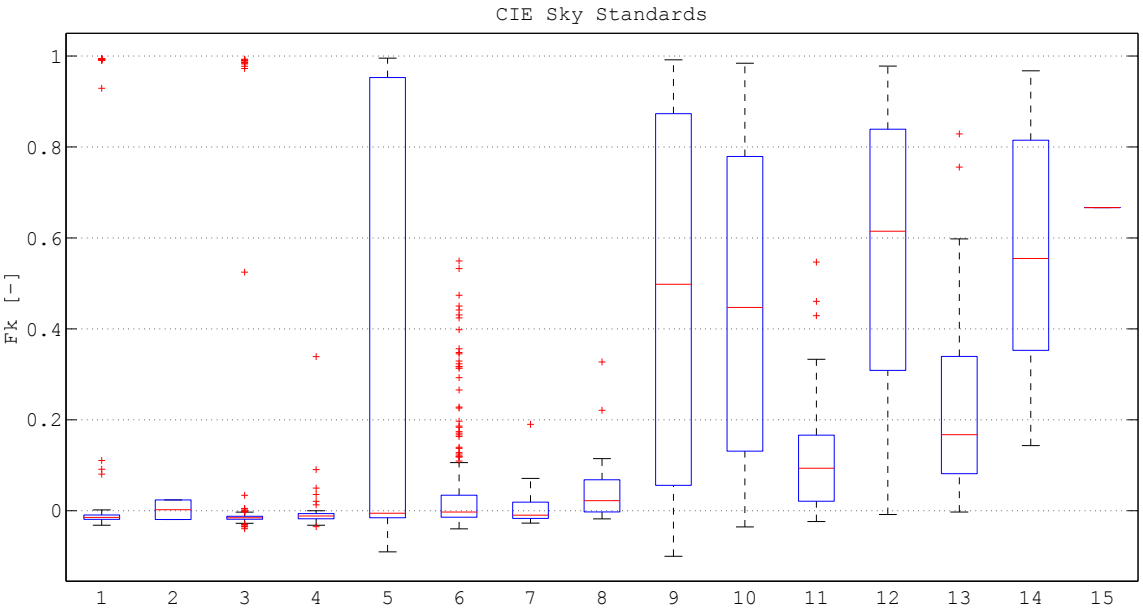


Figura 8.25: Distribución del índice de claridad de Klucher para cada Estándar CIE.

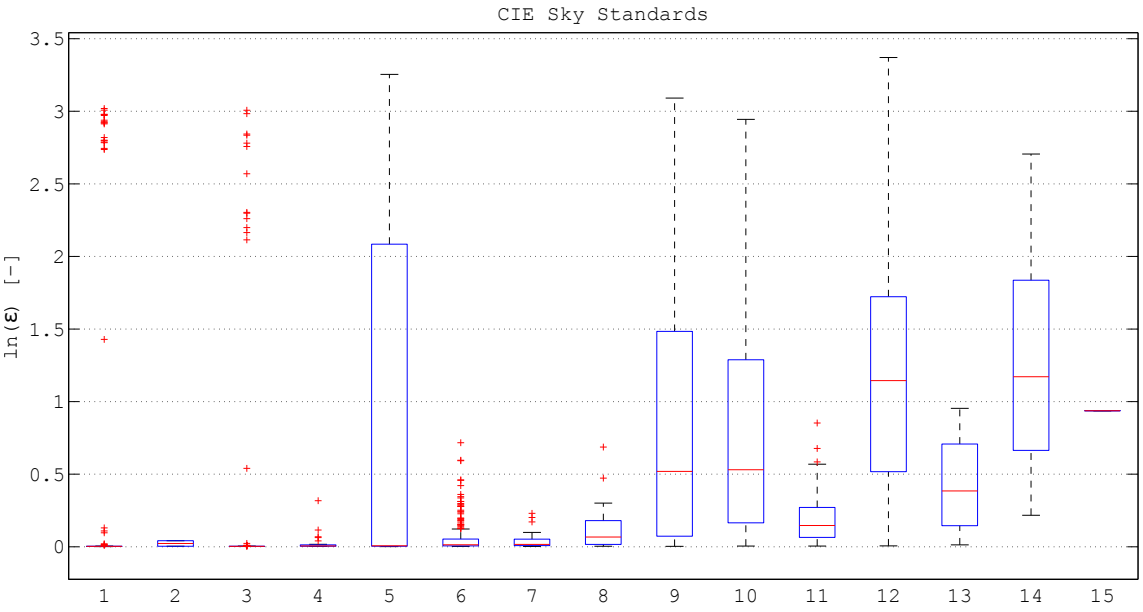


Figura 8.26: Distribución del índice de claridad de Perez (1987) para cada Estándar CIE.

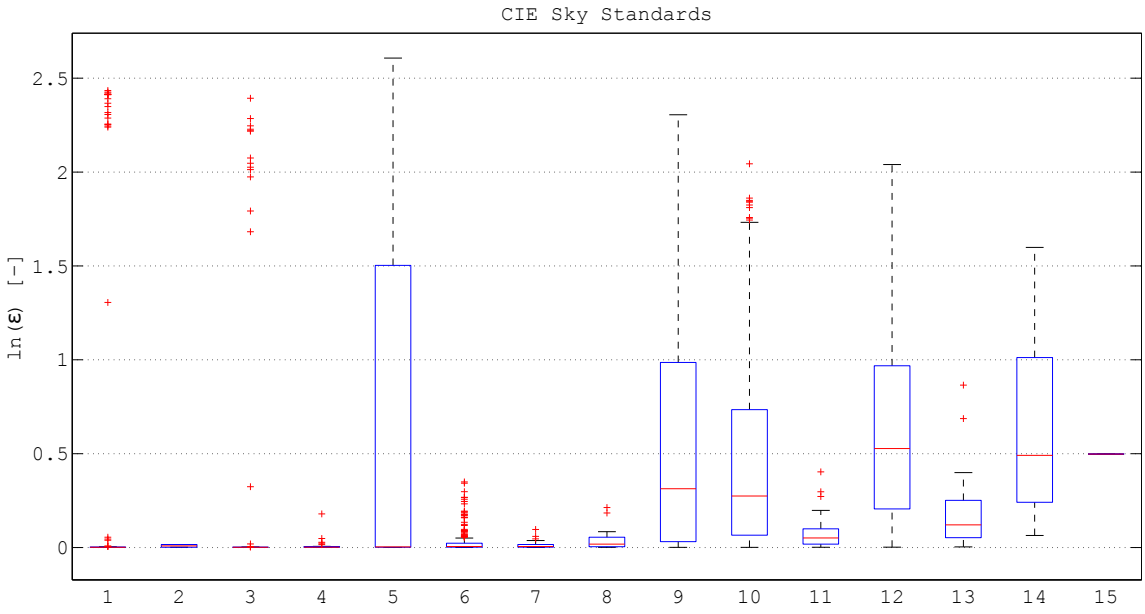


Figura 8.27: Distribución del índice de claridad de Perez (1990) para cada Estándar CIE.

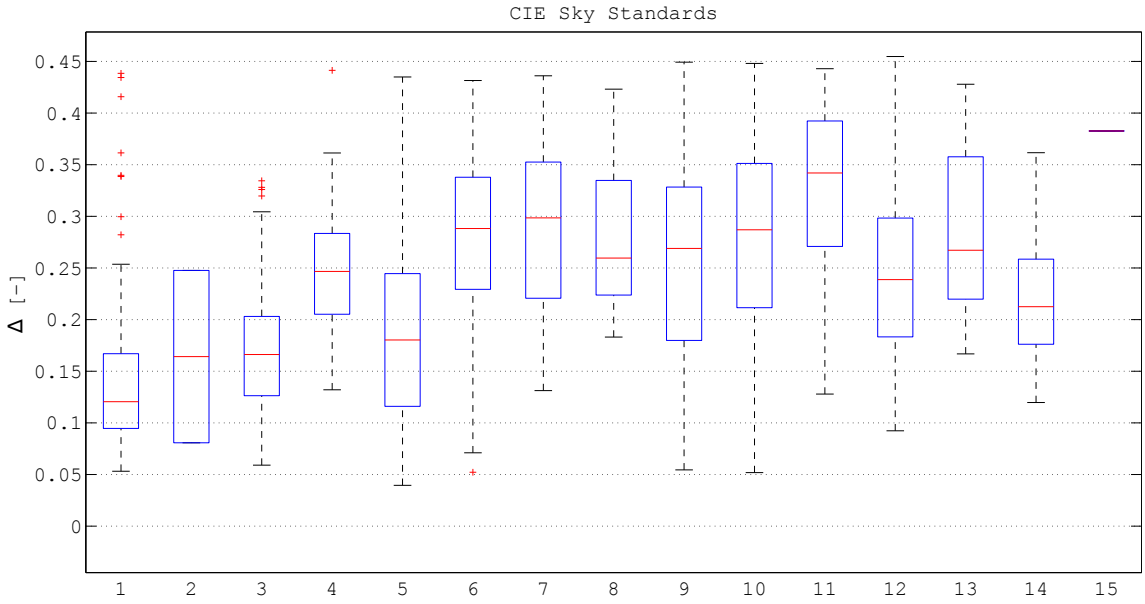


Figura 8.28: Distribución del índice de brillo de Perez et al. para cada Estándar CIE.

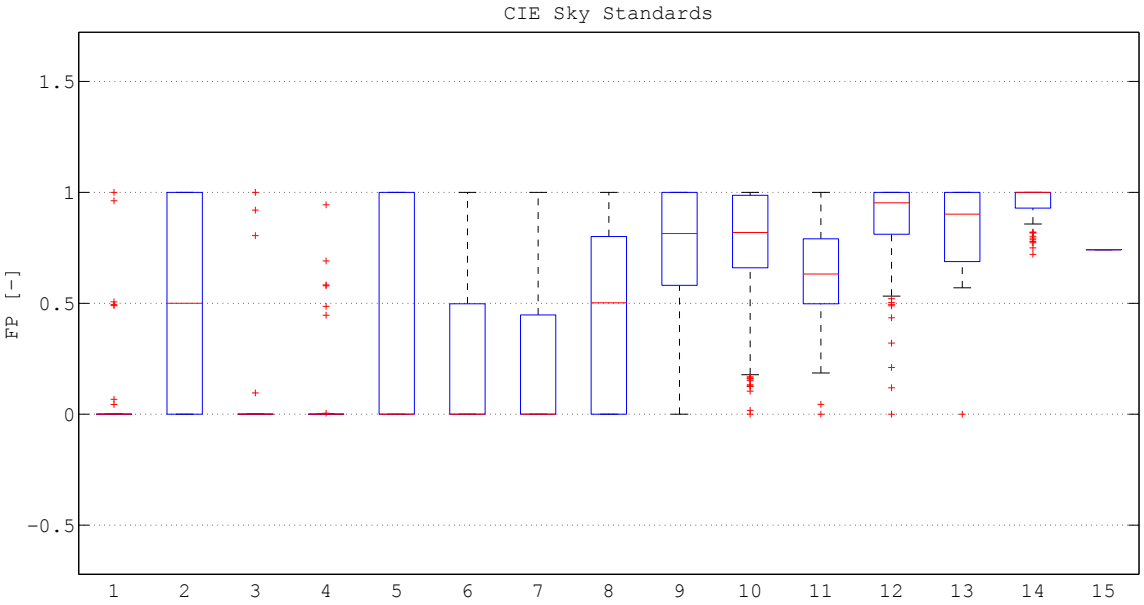


Figura 8.29: Distribución del índice de nebulosidad para cada Estándar CIE.

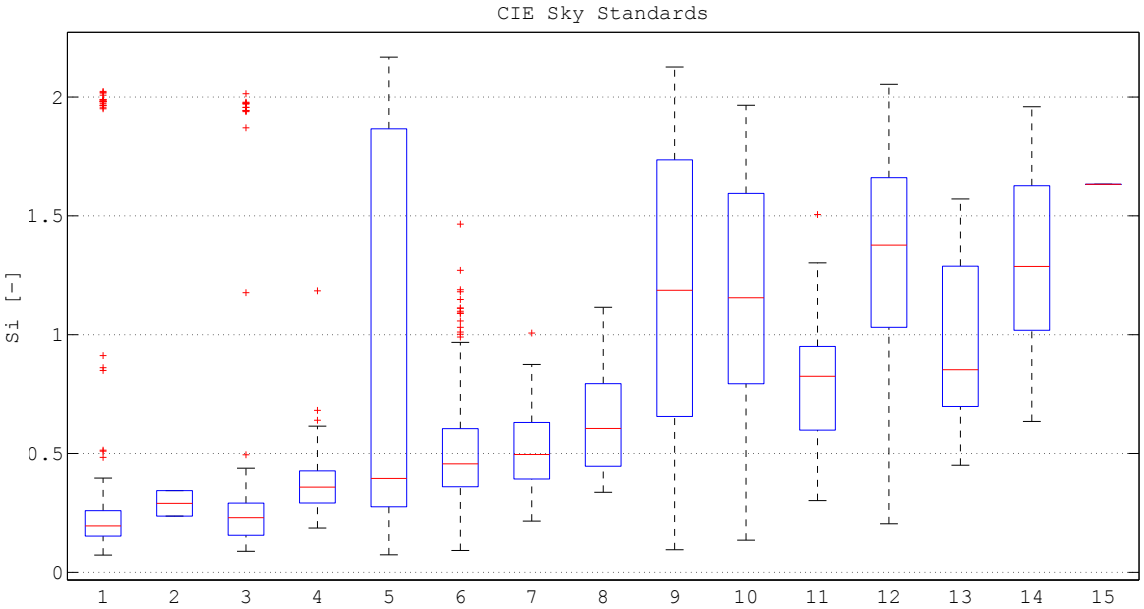


Figura 8.30: Distribución del índice de cielo de Igawa para cada Estándar CIE.

Capítulo 9

Estudio analítico de los modelos de transposición

9.1. Introducción

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos mediante los modelos de transposición descritos en el capítulo 1. Comienza con una descripción de la metodología de análisis seguida, continúa con la exposición de los parámetros estadísticos utilizados para la comparación de los mismos y finaliza con la exposición de resultados obtenidos y su discusión.

No existe un procedimiento universalmente aceptado para realizar el análisis de este tipo de modelos. Además, muchos de ellos han sido obtenidos empíricamente a partir de datos medidos en ciertas localizaciones, por lo que no puede garantizarse siempre su aplicación universal. Finalmente, cambios en la calibración radiométrica y los procedimientos de medida pueden perturbar los índices que evalúan la adecuación del modelo, e incluso el valor adoptado por los parámetros de éste.

La comparación entre las estimaciones dadas por un modelo y las medidas realizadas, es el procedimiento más común para evaluar su adecuación.

Se considera que *"el modelo perfecto"* no existe. Incluso si existiera, sería imposible asegurarlo porque el verdadero valor de la irradiancia solar no puede ser determinado teóricamente o medido experimentalmente sin incertidumbre. Por este motivo, los índices estadísticos empleados para la comparación de los modelos se definen según las diferencias entre las estimaciones y las observaciones medidas, y no según los *"errores"*.

9.2. Descripción del procedimiento de análisis

En primer lugar se debe distinguir entre la *"validez"* del modelo y su *"ajuste"*, pues un modelo puede ser válido, cuando existe una correlación fuerte con la variable o sistema modelización, pero puede que no sea muy preciso y se comporte peor que otros modelos propuestos (tenga un mal ajuste). Para ello, se estudia su respuesta bajo determinadas condiciones, y se estudian los resultados obtenidos en una serie de parámetros estadísticos.

Basándonos en el uso final de los modelos, principalmente como elementos básicos para la simulación energética, hemos definido dos condiciones de evaluación:

1. En función de la orientación de la superficie: Norte, Sur, Este y Oeste.
2. En función de las condiciones del cielo: claro, intermedio o cubierto.

La escala temporal es un factor crítico en muchas ocasiones. Hasta los últimos años, en el ámbito de la ingeniería energética, conocer el valor promedio diario mensual de la irradiancia global era suficiente para proyectar grandes plantas solares, en condiciones prácticamente ideales (entornos despejados, inclinaciones y orientaciones óptimas, etc.) Sin embargo, en los últimos años, el desarrollo de tecnologías de generación a partir del recurso solar pasa por su integración en entornos urbanos, con geometrías complejas y presencia de obstáculos en el horizonte, haciendo imprescindible el conocimiento preciso de la distribución de la radiancia. Además las curvas de generación y consumo aumentan su dependencia, y un conocimiento del promedio del sistema ya no es suficiente. Ahora, es necesario aumentar la precisión de la estimación del recurso solar a intervalos horarios o incluso instantáneos (que se pueden aproximar mediante valores minutales o diez-minutales), pues de ello dependerá en gran medida la capacidad de satisfacción de la demanda instantánea del sistema consumidor.

El origen de la segunda prueba está estrechamente relacionada con el argumento anterior. La instalación de sistemas generadores ya no queda tan abierta como se venía realizando, pues ahora se deben aprovechar otras superficies distintas de la óptima, y se debe evaluar la significancia del impacto de otros elementos del entorno. Un estudio detallado por orientaciones es un primer paso para mejorar la precisión de las simulaciones realizadas y, por lo tanto, tomar con mejor criterio las decisiones que atañen al diseño de la instalación.

Finalmente, dada la fuerte dependencia del comportamiento del modelo con la distribución de la radiancia en la bóveda celeste, es decir, con la caracterización del tipo de cielo, resulta fundamental evaluar los modelos estudiados bajo este criterio. Conforme mejor definamos el tipo de cielo y mejor modelemos la irradiancia sobre una determinada superficie en función de éste, más precisas serán las estimaciones realizadas.

De forma resumida, los modelos evaluados se indican en la tabla 9.1. A cada uno de ellos se le ha asignado un identificador (ID), que también se muestra en la citada tabla. En total son 31 modelos de irradiancia difusa y 4 modelos de irradiancia reflejada. Estos últimos ya han sido evaluados en el capítulo 5, donde se ha determinado que el modelo más preciso en el periodo de estudio en Burgos, es el modelo de Iqbal o isótropo constante (R01).

Finalmente, los modelos teóricos o aquellos modelos con coeficientes empíricos fijados por el autor de forma universal, han sido evaluados con el conjunto total de datos. En cambio, aquellos modelos empíricos cuyos coeficientes precisan ser calculados específicamente para la ubicación objeto de estudio, bien mediante técnicas de regresión lineal o los procedimientos particulares especificados por los autores del modelo, han sido evaluados mediante validación cruzada, adoptando el valor $k = 10$. Éste es el caso del modelo de Perez et al. (D14) para coeficientes F_{ij} optimizados. En el caso de los modelos no paramétricos (D26-D31), se ha realizado un proceso análogo de validación cruzada, pero en dos etapas. El conjunto de entrenamiento, formado por $k-1$ de los subconjuntos en los que se ha dividido el conjunto global de datos, es a su vez dividido en otras k partes para tomar igualmente $k-1$ partes para el entrenamiento y 1 parte para la validación mediante propagación hacia atrás del error. Es decir, se dispone de 3 subconjuntos: entrenamiento, validación y prueba. En todos los casos se ha tomado $k = 10$[1]. En estos casos, se toma como valor representativo de los estadísticos de evaluación, el valor promedio obtenido en los k subconjuntos de prueba.

9.2.1. Análisis cuantitativo de los modelos

Para evaluar la bondad de un modelo es común el empleo de distintos parámetros estadísticos que cuantifican diversos aspectos de la distribución de las diferencias entre las estimaciones del modelo y una serie de observaciones, que se toman como valores *"verdaderos"* o de *"referencia"*. Es más, es posible establecer una ordenación de preferencia de los modelos en función de su capacidad para estimar correctamente la variable deseada. Sin embargo, se debe tener en cuenta el papel que juega la determinación de la incertidumbre de las observaciones en la evaluación de la bondad de los distintos modelos. Si ésta es muy grande, puede resultar que el estudio de las diferencias no sea significativo, pues dos diferencias distintas, si son inferiores a la incertidumbre de la observación, no pueden compararse. Por este motivo, la ordenación de los modelos atiende a las *"diferencias"* respecto a las observaciones, y no a los *"errores"*.

En la bibliografía existen multitud de parámetros estadísticos para realizar esta evaluación, que estudian aspectos particulares de la distribución de los residuos del mo-

[1]Como se indicó en el capítulo 1, esta medida es tomada para evitar los fenómenos de sobre-entrenamiento o sub-entrenamiento del modelo.

Tabla 9.1: Relación de modelos analizados.

Irradiancia	**Tipo**	**Grupo**	**Modelo**	**ID**
Difusa	Paramétricos	Isótropos	Liu & Jordan	D01
			Tian et al.	D02
			Badescu	D03
			Koronakis	D04
			Olmo	D05
		Anisótropos	ASHRAE	D06
		de superposición	Díez-Mediavilla	D07
			DOE-2	D08
			Gueymard	D09
			Hay & Davies	D10
			Klucher	D11
			Ma & Iqbal	D12
			Muneer	D13
			Perez et al.	D14
			Reindl	D15
			Skartveit & Olseth	D16
			Steven & Usworth	D17
			Temps & Coulson	D18
			Willmott	D19
		Anisótropos	Brunger & Hooper	D20
		de gradiente	CIE 2004	D21
			TCCD	D22
			Igawa et al.	D23
			Moon & Spencer	D24
			Siala & Hooper	D25
	No paramétricos	Inferencia borrosa	Mamdani	D26
			Sugeno	D27
		Redes neuronales	MLP	D28
			RBF	D29
			GRNN	D30
		Neuroborrosos	ANFIS	D31
Reflejada	Paramétricos	Isótropos	Iqbal	R01
			Gueymard	R02
		Anisótropos	Kambezidis	R03
			Semifísico	R04

delo ante una muestra. En este aspecto destacan las revisiones y aplicaciones realizadas en [Alados-Arboledas et al., 2000, Munawwar and Muneer, 2007, Muneer et al., 2007, Badescu, 2008, Gueymard, 2014, Gueymard and Ruiz-Arias, 2015]. Todos presentan ventajas e inconvenientes, por lo que no es posible definir un parámetro universal.

En esta Tesis, se han seleccionado los siguientes por ser los más representativos:

Diferencia de Sesgo Promedio (MBD): evalúa la tendencia de la serie de los residuos. Su valor se describe en (D.22).

Raíz de la Diferencia Cuadrática Promedio (RMSD): mide la dispersión de la serie de residuos respecto al promedio. Véase la ecuación (D.23).

Coeficiente de determinación (R^2): mide la varianza de las diferencias que puede explicarse por el modelo. Viene determinado por la expresión (D.24).

***t*-estadístico:** parámetro desarrollado por Stone en 1993 para corregir la inferencia dada por los valores de MBD y RMSD. Se detalla en (D.27).

Distancia d de Willmott: índice propuesto por Willmott como refuerzo de los valores MBD y RMSD. Véase la ecuación (D.30).

Además, se propone un nuevo índice denominado $\mu_{1-\alpha}$.

Índice estadístico $\mu_{1-\alpha}$

En la sección D.5 se describe el índice t-estadístico y las ventajas que presenta su empleo para comparar distintos modelos, subsanando algunas deficiencias de los parámetros MBD y RMSD. Entre ellas, destaca que permite asignar un nivel de significación α a su valor, aspecto que los parámetros MBD y RMSD no pueden por definición. Sin embargo, en la evaluación práctica de los modelos propuestos se encuentran numerosas dificultades para que este parámetro alcance la significación estadística. Esto es debido a que este índice se basa en un contraste de hipótesis formulado de la siguiente manera:

H_0**:** La diferencia entre la media de los valores estimados por el modelo y la media de los valores observados es nula, es decir: $d = \hat{y} - y = 0$, para toda la población.

H_1**:** La diferencia no es nula.

Suponer que la diferencia sistemática de un modelo es nula de forma significativa, en base a nuestra experiencia, es muy difícil de verificar en la práctica en el caso de la evaluación

de modelos de transposición, más áun cuando se dispone de un número elevado de pares estimaciones-observaciones.

Evaluamos entonces la cuestión desde una perspectiva diferente y reformulamos el contraste de hipótesis de forma que:

H_0**:** La diferencia entre la media de los valores estimados por el modelo y la media de los valores observados es menor o igual que μ. Expresado de otra forma: $d = \hat{y} - y \leq \mu$

H_1**:** La diferencia es mayor que μ.

En este caso, μ puede entenderse como la diferencia entre los valores estimados y observados que se da en la población total, dada la diferencia observada en la muestra de pares de datos analizada. La expresión del índice t-estadístico (véase la ecuación (D.27)) puede entonces expresarse como:

$$t' = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i) - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}. \tag{9.1}$$

Operando adecuadamente la expresión (9.1) se obtiene que:

$$\mu_{1-\alpha} \in \left[\mathrm{MBD} + t_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\mathrm{RMSD}^2 - \mathrm{MBD}^2}{n-1}}, \mathrm{MBD} - t_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\mathrm{RMSD}^2 - \mathrm{MBD}^2}{n-1}} \right], \tag{9.2}$$

donde α es el nivel de significación deseado y $t_{\alpha/2}$ es el valor crítico de t para dicho nivel de significación, evaluado en una distribución t-Student con $n-1$ grados de libertad. Se puede entonces estimar, con una confianza $1-\alpha$, que la diferencia promedio máxima entre el modelo y las observaciones será:

$$|\mu_{1-\alpha}| \leq |\mathrm{MBD}| - t_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\mathrm{RMSD}^2 - \mathrm{MBD}^2}{n-1}}. \tag{9.3}$$

Cuanto menor sea el valor de $|\mu_{1-\alpha}|$, menor será el promedio de las diferencias, con lo que se infiere que produce un mejor ajuste a los valores observados y, por lo tanto, describe mejor el sistema.

Además, para añadir información, podemos expresar el índice $\mu_{1-\alpha}$ acompañado de un signo + o − que indique si el modelo tiende a sobrestimar (signo +) o por contra tiende a subestimar (signo −)[2]. Este signo se ha decidido calcular como el tomado por el valor

[2]Nótese que las diferencias entre los pares de datos se ha dado como la del valor estimado menos el valor observado: $d_i = r_{o,i} = \hat{y}_i - y_i$.

promedio de $\mu_{1-\alpha}$ para el intervalo de confianza dado:

$$\text{signo} = \text{sign}\left(\frac{\text{MBD}}{2}\right) = \text{sign}\left(\text{MBD}\right). \tag{9.4}$$

Así, el indicador propuesto se compone de dos partes: el valor absoluto de la diferencia máxima y un signo correspondiente al signo del valor de MBD. La ausencia de signo correspondería a un valor de MBD=0 o sesgo nulo.

Las principales ventajas de evaluar el índice $\mu_{1-\alpha}$ son:

- Combina los valores de MBD y RMSD superando sus deficiencias.
- Garantiza un nivel de significación estadística α.
- Tiene en cuenta el tamaño de la muestra analizada.
- Evalúa la mayor diferencia promedio en términos de valor absoluto.
- Ofrece información sobre el sesgo del modelo.
- Es independiente del resultado obtenido por otros modelos.

Se ha optado por adoptar un nivel de significación $\alpha = 0.01$ de acuerdo con la convención observada en la bibliografía, por lo que el índice propuesto aparecerá en los resultados como $\mu_{0.99}$.

9.2.2. Análisis cualitativo de los modelos

Mediante un gráfico de dispersión es posible evaluar visualmente el error del modelo. Un modelo perfecto ajustaría todos sus valores a la recta de pendiente unidad y ordenada nula del gráfico cuando se comparan sus respuestas con las observaciones. Así se muestra si existe error sistemático (MBD), caracterizado por una recta promedio de los valores paralela a la recta identidad, o errores aleatorios, mediante la dispersión de los puntos. Sin embargo, dada la existencia de una gran cantidad de puntos, comparar varios modelos mediante este sistema de representación es complejo y resulta poco práctico.

Para poder evaluar mejor el comportamiento de los modelos y poder compararlos entre sí, se ha adoptado una modificación de la metodología expuesta en [Ineichen et al., 1983]. La representación gráfica propuesta originalmente por los autores consiste en agrupar los residuos, en intervalos de una variable independiente, como por ejemplo la fracción difusa k_d o el índice de claridad k_t. Posteriormente, se calcula la media y la desviación típica de las citadas diferencias para cada intervalo y se representan uno o varios modelos

simultáneamente. La elección de k_t o k_d como variables independientes es debido a que son suficientemente representativas del caso de estudio. La principal limitación de este método es que no es recomendable para representar más de 4 o 5 modelos a la vez. Dado que en nuestro caso se deben representar más de una treintena de modelos diferentes, hemos modificado este método de forma que la variable independiente es dividida en una serie de intervalos de interés, y para cada intervalo se construye un diagrama cuyo eje de abscisas indica cada uno de los modelos y el eje de ordenadas el valor de la diferencia. Para cada modelo se representa el diagrama de caja (box plot), que describe la distribución de sus residuos, así como la media y la desviación estándar en torno a la misma. Los diagramas de caja representan los valores extremos hasta 1.5 veces la distancia intercuartílica desde el cuartil correspondiente. Los valores atípicos, que son aquellos que superarían dichos límites, no se representan para que el gráfico no pierda claridad.

Por otro lado, se ha considerado interesante representar los diagramas de Taylor de los modelos para cada caso estudiado. Este tipo de diagrama es una representación gráfica, presentada por primera vez en 2001 por Taylor, del laboratorio Lawrence Livermore de California, que resume visualmente los parámetros RMSD, R^2 y s^2 [Taylor, 2001]. Constituye así una herramienta para comparar una gran cantidad de modelos.

Los diagramas de Taylor se basan en la definición de la raíz de las diferencias centradas cuadráticas medias según:

$$\mathrm{RMSD}_c = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[(y_{test,i} - \bar{y}_{test}) - (y_{ref,i} - \bar{y}_{ref,i})\right]^2}, \tag{9.5}$$

expresión similar a la del parámetro RMSD (véase la ecuación (D.23)), con la salvedad de que las diferencias entre el conjunto modelización y de referencia no son absolutas, sino que son valores relativos a sus respectivas medias. De esta forma las diferencias evaluadas son independientes del sesgo y se verifica que:

$$\mathrm{RMSD}^2 = \mathrm{RMSD}_c^2 + \mathrm{MSD}^2. \tag{9.6}$$

El valor de RMSD_c tiende a cero conforme los conjuntos de valores estimados y valores observados coinciden, pero para un valor dado de RMSD_c, es imposible determinar qué parte de la diferencia entre ambos es debida a la diferencia de estructura del modelo, y qué parte es debida simplemente a la amplitud de la varianza de los datos. Por ello, este estadístico se complementa con el coeficiente de determinación (véase la ecuación (D.24)), que ofrece una caracterización más completa de las varianzas (o deviaciones típicas) de ambos conjuntos. Así, en [Taylor, 2001], el autor encuentra la siguiente relación entre ambos estadísticos:

$$\mathrm{RMSD}_c^2 = s_{ref}^2 + s_{test}^2 - 2 s_{ref} s_{test} R^2. \tag{9.7}$$

Si se observa con detenimiento la expresión anterior, ésta resulta análoga a la *"Ley de los cosenos"*, que se puede enunciar como:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\phi, \tag{9.8}$$

donde a, b y c son las longitudes de los lados de un triángulo y ϕ es el ángulo opuesto al lado c. Es posible entonces definir las equivalencias: $c = \mathrm{RMSD}_c$, $a = s_{ref}$, $b = s_{test}$ y $\phi = \arccos(R^2)$. Su representación gráfica se muestra en la figura 9.1.

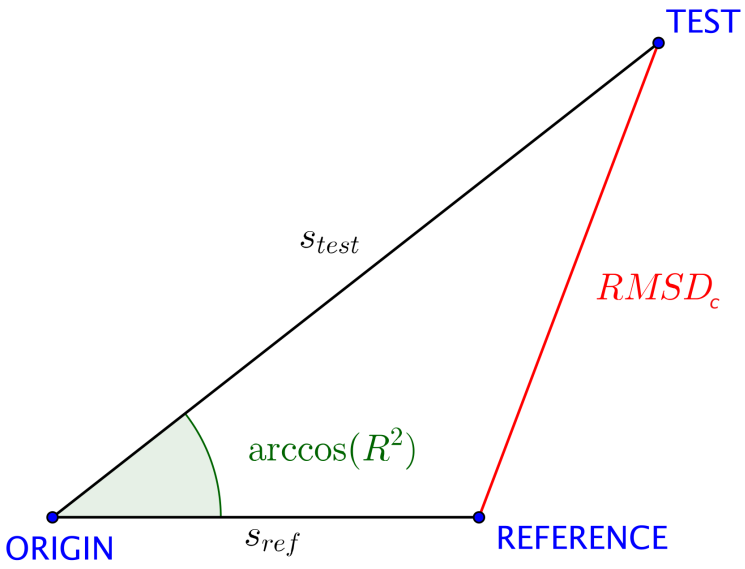


Figura 9.1: Relaciones geométricas del diagrama de Taylor. Adaptado de [Taylor, 2001].

El diagrama de Taylor puede construirse como un diagrama polar, cuya magnitud radial es la desviación estándar de las estimaciones, y la magnitud angular el arco cuyo coseno es el coeficiente de determinación de las estimaciones con las observaciones. Lógicamente, cuando se posiciona en el diagrama el punto representativo del conjunto de las observaciones, éste siempre estará en el eje de abcisas, pues su coeficiente de correlación consigo mismo es siempre $R^2 = 1$, tal y como muestra la figura 9.2. En esta figura también se observa un segundo punto (test) correspondiente a los valores estimados. Sus coordenadas polares son, su desviación estándar s_{test} y el $\arccos(R^2)$ con el conjunto de referencia. Cuanto más próximo se ubique el punto representativo del modelo al punto que representa a la observaciones (referencia) mayor calidad tendrá el modelo.

Por otro lado, obsérvese que en el diagrama de ejemplo mostrado en la figura 9.2 existen unas curvas a trazos, concéntricas con el punto de referencia. Estas curvas miden la distancia a las observaciones y, de acuerdo a lo expuesto anteriormente y a la figura 9.1, se corresponde con el valor de RMSD_c.

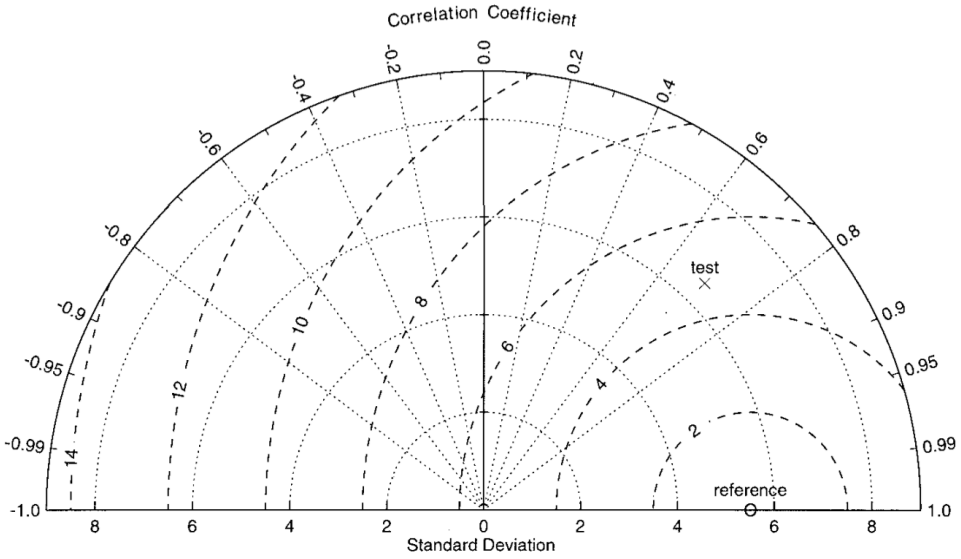


Figura 9.2: Ejemplo de diagrama de Taylor. Fuente: [Taylor, 2001].

Sobre este diagrama también sería posible trazar isolíneas que marcasen el valor de determinadas funciones objetivo o *"fitness"* según interese.

9.2.3. Agregación de clasificaciones

El análisis de los modelos se lleva a cabo para diferentes orientaciones de la superficie vertical. Para cada evaluación se han clasificado los modelos en base a los resultados de los parámetros estadísticos especificados en el apartado 9.2.1. Es de esperar que para cada caso de estudio se obtengan clasificaciones diferentes. Surge entonces la cuestión de determinar cuál sería la clasificación global de forma genérica.

Algunos autores proponen agregar todos los conjuntos de pares estimaciones-observaciones en un único conjunto y aplicar entonces el análisis estadístico correspondiente. Aunque es una solución muy extendida presenta, al menos, dos inconvenientes importantes:

1. En el caso en el que las muestras individuales sean de distinto tamaño, la unificación a un único conjunto favorece a aquellos modelos que se comportan bien en las muestras de mayor tamaño, independientemente de su resultado en las muestras más pequeñas.

2. En el caso en que las muestras individuales sean de igual tamaño, el método de agregación puede favorecer a aquellos modelos que tengan un excelente comportamiento en pocas muestras en contra de aquellos modelos que presentan muy mal ajuste en muy raras ocasiones.

Consideramos que estos fenómenos podrían conducirnos a una evaluación errónea de los modelos, por lo que optamos por un método alternativo para realizar la clasificación global. En la bibliografía pueden encontrarse múltiples opciones, de las cuales, se ha escogido el método de agregación no paramétrica de clasificaciones propuesta en [Stone, 1994].

El procedimiento de agregación no paramétrica de k modelos evaluados en b escenarios consiste en aplicar el siguiente algoritmo:

1. Se calcula el parámetro estadístico de evaluación X_{ij} correspondiente a cada conjunto $i \in \{1, 2, \ldots, b\}$ y cada modelo $j \in \{1, 2, \ldots, k\}$.

2. Se asigna un orden, $R(X_{ij})$, a cada modelo en función del valor relativo del estadístico X_{ij} asociado para cada conjunto de evaluación.

3. Se calcula el orden global del modelo para los distintos conjuntos de evaluación como la suma de los órdenes individuales:

$$R_j = \sum_{i=1}^{b} R(X_{ij}). \tag{9.9}$$

4. Se verifica que la clasificación global se ha llevado a cabo correctamente cuando:

$$\sum_{j=1}^{k} R_j = \frac{bk(k+1)}{2}. \tag{9.10}$$

5. Se calcula el coeficiente λ_j correspondiente a cada modelo, que representa su orden en la clasificación. Se determina ordenando los valores de R_j. Así, por ejemplo, si se dispone de cuatro modelos y se verifica que $R_2 < R_1 < R_4 < R_3$ entonces: $\lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 4$ y $\lambda_4 = 3$. Nótese que es posible que varios modelos presenten el mismo valor de R_j. En este caso, los modelos implicados mostrarían un comportamiento global idéntico y su orden no sería distinguible.

6. Se evalúa la significancia estadística de la ordenación realizada, mediante un contraste de hipótesis formulado como:

   H_0**:** No existe diferencia entre los modelos.

   H_1**:** Existe diferencia entre los modelos.

   Como estadístico de evaluación se toma:

$$L = \sum_{j=1}^{k} \lambda_j R_j. \tag{9.11}$$

   De acuerdo a Stone, este estadístico mide el éxito de la hipótesis alternativa H_1 en dos aspectos: en primer lugar refleja el éxito de predecir el orden de la suma de las

clasificaciones individuales y, en segundo lugar, representa la tendencia de que la suma de clasificaciones muestre diferencias significativas. Cuanto mayor es el valor del estadístico L menos probable resulta que se verifique la hipótesis nula H_0 y, por lo tanto, más significativa es la clasificación global realizada.

7. Se calculan la esperanza y la varianza del estadístico L mediante:

$$E(L) = \frac{b(k+1)}{2} \sum_{j=1}^{k} \lambda_j. \tag{9.12}$$

$$Var(L) = s_L^2 = \frac{b(k+1)}{12} \left[k \sum_{j=1}^{k} \lambda_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{k} \lambda_j \right)^2 \right]. \tag{9.13}$$

8. Se tipifica el valor de L a la distribución normal:

$$z = \frac{L - E(L)}{\sqrt{s_L^2}}. \tag{9.14}$$

9. Se evalúa el valor de la variable tipificada z de forma que, para que el resultado de la clasificación global sea estadísticamente significativo al nivel de significación α, el valor de z debe ser mayor o igual que el correspondiente valor crítico $z_{1-\alpha/2}$. En la tabla 9.2 se muestran los valores críticos de z para valores de α típicos.

Tabla 9.2: Valores críticos de z en función del nivel de significación α.

α	0.050	0.025	0.010	0.001
$z_{1-\alpha/2}$	1.640	1.960	2.330	3.100

9.3. Resultados

A continuación se exponen los resultados de los análisis cualitativos y cuantitativos realizados para la evaluación de los modelos de transposición. En primer lugar, para cada orientación analizada se muestra el Diagrama de Taylor incluyendo todos los modelos, el Diagrama modificado de Ineichen (que grafica la distribución de las diferencias entre los valores estimados por cada modelo y los observados) y una tabla que recoge los resultados obtenidos de diferentes índices estadísticos. En los Diagramas modificados de Ineichen, la media se representa mediante un diamante verde, y la desviación típica en torno a la misma, mediante sendos triángulos amarillos con la punta en dirección al exterior. En

las tablas de resultados, entre paréntesis y junto al valor tomado por cada índice para cada modelo, se indica su clasificación dentro del conjunto. Posteriormente, se recogen los análisis realizados de la varianza de las distribuciones de los residuos brutos, en base a tres índices de claridad. Se han analizado el índice de claridad k_t, la fracción difusa k_d y el índice de cielo propuesto por Igawa, Si. El estudio de los dos primeros se efectúa por ser una práctica común en el campo de estudio, mientras que el último corresponde por ser el más indicativo de todos los índices analizados en el capítulo 8. Para cada uno de estos índices se han estudiado a su vez tres intervalos, correspondientes a cielos despejados o claros, intermedios y cubiertos. El rango de cada índice para cada tipo de cielo se ha tomado en función de los resultados expuestos en la tabla 8.2. Finalmente, se ha realizado la clasificación global de los modelos para todas las orientaciones según los índices estadísticos MBD, RMSD, R^2 y $\mu_{0.99}$. Esta clasificación se ha ha llevado a cabo tanto para el conjunto completo de modelos, como para cada tipo de modelo. Así el primer valor corresponde a la clasificación del modelo dentro del conjunto total, y el segundo es su clasificación dentro de su clase. Los valores seguidos por el signo "!" indican que los modelos afectados se comportan igual y podrían tomar el mismo puesto en la clasificación. Obsérvese que los modelos D01, D02 y D03 concurren siempre en esta particularidad dado que su carácter isótropo y única dependencia con el ángulo cenital de la superficie de estudio (θ_{zp}) conducen a que tomen al final la misma expresión.

Los modelos D26 y D27 (modelos Mamdani y Takagi-Sugeno respectivamente) han sido implementados en diversas pruebas pero a pesar de haber testado múltiples configuraciones, ninguna ha mostrado resultados aceptables. Las funciones de pertenencia han sido ajustadas mediante el análisis de las distribuciones de los estimadores potenciales y algoritmos genéticos de optimización. La generación de reglas se ha implementado mediante procedimientos iterativos de adición desde un conjunto predefinido. Sin embargo, la alta variabilidad de los estimadores y la ausencia de fuertes correlaciones entre los estimadores y la respuesta vuelven muy inestables sus mecanismos de inferencia, por lo que se ha decidido no incluirlos en el estudio. Esto no implica que no sea posible hallar configuraciones viables de estos modelos. Sin embargo, esto requeriría un estudio en detalle que se propone como futura línea de investigación.

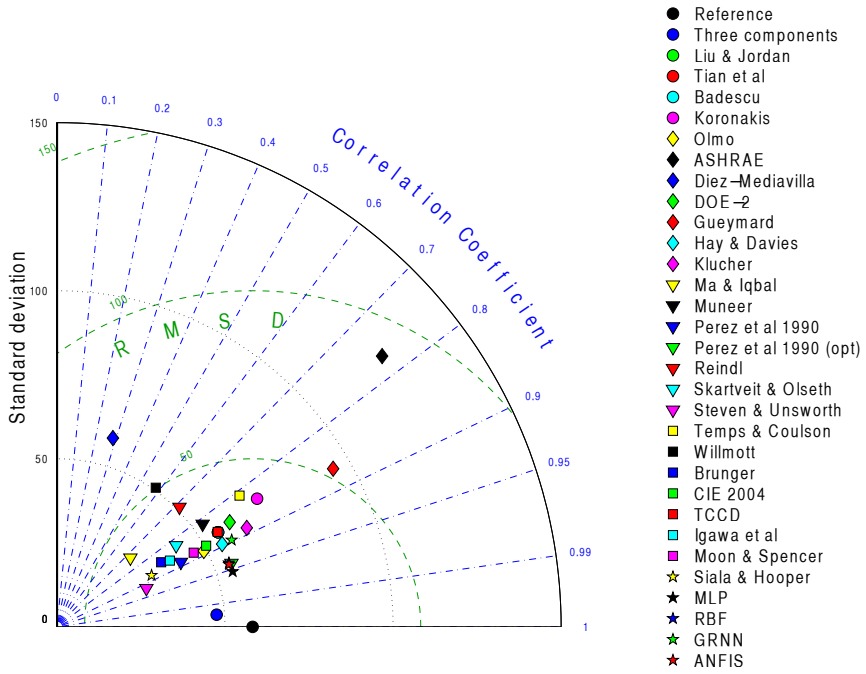


Figura 9.3: Diagrama de Taylor modelos de transposición (Norte).

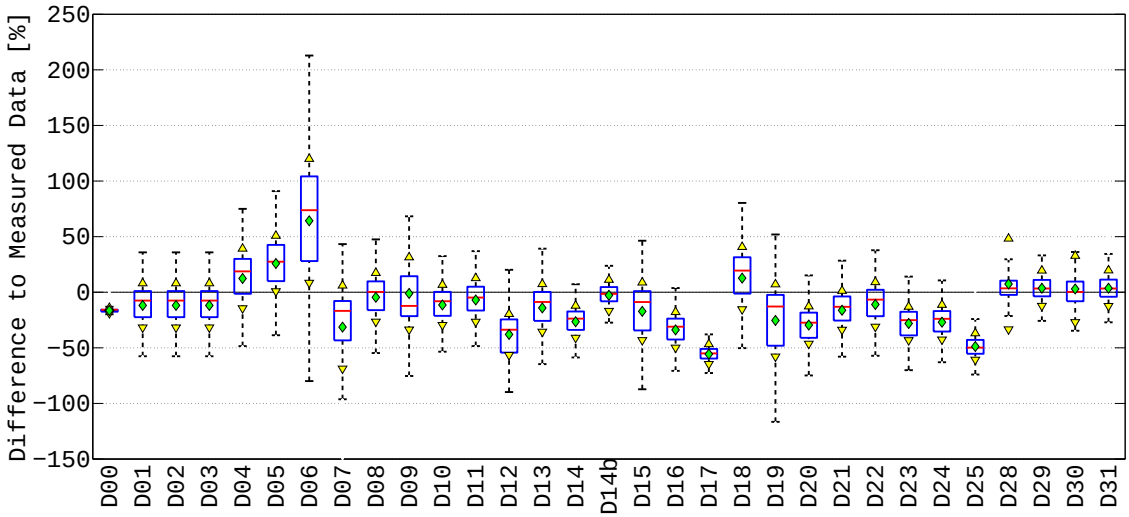
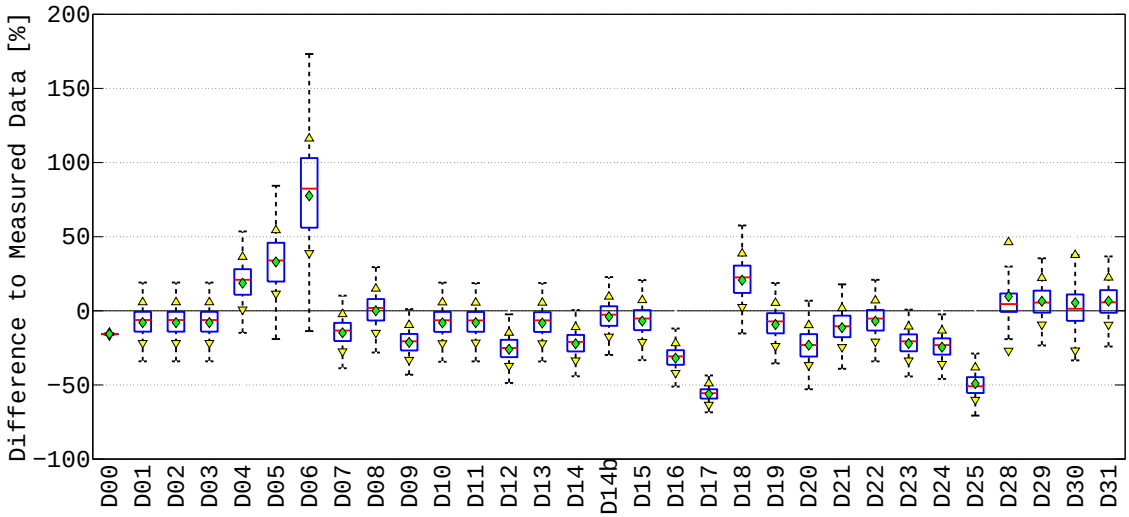


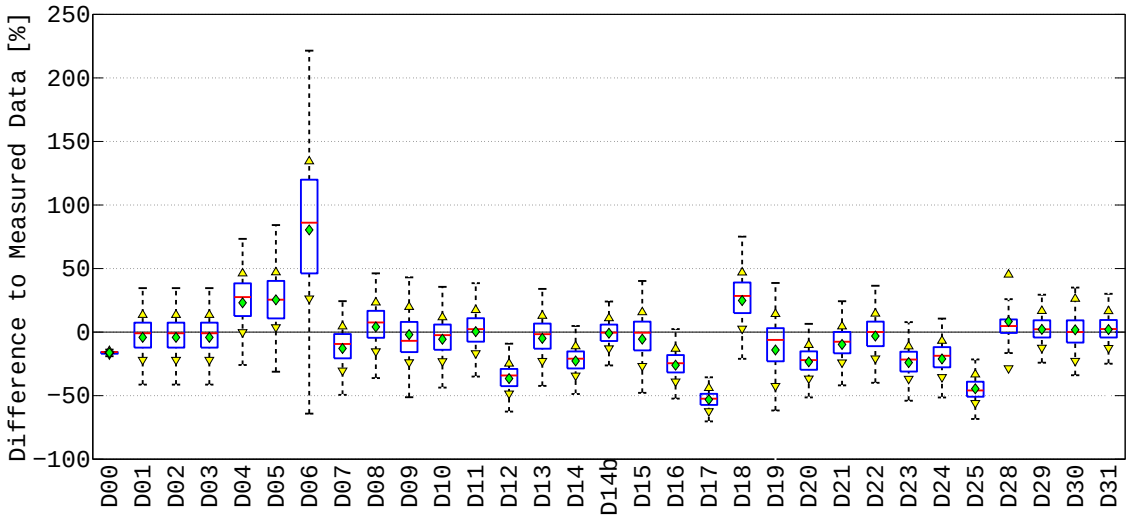
Figura 9.4: Diagrama modificado de Ineichen (Norte).

Tabla 9.3: Evaluación de modelos para la orientación Norte.

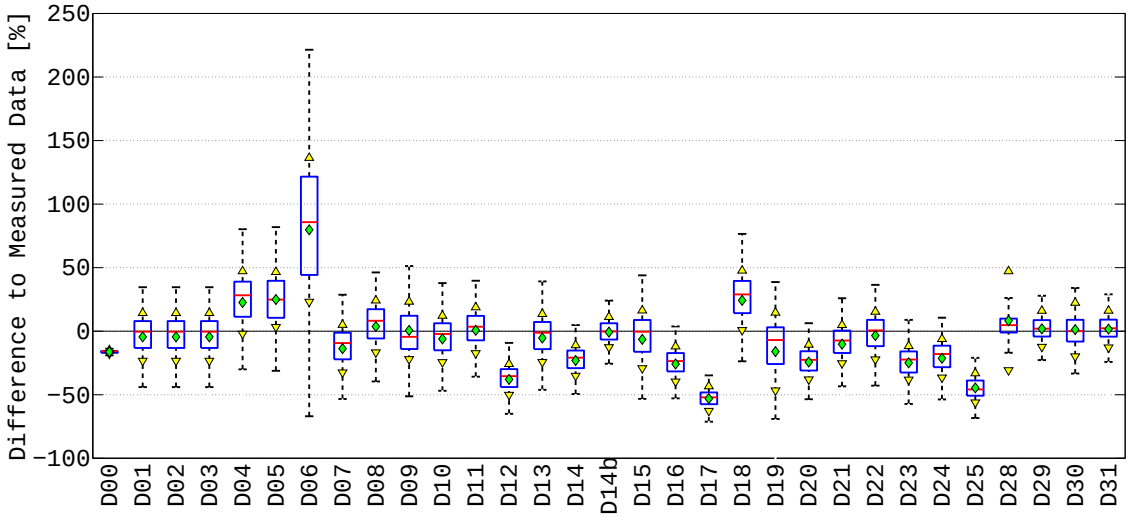
ID	MBD [W·m^{-2}]	RMSD [W·m^{-2}]	R^2 [-]	t [-]	d [W·m^{-2}]	$\mu_{0.99}$ [W·m^{-2}]
Modelos isótropos						
D01	−15.182 (13)	33.608 (11)	0.743 (16)	40.531 (12)	0.908 (10)	−16.054 (13)
D02	−15.182 (14)	33.608 (12)	0.743 (17)	40.531 (13)	0.908 (11)	−16.054 (14)
D03	−15.182 (15)	33.608 (13)	0.743 (18)	40.531 (14)	0.908 (12)	−16.054 (15)
D04	12.324 (10)	40.098 (16)	0.709 (22)	25.852 (10)	0.898 (14)	+13.433 (10)
D05	19.262 (17)	33.048 (09)	0.789 (08)	57.416 (20)	0.901 (13)	+20.043 (17)
Modelos anisótropos						
D06	76.996 (30)	117.899 (30)	0.591 (26)	69.027 (22)	0.565 (26)	+79.591 (30)
D07	−45.773 (26)	83.529 (29)	0.081 (30)	52.438 (18)	0.417 (28)	−47.804 (26)
D08	−6.913 (06)	32.608 (08)	0.732 (20)	17.363 (06)	0.920 (08)	−7.839 (06)
D09	8.280 (08)	53.423 (24)	0.753 (14)	12.557 (05)	0.871 (17)	+9.814 (08)
D10	−14.255 (11)	29.887 (06)	0.799 (07)	43.437 (15)	0.927 (07)	−15.019 (11)
D11	−7.212 (07)	30.362 (07)	0.786 (09)	19.574 (08)	0.935 (06)	−8.070 (07)
D12	−50.241 (27)	65.337 (26)	0.531 (27)	96.275 (27)	0.400 (29)	−51.456 (27)
D13	−19.047 (16)	39.008 (15)	0.667 (24)	44.784 (16)	0.869 (18)	−20.036 (16)
D14	−33.452 (21)	44.123 (19)	0.785 (10)	93.064 (25)	0.797 (20)	−34.288 (21)
D14b	−4.543 (05)	20.496 (04)	0.882 (03)	18.195 (07)	0.967 (03)	−5.124 (05)
D15	−24.689 (19)	48.514 (21)	0.511 (28)	47.321 (17)	0.784 (21)	−25.903 (19)
D16	−40.790 (25)	52.622 (23)	0.682 (23)	98.209 (28)	0.712 (23)	−41.756 (25)
D17	−65.122 (29)	73.290 (28)	0.843 (05)	155.023 (30)	0.274 (30)	−66.099 (29)
D18	10.616 (09)	40.650 (17)	0.659 (25)	21.655 (09)	0.889 (16)	+11.757 (09)
D19	−35.349 (22)	61.604 (25)	0.335 (29)	56.080 (19)	0.641 (25)	−36.815 (22)
D20	−38.999 (24)	51.302 (22)	0.722 (21)	93.652 (26)	0.690 (24)	−39.968 (24)
D21	−20.802 (18)	34.744 (14)	0.772 (12)	59.832 (21)	0.893 (15)	−21.611 (18)
D22	−14.413 (12)	33.367 (10)	0.742 (19)	38.338 (11)	0.910 (09)	−15.288 (12)
D23	−36.128 (23)	47.957 (20)	0.744 (15)	91.690 (23)	0.744 (22)	−37.045 (23)
D24	−32.317 (20)	42.885 (18)	0.773 (11)	91.756 (24)	0.824 (19)	−33.136 (20)
D25	−58.202 (28)	67.277 (27)	0.772 (13)	138.059 (29)	0.420 (27)	−59.183 (28)
Modelos no paramétricos						
D26	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)
D27	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)
D28	2.648 (04)	17.681 (01)	0.910 (01)	12.123 (04)	0.975 (01)	+3.156 (04)
D29	0.372 (02)	20.312 (03)	0.878 (04)	1.468 (02)	0.967 (04)	+0.963 (03)
D30	−0.010 (01)	26.564 (05)	0.802 (06)	0.031 (01)	0.946 (05)	−0.783 (01)
D31	0.372 (03)	19.837 (02)	0.884 (02)	1.502 (03)	0.968 (02)	+0.949 (02)



(a) $k_t \in (0.14, 0.30)$.

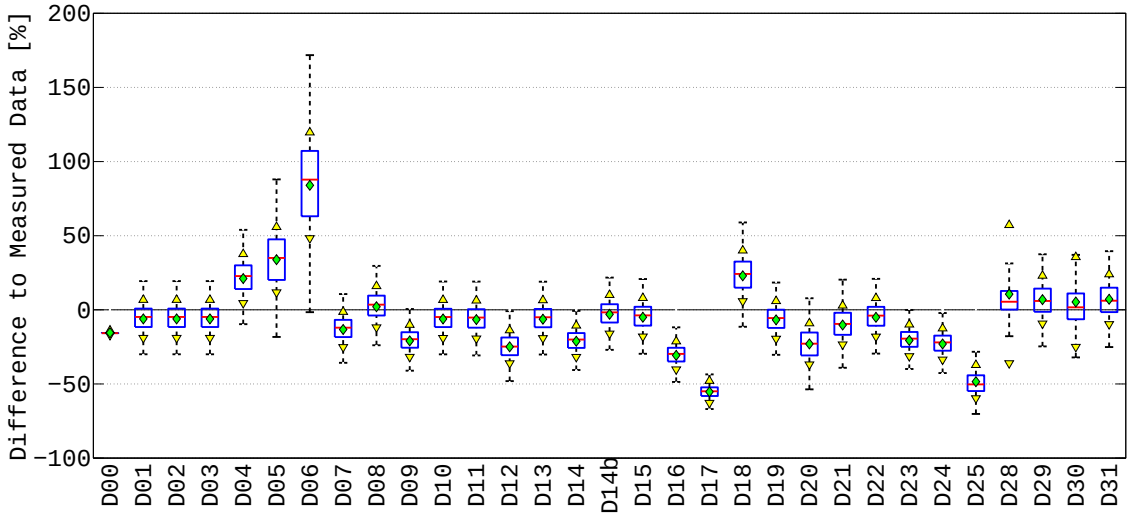


(b) $k_t \in (0.32, 0.50)$.

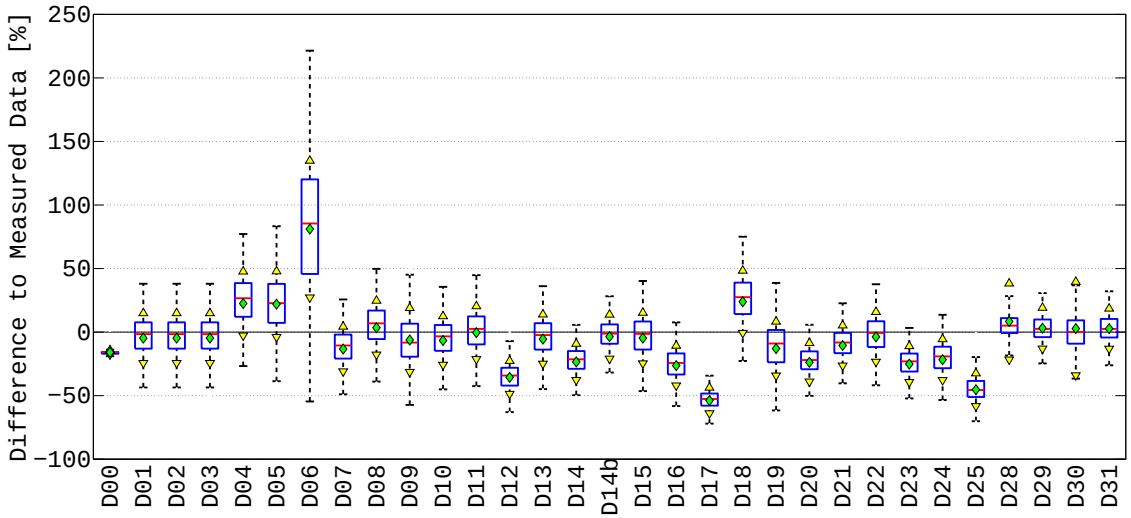


(c) $k_t \in (0.34, 0.51)$.

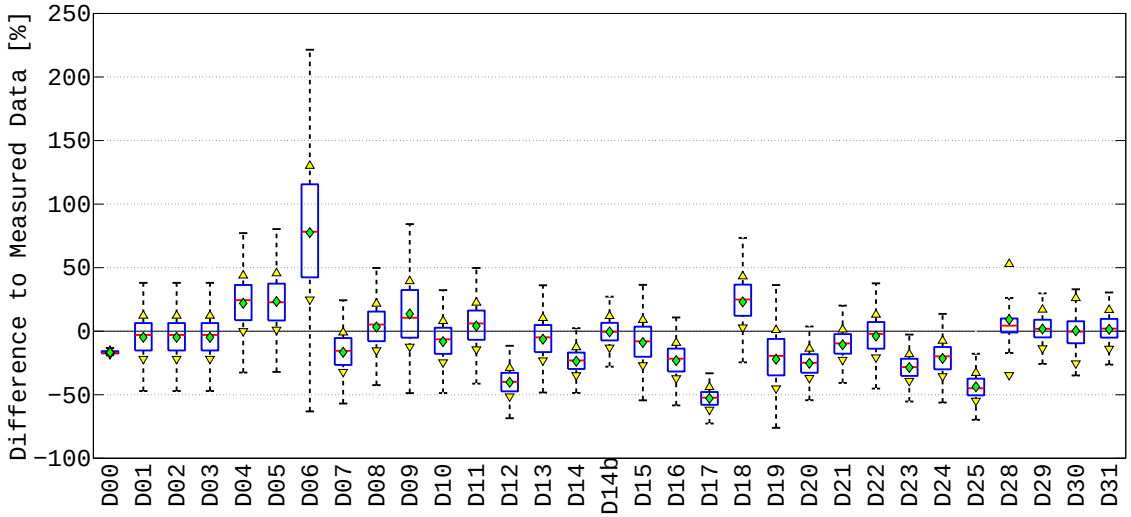
Figura 9.5: Análisis en función del índice de claridad k_t (Norte).



(a) $k_d \in (1.00, 1.10)$.

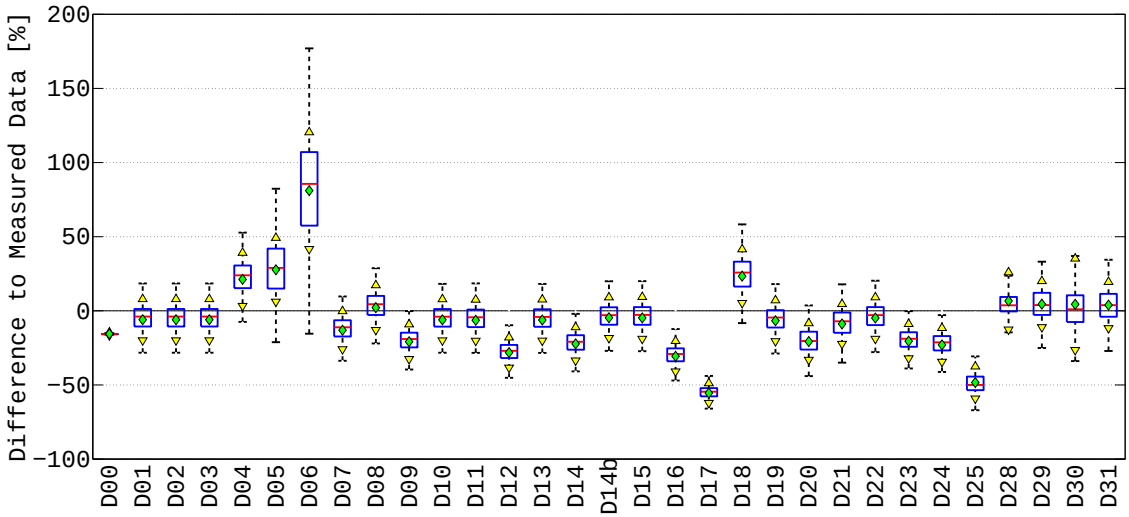


(b) $k_d \in (0.71, 1.00)$.

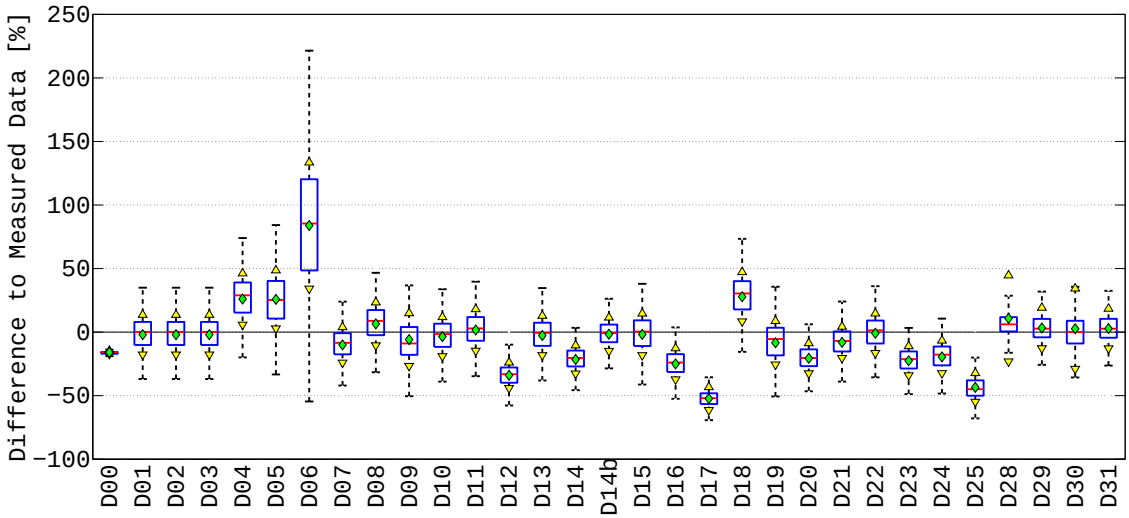


(c) $k_d \in (0.62, 0.95)$.

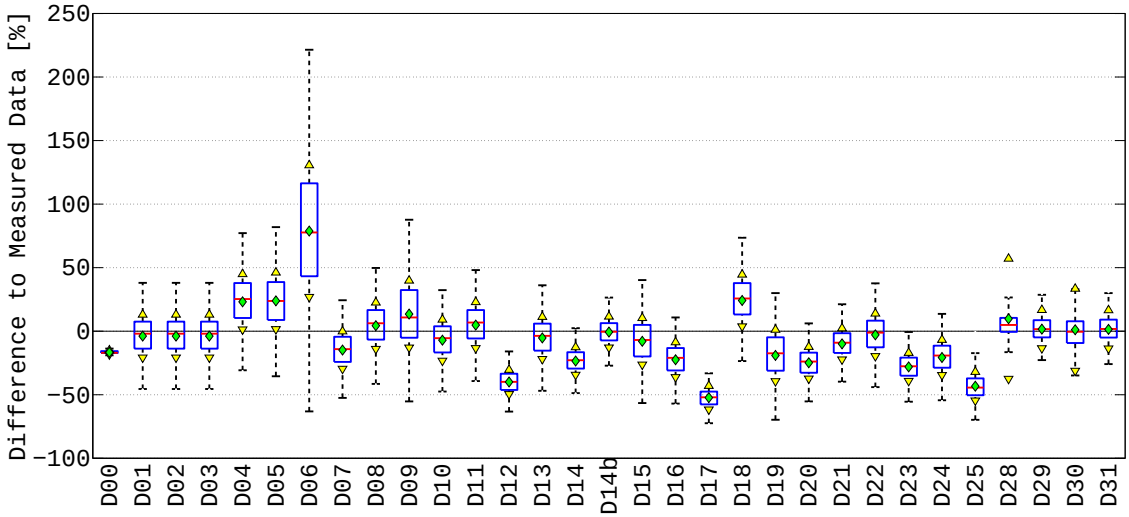
Figura 9.6: Análisis en función de la fracción difusa (Norte).



(a) $Si \in (0.35, 0.46)$.



(b) $Si \in (0.48, 1.23)$.



(c) $Si \in (0.82, 1.41)$.

Figura 9.7: Análisis en función del índice de cielo Si (Norte).

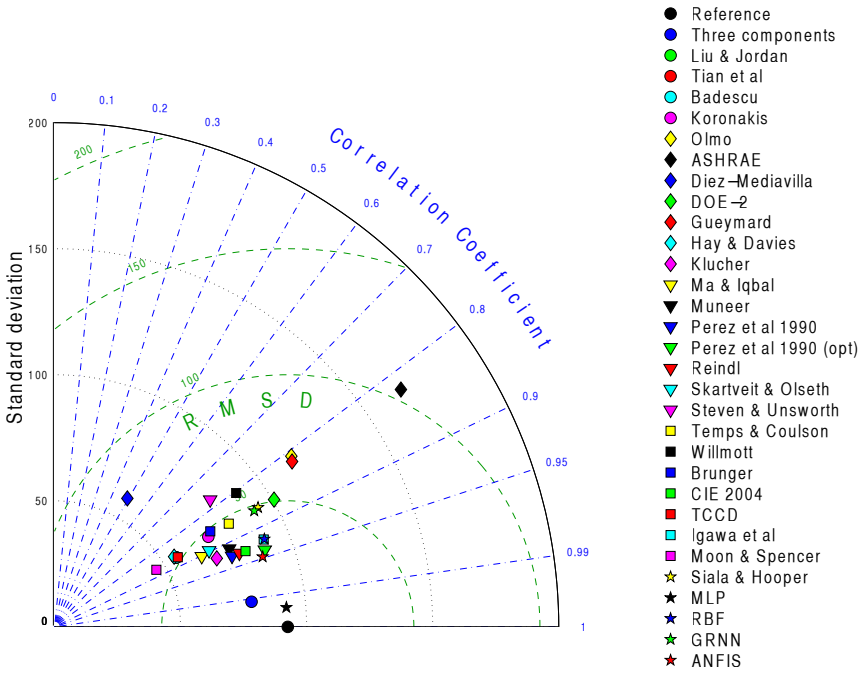


Figura 9.8: Diagrama de Taylor modelos de transposición (Sur).

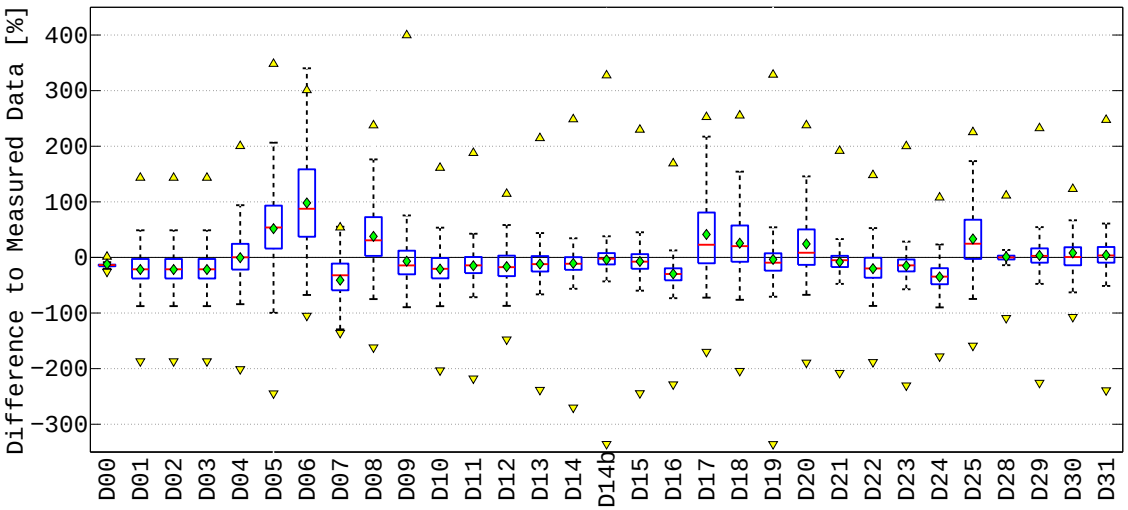
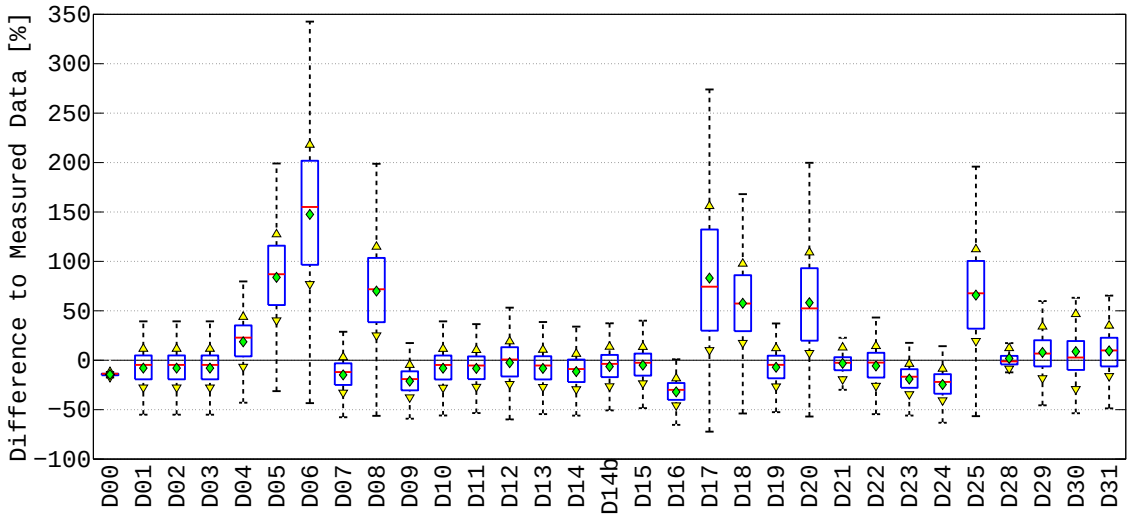


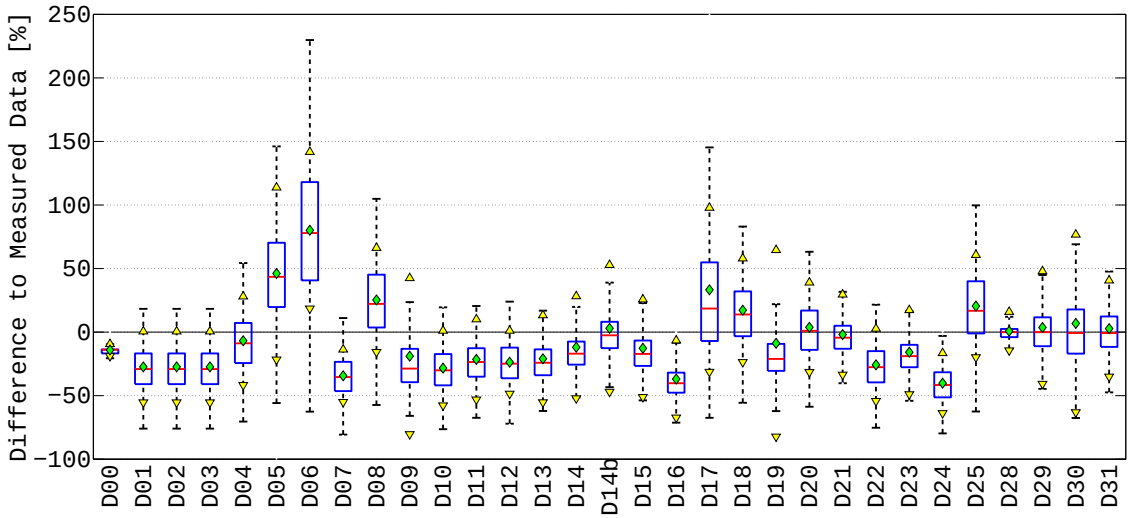
Figura 9.9: Diagrama modificado de Ineichen (Sur).

Tabla 9.4: Evaluación de modelos para la orientación Sur.

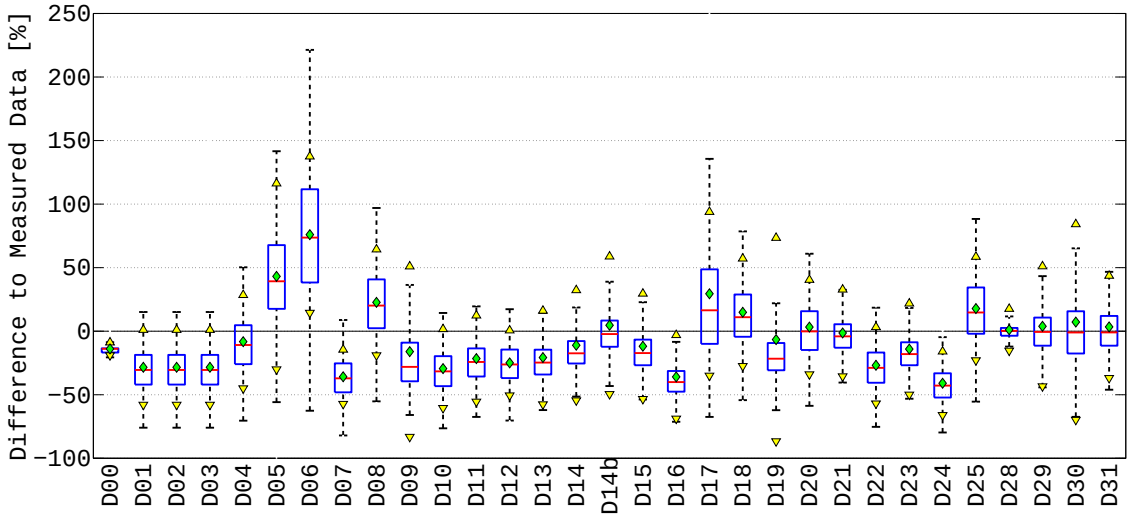
ID	MBD [W·m^{-2}]	RMSD [W·m^{-2}]	R^2 [-]	t [-]	d [W·m^{-2}]	$\mu_{0.99}$ [W·m^{-2}]
Modelos isótropos						
D01	−42.624 (23)	67.306 (23)	0.755 (15)	65.498 (24)	0.783 (24)	−44.138 (23)
D02	−42.624 (24)	67.306 (24)	0.755 (16)	65.498 (25)	0.783 (25)	−44.138 (24)
D03	−42.624 (25)	67.306 (25)	0.755 (17)	65.498 (26)	0.783 (26)	−44.138 (25)
D04	−15.118 (10)	49.995 (14)	0.744 (20)	25.393 (10)	0.901 (15)	−16.503 (10)
D05	52.596 (27)	85.730 (28)	0.658 (27)	62.186 (21)	0.817 (22)	+54.564 (27)
Modelos anisótropos						
D06	119.761 (30)	158.796 (30)	0.681 (25)	91.930 (30)	0.600 (29)	+122.792 (30)
D07	−73.215 (29)	109.589 (29)	0.243 (30)	71.869 (27)	0.381 (30)	−75.585 (29)
D08	35.852 (20)	62.160 (19)	0.748 (18)	56.515 (18)	0.891 (17)	+37.328 (20)
D09	−4.058 (05)	65.746 (21)	0.674 (26)	4.949 (05)	0.892 (16)	−5.965 (05)
D10	−41.697 (22)	67.422 (26)	0.744 (21)	62.994 (22)	0.780 (27)	−43.237 (22)
D11	−28.065 (17)	48.171 (11)	0.849 (09)	57.379 (19)	0.909 (12)	−29.203 (17)
D12	−32.789 (19)	55.000 (15)	0.813 (11)	59.436 (20)	0.873 (19)	−34.073 (19)
D13	−22.401 (15)	44.763 (09)	0.833 (10)	46.267 (16)	0.927 (10)	−23.528 (15)
D14	−19.498 (13)	40.731 (07)	0.863 (05)	43.642 (14)	0.940 (08)	−20.537 (13)
D14b	−5.616 (06)	32.395 (03)	0.882 (03)	14.089 (07)	0.967 (03)	−6.543 (06)
D15	−15.613 (11)	38.324 (06)	0.863 (06)	35.707 (12)	0.949 (06)	−16.630 (11)
D16	−44.144 (26)	61.980 (18)	0.804 (12)	81.218 (28)	0.845 (21)	−45.409 (26)
D17	25.361 (16)	64.296 (20)	0.600 (29)	34.357 (11)	0.849 (20)	+27.078 (16)
D18	14.892 (09)	49.426 (13)	0.741 (23)	25.293 (09)	0.914 (11)	+16.262 (09)
D19	−11.582 (08)	58.105 (17)	0.648 (28)	16.281 (08)	0.890 (18)	−13.237 (08)
D20	7.286 (07)	49.362 (12)	0.726 (24)	11.945 (06)	0.905 (13)	+8.705 (07)
D21	−15.945 (12)	37.923 (05)	0.864 (04)	37.093 (13)	0.951 (05)	−16.945 (12)
D22	−40.710 (21)	65.779 (22)	0.758 (14)	63.067 (23)	0.794 (23)	−42.212 (21)
D23	−19.817 (14)	41.049 (08)	0.851 (07)	44.124 (15)	0.948 (07)	−20.862 (14)
D24	−59.758 (28)	82.479 (27)	0.761 (13)	84.141 (29)	0.630 (28)	−61.411 (28)
D25	28.617 (18)	56.569 (16)	0.744 (22)	46.942 (17)	0.902 (14)	+30.036 (18)
Modelos no paramétricos						
D26	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)
D27	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)
D28	0.249 (02)	7.724 (01)	0.993 (01)	2.579 (04)	0.998 (01)	+0.473 (01)
D29	0.295 (03)	36.032 (04)	0.851 (08)	0.656 (03)	0.960 (04)	+1.343 (03)
D30	−0.391 (04)	47.939 (10)	0.747 (19)	0.653 (02)	0.928 (09)	−1.785 (04)
D31	0.179 (01)	29.546 (02)	0.898 (02)	0.486 (01)	0.972 (02)	+1.038 (02)



(a) $k_t \in (0.14, 0.30)$.

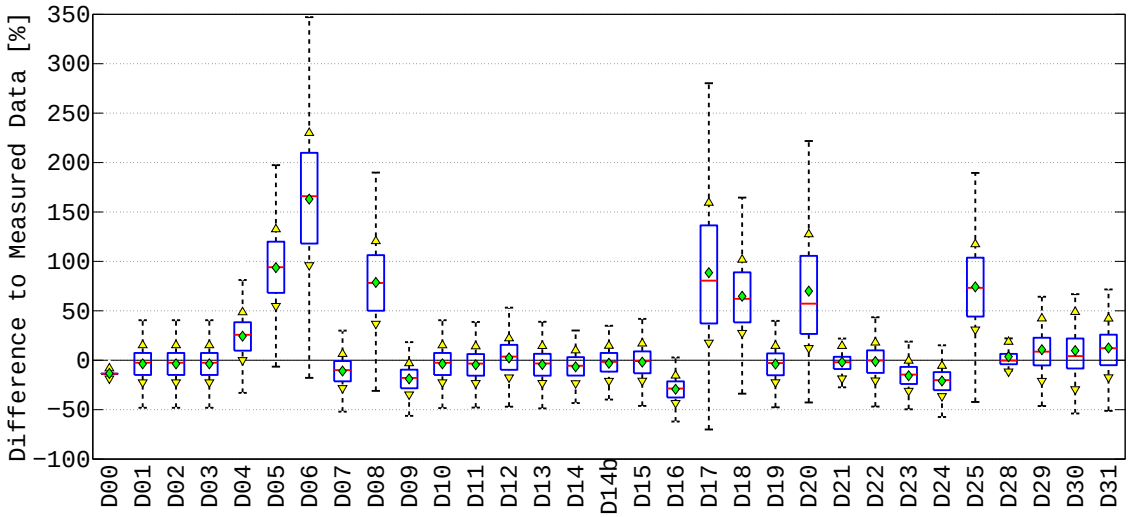


(b) $k_t \in (0.32, 0.50)$.

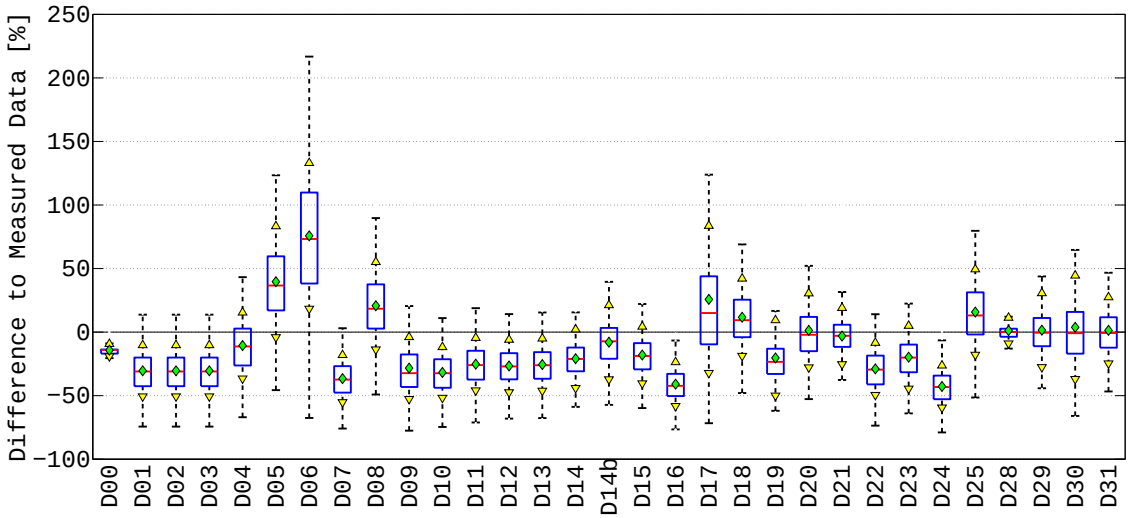


(c) $k_t \in (0.34, 0.51)$.

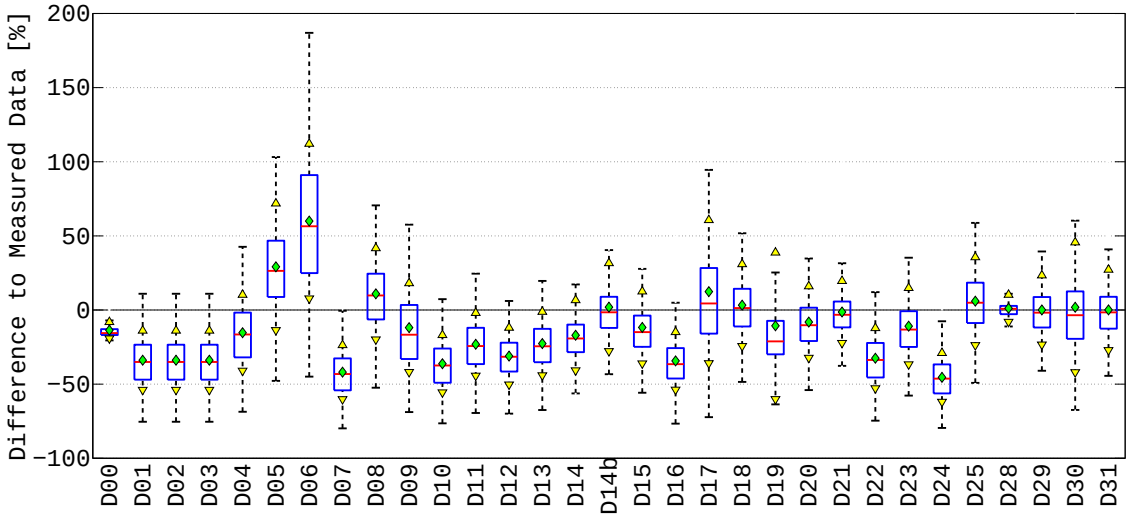
Figura 9.10: Análisis en función del índice de claridad k_t (Sur).



(a) $k_d \in (1.00, 1.10)$.

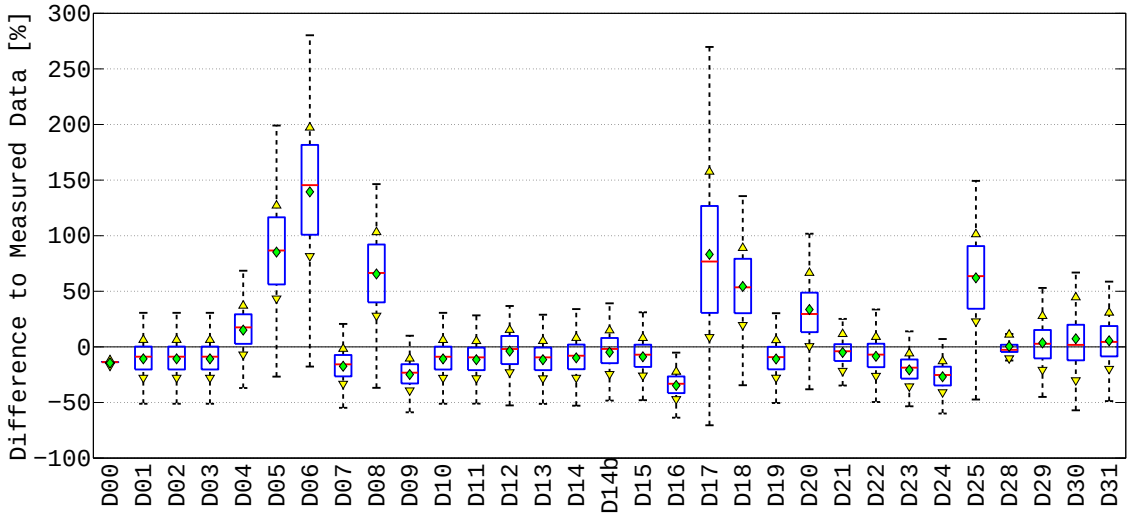


(b) $k_d \in (0.71, 1.00)$.

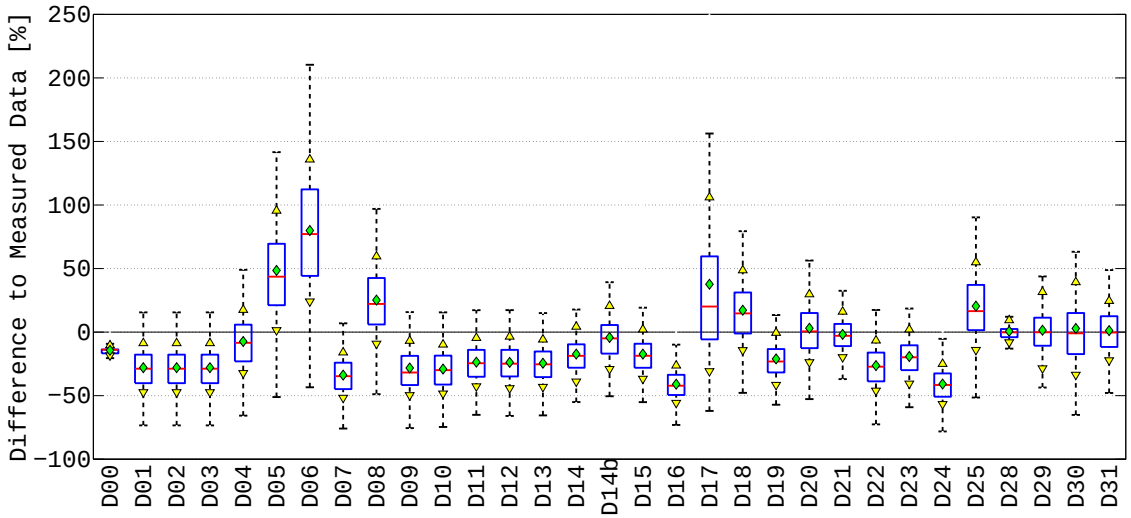


(c) $k_d \in (0.62, 0.95)$.

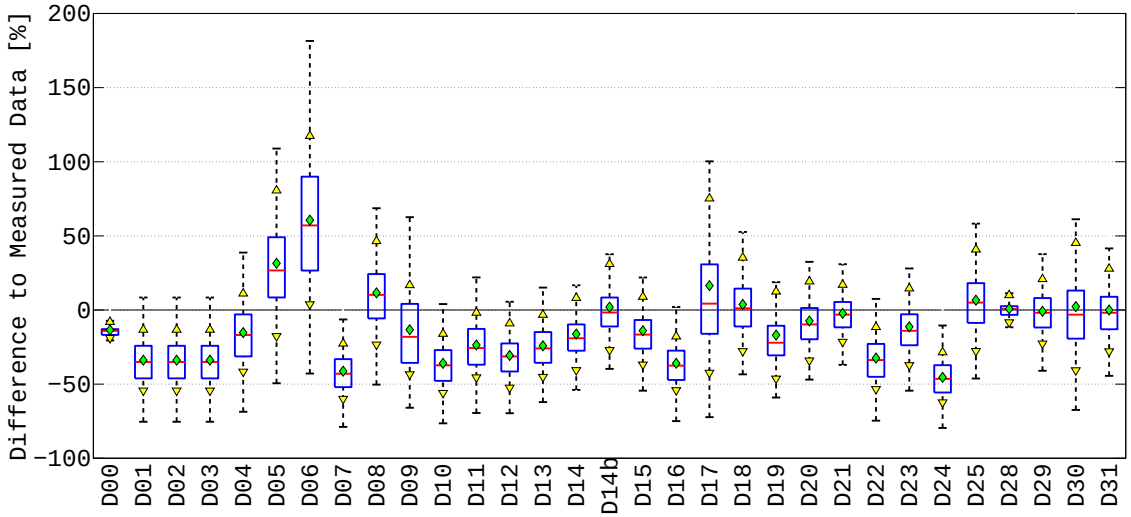
Figura 9.11: Análisis en función de la fracción difusa (Sur).



(a) $Si \in (0.35, 0.46)$.



(b) $Si \in (0.48, 1.23)$.



(c) $Si \in (0.82, 1.41)$.

Figura 9.12: Análisis en función del índice de cielo Si (Sur).

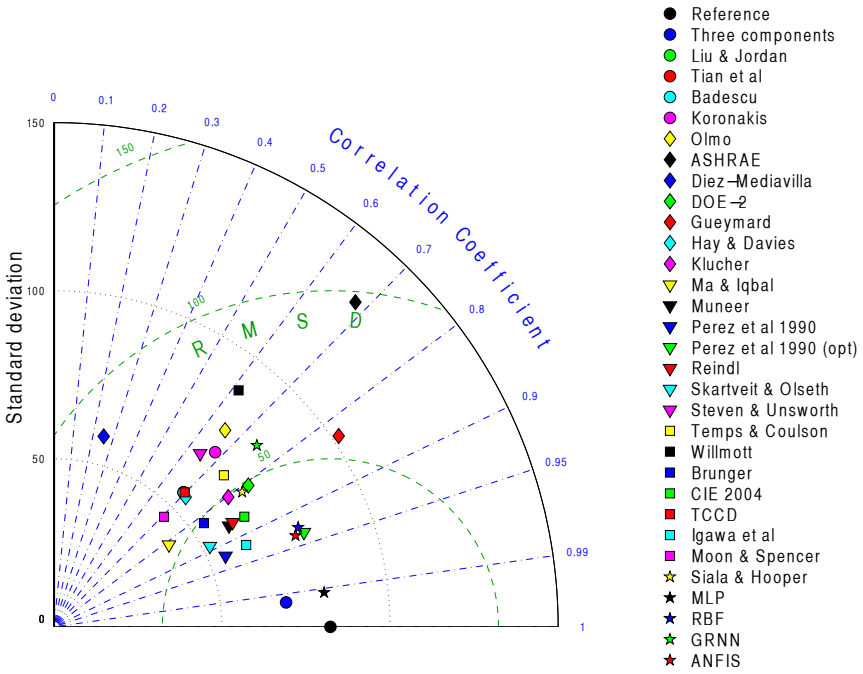


Figura 9.13: Diagrama de Taylor modelos de transposición (Este).

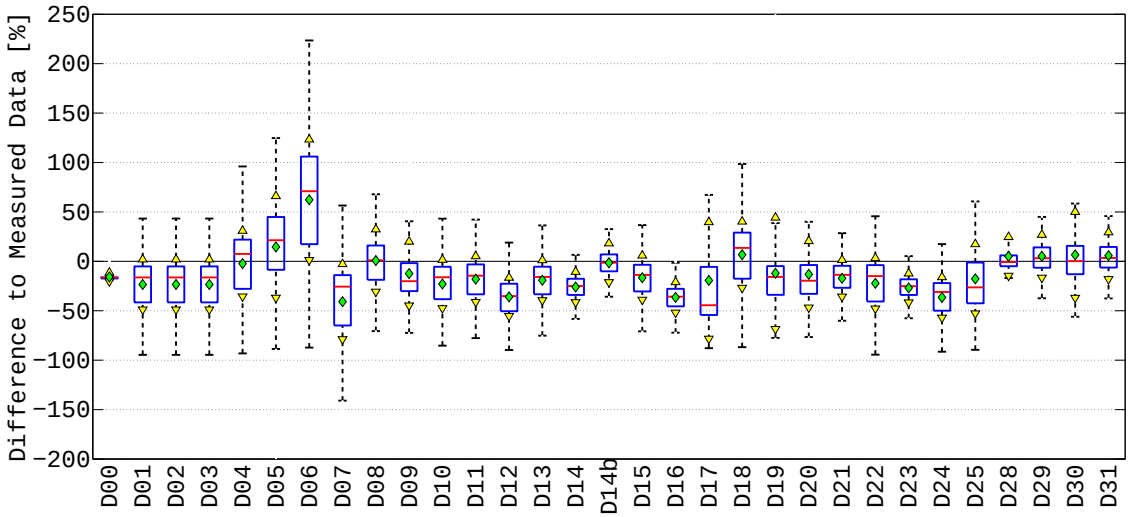
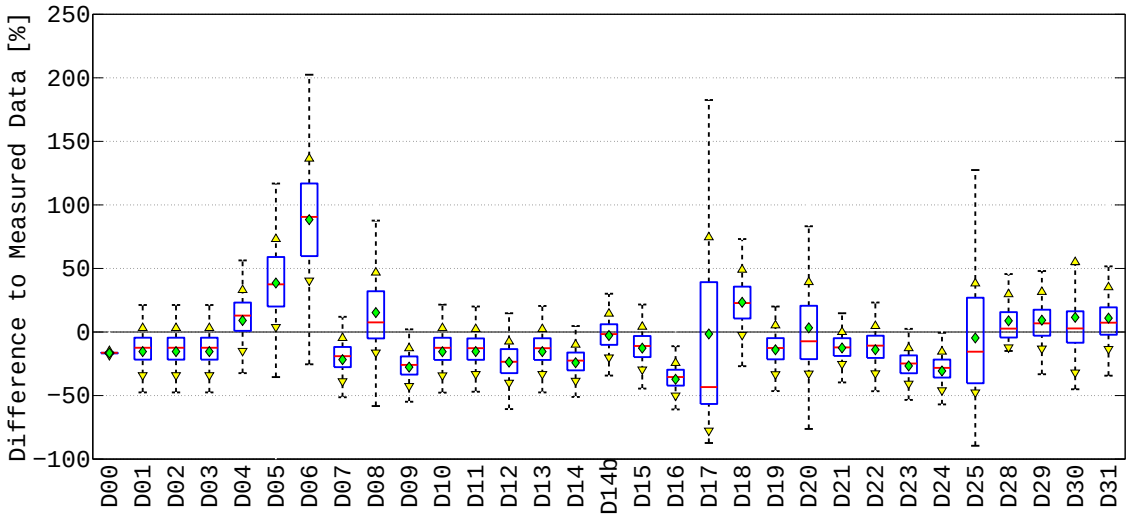


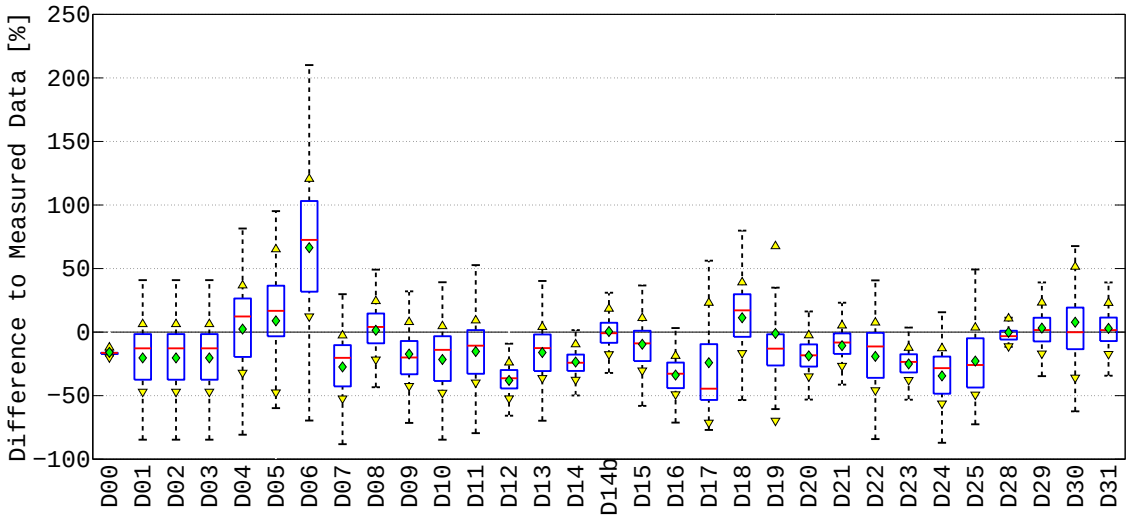
Figura 9.14: Diagrama modificado de Ineichen (Este).

Tabla 9.5: Evaluación de modelos para la orientación Este.

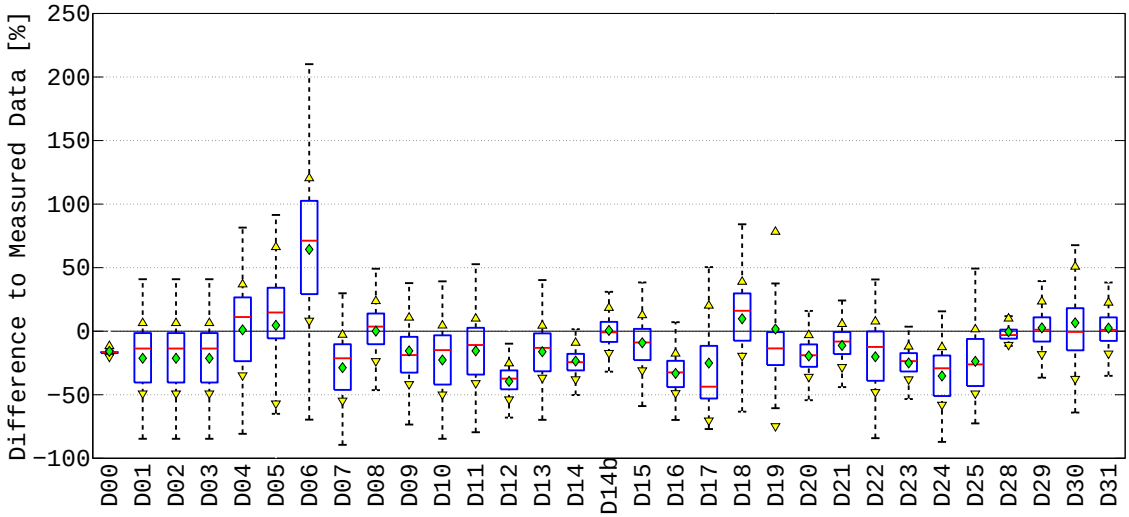
ID	MBD [W·m^{-2}]	RMSD [W·m^{-2}]	R^2 [-]	t [-]	d [W·m^{-2}]	$\mu_{0.99}$ [W·m^{-2}]
Modelos isótropos						
D01	−42.950 (23)	73.171 (22)	0.482 (22)	58.034 (19)	0.685 (24)	−44.673 (23)
D02	−42.950 (24)	73.171 (23)	0.482 (23)	58.034 (20)	0.685 (25)	−44.673 (24)
D03	−42.950 (25)	73.171 (24)	0.482 (24)	58.034 (21)	0.685 (26)	−44.673 (25)
D04	−15.444 (10)	64.154 (17)	0.460 (26)	19.854 (10)	0.802 (18)	−17.254 (10)
D05	1.696 (05)	66.375 (18)	0.431 (27)	2.046 (02)	0.804 (17)	+3.625 (05)
Modelos anisótropos						
D06	74.306 (30)	122.087 (30)	0.463 (25)	61.399 (23)	0.637 (27)	+77.122 (30)
D07	−73.541 (29)	114.758 (29)	0.064 (30)	66.819 (25)	0.178 (30)	−76.102 (29)
D08	−9.603 (08)	49.594 (05)	0.654 (15)	15.798 (08)	0.888 (06)	−11.017 (08)
D09	−11.320 (09)	57.928 (13)	0.690 (11)	15.949 (09)	0.894 (05)	−12.971 (09)
D10	−42.023 (22)	71.478 (20)	0.508 (19)	58.176 (22)	0.699 (22)	−43.704 (22)
D11	−31.461 (15)	58.360 (16)	0.643 (16)	51.232 (13)	0.829 (14)	−32.889 (15)
D12	−60.618 (28)	81.116 (27)	0.662 (13)	90.017 (28)	0.547 (28)	−62.185 (28)
D13	−33.361 (17)	54.110 (09)	0.750 (08)	62.680 (24)	0.848 (12)	−34.599 (17)
D14	−41.521 (20)	56.066 (11)	0.854 (05)	88.217 (27)	0.829 (15)	−42.616 (20)
D14b	−4.431 (06)	29.572 (03)	0.875 (02)	12.131 (07)	0.966 (02)	−5.281 (06)
D15	−30.174 (13)	52.215 (07)	0.745 (10)	56.677 (18)	0.861 (08)	−31.413 (13)
D16	−55.104 (26)	70.004 (19)	0.789 (07)	102.158 (30)	0.717 (20)	−56.359 (26)
D17	−40.348 (18)	76.089 (25)	0.416 (28)	50.064 (12)	0.713 (21)	−42.223 (19)
D18	−5.466 (07)	55.404 (10)	0.557 (17)	7.936 (06)	0.850 (11)	−7.069 (07)
D19	−24.013 (11)	79.213 (26)	0.379 (29)	25.463 (11)	0.750 (19)	−26.207 (11)
D20	−32.156 (16)	58.320 (15)	0.677 (12)	52.901 (15)	0.806 (16)	−33.570 (16)
D21	−29.016 (12)	50.710 (06)	0.749 (09)	55.844 (16)	0.876 (07)	−30.225 (12)
D22	−41.562 (21)	72.172 (21)	0.486 (21)	56.383 (17)	0.695 (23)	−43.277 (21)
D23	−40.378 (19)	53.402 (08)	0.847 (06)	92.481 (29)	0.859 (09)	−41.394 (18)
D24	−60.085 (27)	84.458 (28)	0.500 (20)	81.029 (26)	0.522 (29)	−61.810 (27)
D25	−31.120 (14)	57.156 (12)	0.661 (14)	51.959 (14)	0.847 (13)	−32.514 (14)
Modelos no paramétricos						
D26	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)
D27	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)
D28	0.929 (03)	10.434 (01)	0.984 (01)	7.157 (05)	0.996 (01)	+1.231 (01)
D29	0.949 (04)	31.114 (04)	0.858 (04)	2.443 (04)	0.961 (04)	+1.853 (03)
D30	−0.312 (01)	58.232 (14)	0.556 (18)	0.429 (01)	0.859 (10)	−2.005 (04)
D31	0.800 (02)	29.088 (02)	0.875 (03)	2.202 (03)	0.966 (03)	+1.645 (02)



(a) $k_t \in (0.14, 0.30)$.

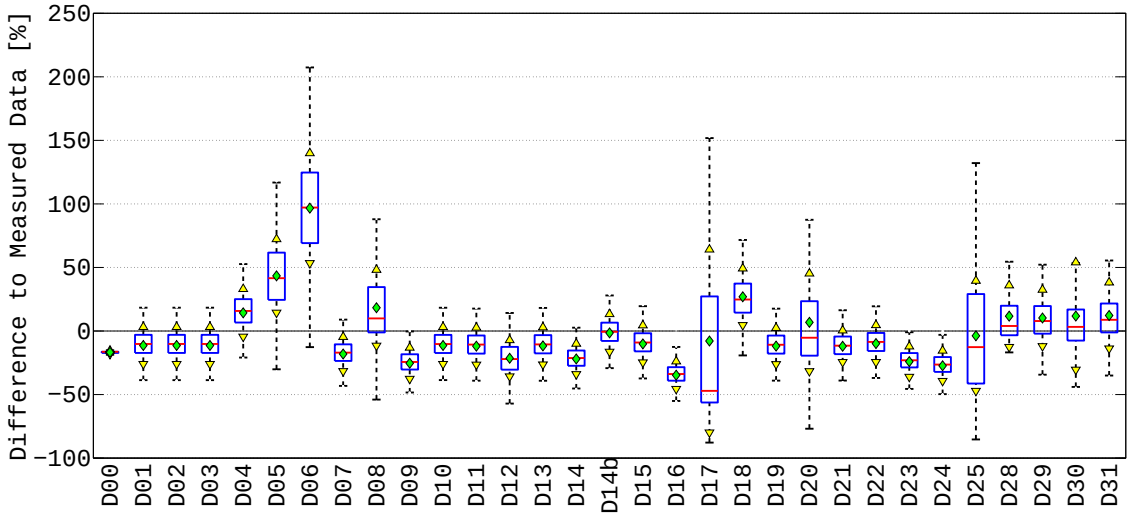


(b) $k_t \in (0.32, 0.50)$.

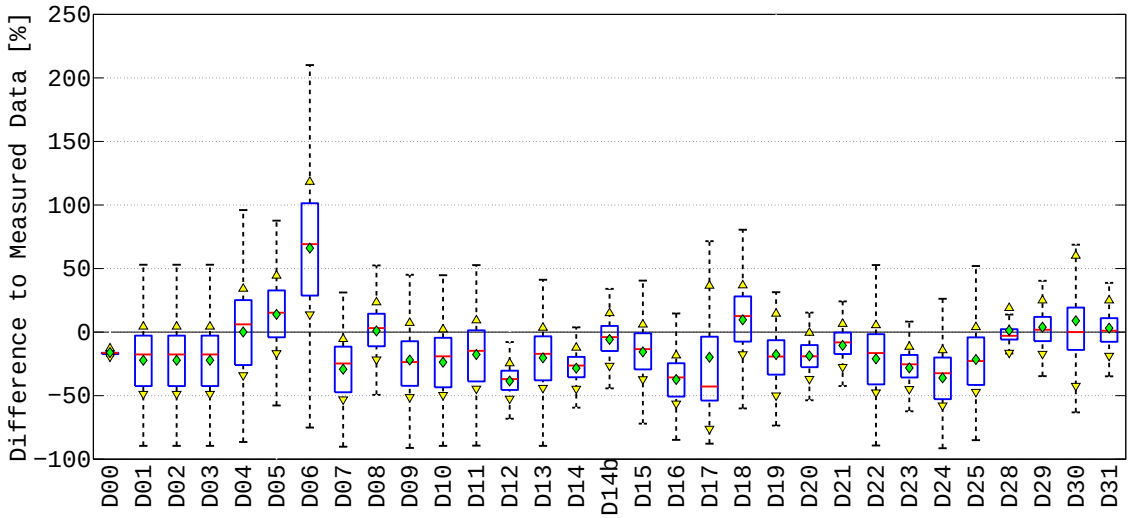


(c) $k_t \in (0.34, 0.51)$.

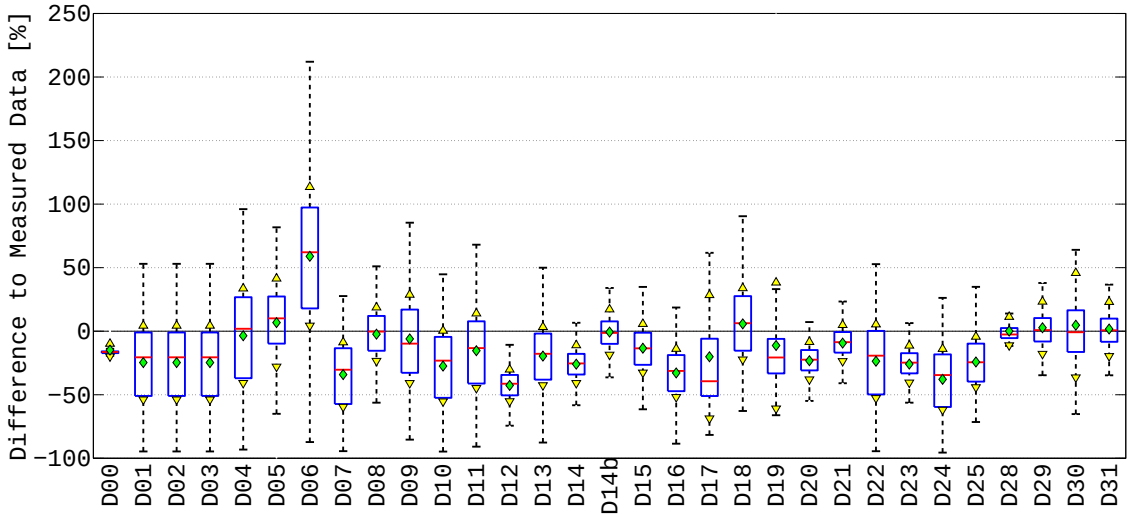
Figura 9.15: Análisis en función del índice de claridad k_t (Este).



(a) $k_d \in (1.00, 1.10)$.

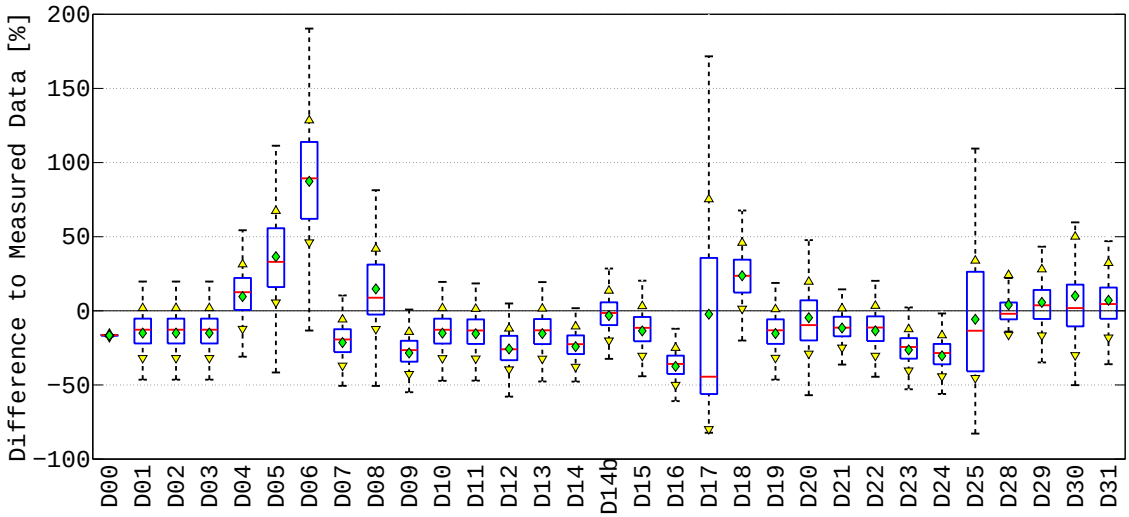


(b) $k_d \in (0.71, 1.00)$.

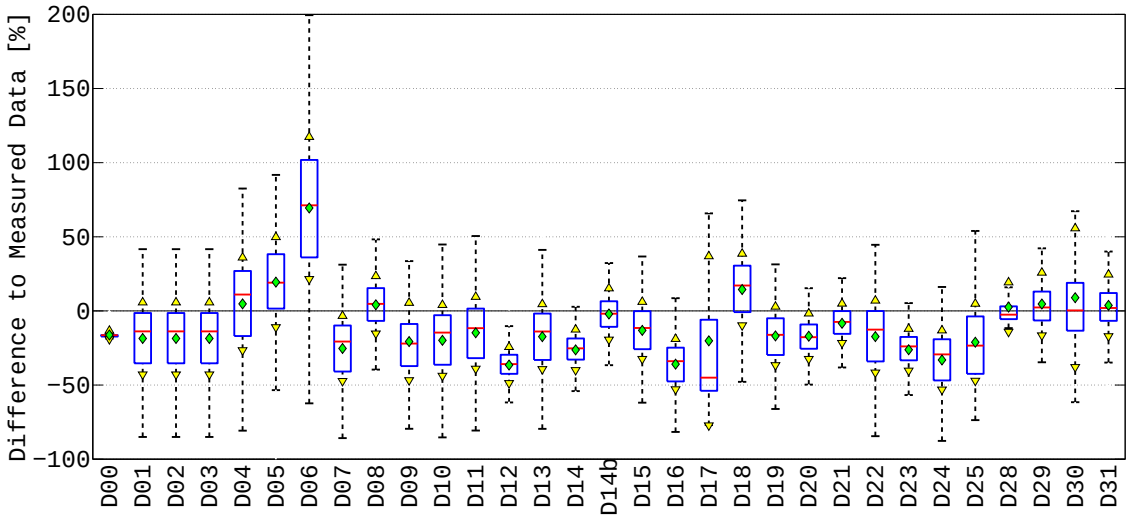


(c) $k_d \in (0.62, 0.95)$.

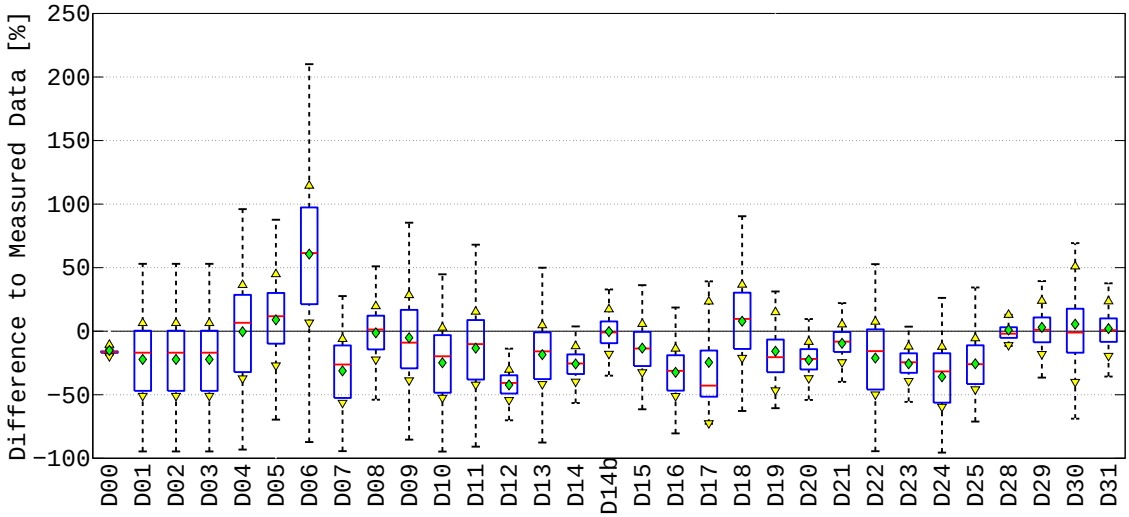
Figura 9.16: Análisis en función de la fracción difusa (Este).



(a) $Si \in (0.35, 0.46)$.



(b) $Si \in (0.48, 1.23)$.



(c) $Si \in (0.82, 1.41)$.

Figura 9.17: Análisis en función del índice de cielo Si (Este).

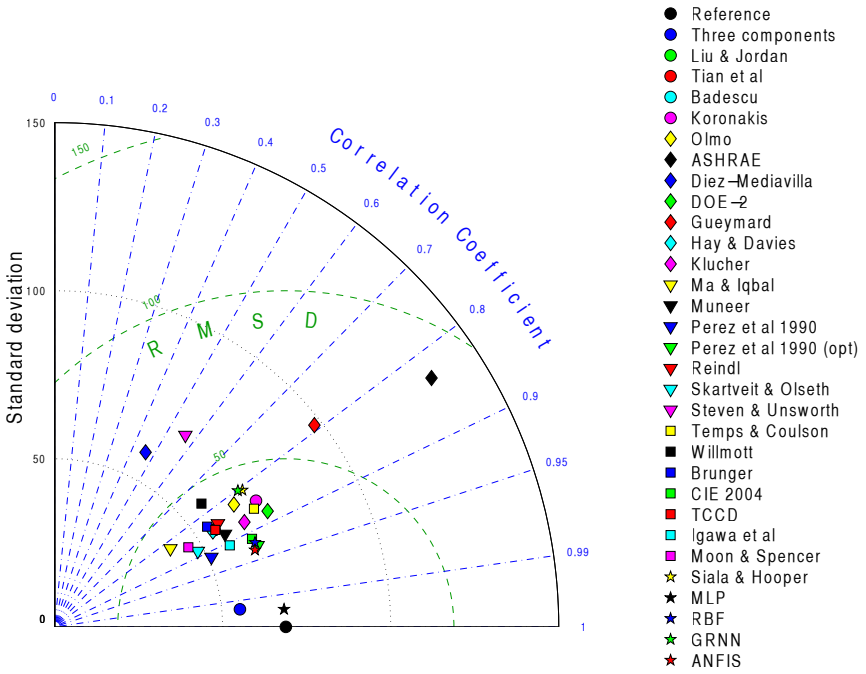


Figura 9.18: Diagrama de Taylor modelos de transposición (Oeste).

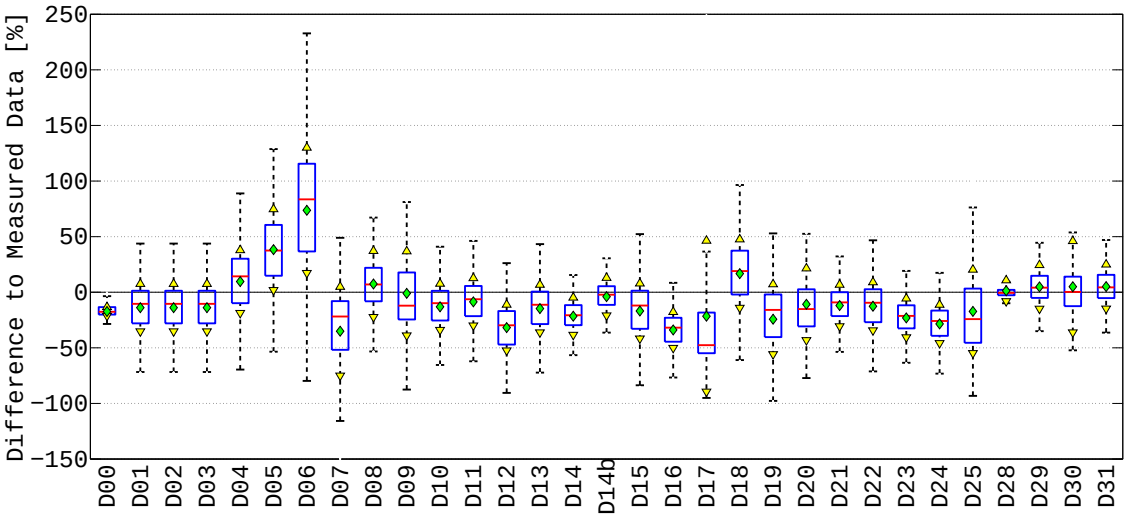
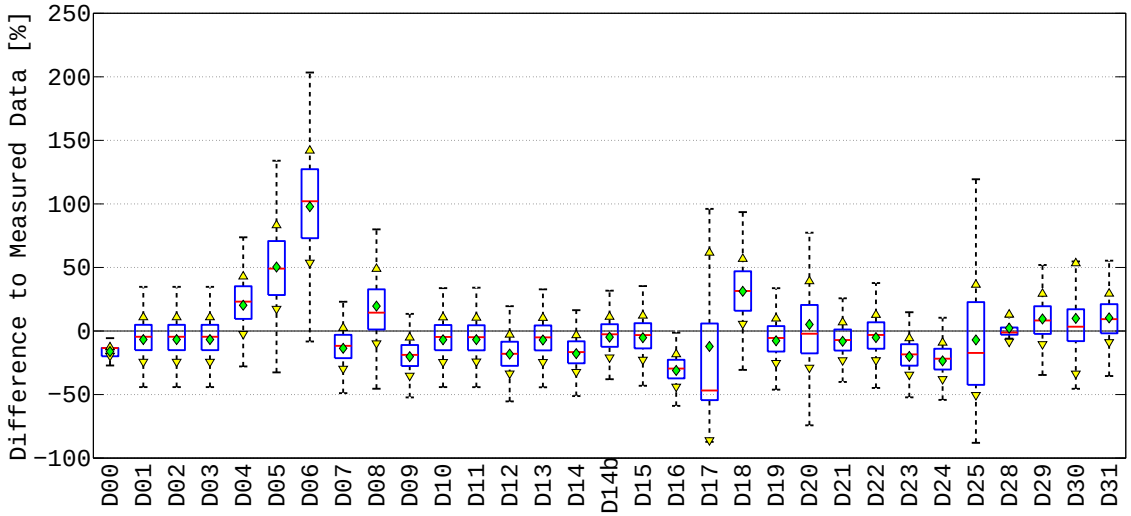


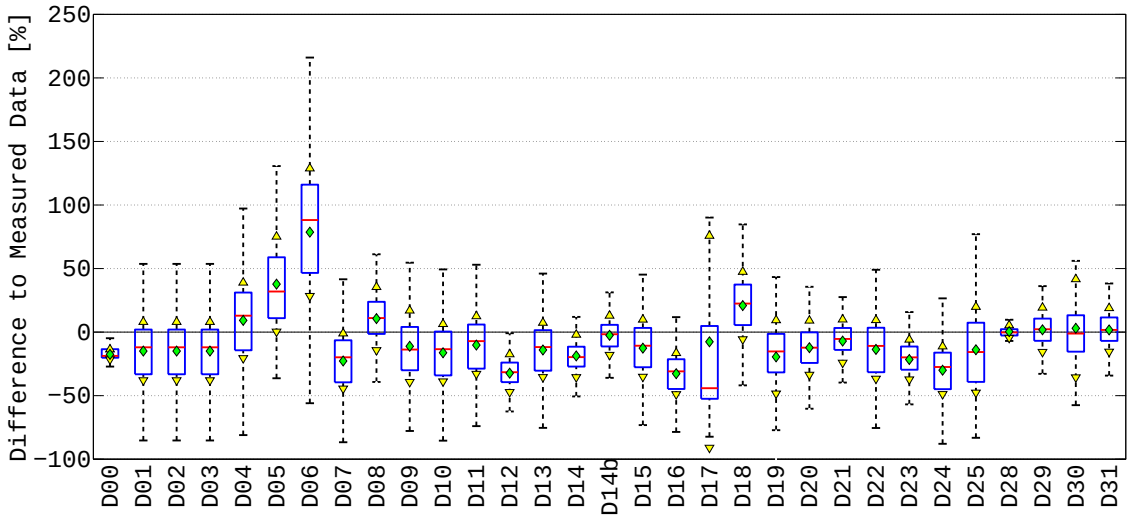
Figura 9.19: Diagrama modificado de Ineichen (Oeste).

Tabla 9.6: Evaluación de modelos para la orientación Oeste.

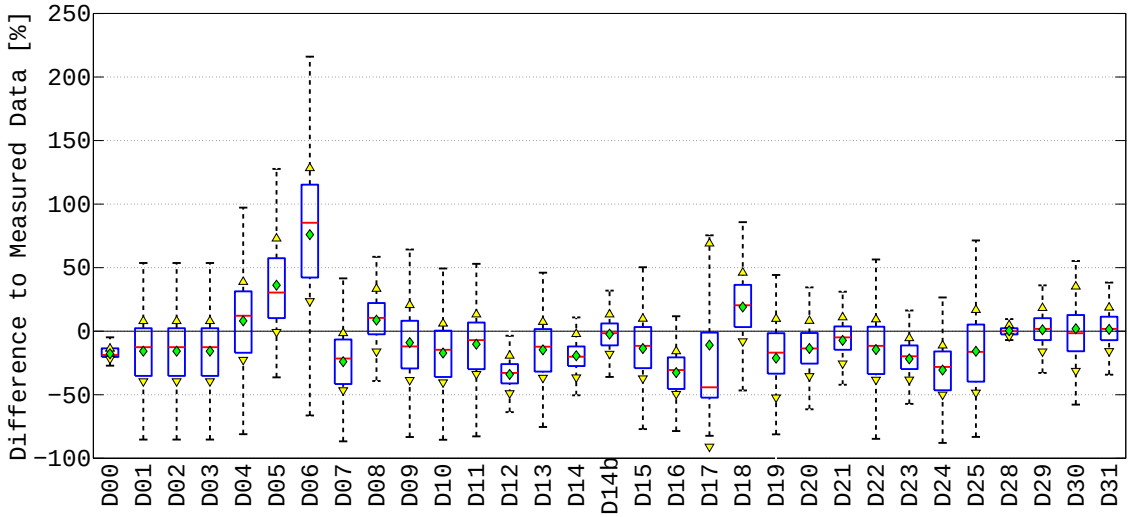
ID	MBD [W·m^{-2}]	RMSD [W·m^{-2}]	R^2 [-]	t [-]	d [W·m^{-2}]	$\mu_{0.99}$ [W·m^{-2}]
Modelos isótropos						
D01	−21.455 (15)	41.779 (14)	0.731 (16)	47.905 (17)	0.881 (15)	−22.497 (15)
D02	−21.455 (16)	41.779(15)	0.731 (17)	47.905 (18)	0.881 (16)	−22.497 (16)
D03	−21.455 (17)	41.779(16)	0.731 (18)	47.905 (19)	0.881 (17)	−22.497 (17)
D04	6.051 (07)	39.030(09)	0.718 (19)	12.561 (07)	0.917 (09)	+7.172 (07)
D05	30.784 (23)	50.107(22)	0.683 (24)	62.325 (23)	0.849 (23)	+31.933 (23)
Modelos anisótropos						
D06	88.239 (30)	123.064 (30)	0.696 (22)	82.335 (27)	0.613 (29)	+90.732 (30)
D07	−52.046 (29)	84.536 (29)	0.214 (30)	62.539 (24)	0.477 (30)	−53.983 (29)
D08	4.330 (06)	35.108 (06)	0.772 (09)	9.948 (06)	0.935 (06)	+5.343 (05)
D09	4.138 (05)	60.738 (26)	0.624 (27)	5.466 (05)	0.855 (22)	+5.900 (06)
D10	−20.528 (13)	41.203 (12)	0.734 (14)	45.995 (16)	0.883 (14)	−21.567 (13)
D11	−12.713 (10)	35.840 (07)	0.767 (11)	30.368 (10)	0.924 (07)	−13.687 (10)
D12	−45.415 (28)	61.532 (27)	0.686 (23)	87.560 (29)	0.671 (28)	−46.622 (28)
D13	−21.756 (18)	39.549 (10)	0.771 (10)	52.728 (20)	0.898 (10)	−22.716 (18)
D14	−29.872 (22)	42.590 (17)	0.835 (05)	78.762 (25)	0.870 (18)	−30.754 (22)
D14b	−6.703 (08)	26.525 (03)	0.861 (03)	20.905 (08)	0.960 (03)	−7.449 (08)
D15	−25.272 (20)	44.634 (20)	0.714 (20)	54.985 (21)	0.868 (21)	−26.342 (20)
D16	−43.499 (27)	55.555 (24)	0.781 (08)	100.757 (30)	0.765 (26)	−44.504 (27)
D17	−34.142 (24)	72.893 (28)	0.318 (29)	42.434 (12)	0.682 (27)	−36.014 (25)
D18	12.044 (09)	38.356 (08)	0.740 (12)	26.474 (09)	0.919 (08)	+13.103 (09)
D19	−34.526 (25)	56.268 (25)	0.587 (28)	62.200 (22)	0.785 (24)	−35.817 (24)
D20	−21.059 (14)	43.362 (19)	0.699 (21)	44.471 (13)	0.869 (20)	−22.161 (14)
D21	−15.753 (11)	32.172 (05)	0.834 (06)	44.951 (14)	0.940 (05)	−16.568 (11)
D22	−20.193 (12)	40.985 (11)	0.733 (15)	45.317 (15)	0.886 (13)	−21.229 (12)
D23	−29.576 (21)	41.734 (13)	0.822 (07)	80.400 (26)	0.887 (12)	−30.432 (21)
D24	−38.590 (26)	53.773 (23)	0.739 (13)	82.483 (28)	0.770 (25)	−39.678 (26)
D25	−22.217 (19)	48.120 (21)	0.654 (25)	41.663 (11)	0.870 (19)	−23.458 (19)
Modelos no paramétricos						
D26	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)
D27	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)	** (**)
D28	0.002 (01)	5.254 (01)	0.994 (01)	0.024 (01)	0.999 (01)	+0.154 (01)
D29	0.058 (02)	26.726 (04)	0.849 (04)	0.174 (02)	0.959 (04)	+0.835 (02)
D30	−0.685 (04)	42.954 (18)	0.645 (26)	1.276 (04)	0.893 (11)	−1.933 (04)
D31	0.218 (03)	24.649 (02)	0.872 (02)	0.708 (03)	0.965 (02)	+0.935 (03)



(a) $k_t \in (0.14, 0.30)$.

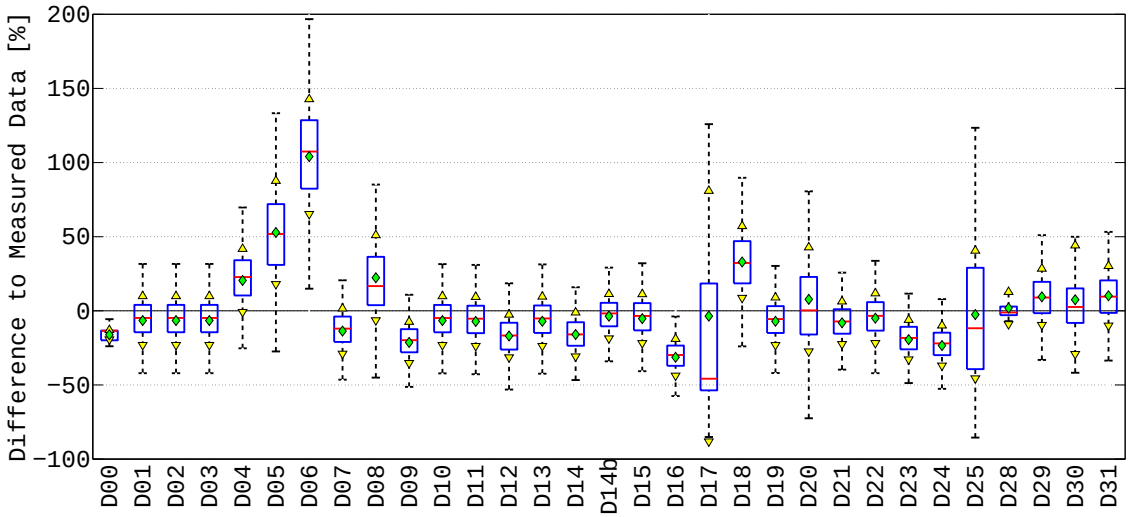


(b) $k_t \in (0.32, 0.50)$.

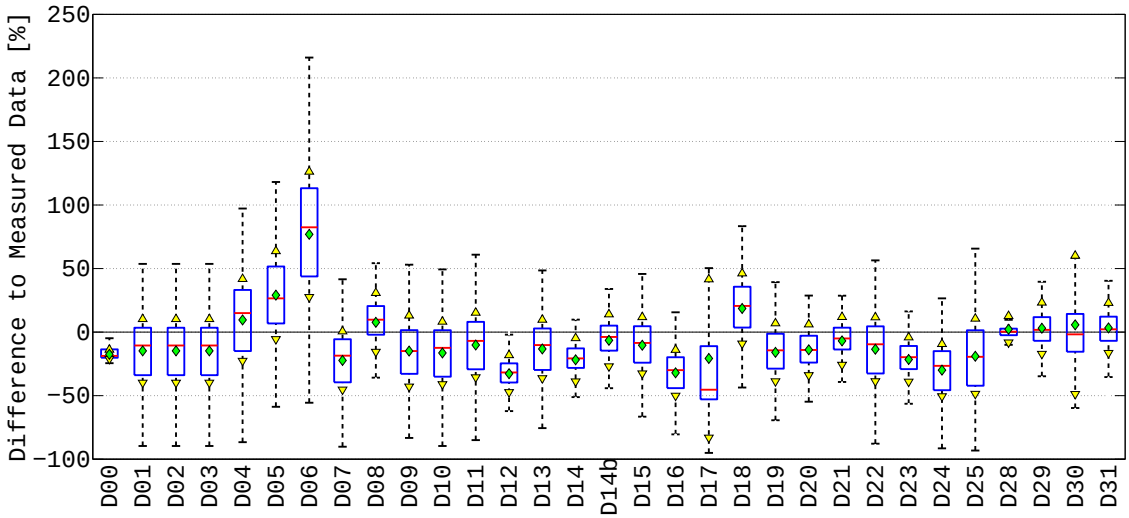


(c) $k_t \in (0.34, 0.51)$.

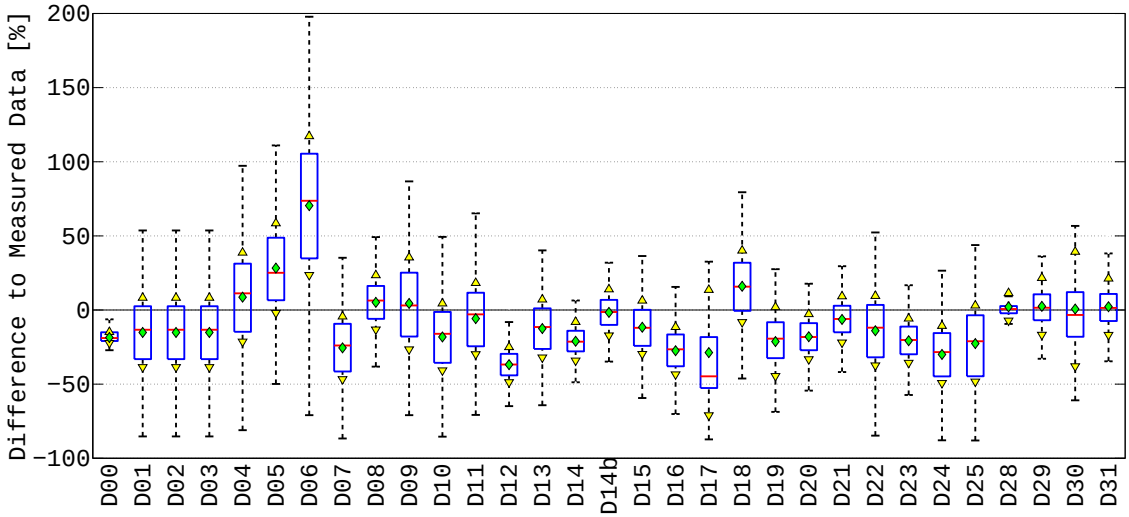
Figura 9.20: Análisis en función del índice de claridad k_t (Oeste).



(a) $k_d \in (1.00, 1.10)$.

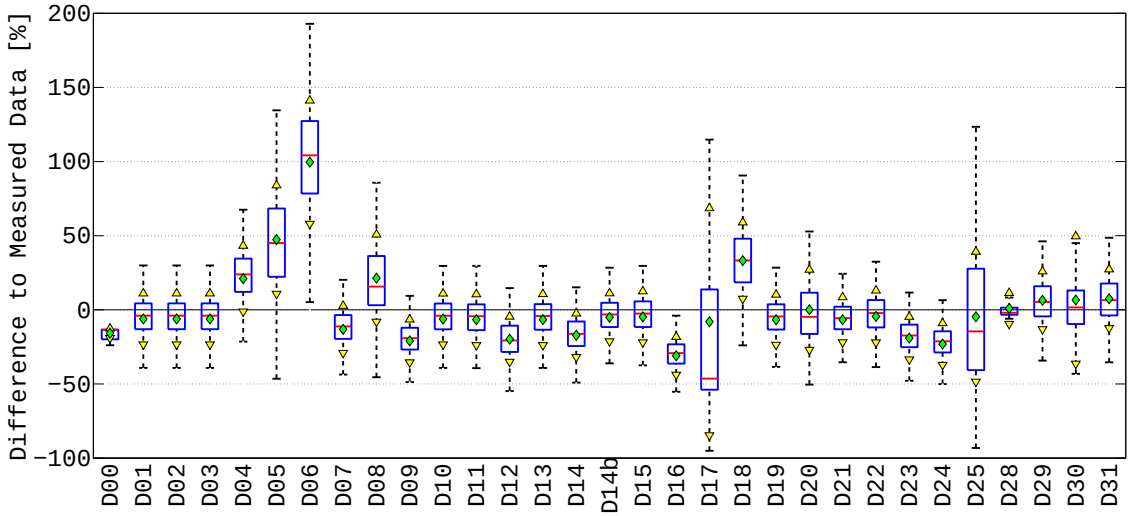


(b) $k_d \in (0.71, 1.00)$.

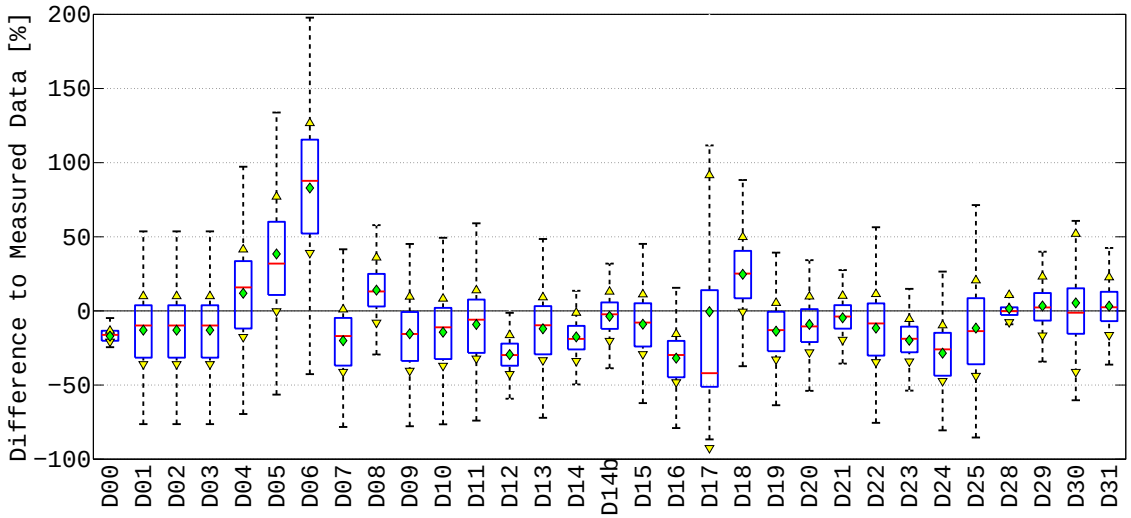


(c) $k_d \in (0.62, 0.95)$.

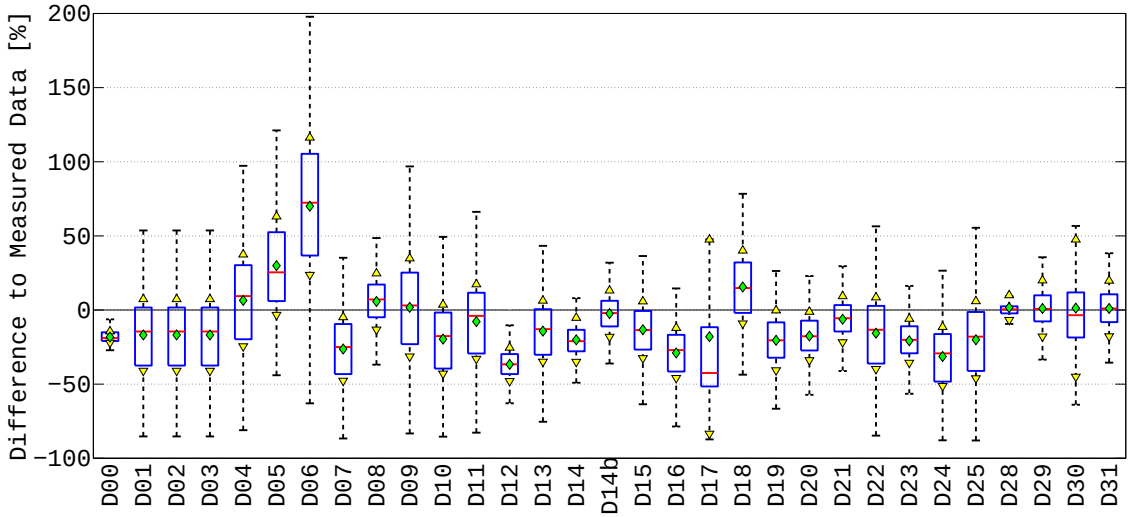
Figura 9.21: Análisis en función de la fracción difusa (Oeste).



(a) $Si \in (0.35, 0.46)$.



(b) $Si \in (0.48, 1.23)$.



(c) $Si \in (0.82, 1.41)$.

Figura 9.22: Análisis en función del índice de cielo Si (Oeste).

Tabla 9.7: Clasificación global de los modelos de acuerdo al MBD.

ID	Norte	Sur	Este	Oeste	$\mathbf{R_j}$	$\lambda_\mathbf{j}$
Modelos isótropos						
D01	13!|02!	23!|02!	23!|03!	15!|02!	74|09	19!|02!
D02	14!|03!	24!|03!	24!|04!	16!|03!	74|09	20!|03!
D03	15!|04!	25!|04!	25!|05!	17!|04!	74|09	21!|04!
D04	10|01	10|01	10|02	07|01	37|05	08|01
D05	17|05	27|05	05|01	23|05	72|16	18|05
Modelos anisótropos						
D06	32|21	30|21	30|21	30|21	122|84	30|21
D07	26|17	29|20	29|20	29|20	113|77	29|20
D08	06|02	20|15	08|03	06|02	40|22	09|04
D09	08|04	05|01	09|04	05|01	27|10	06|02
D10	11|06	22|17	22|16	13|08	68|47	17|12
D11	07|03	17|12	15|09	10|05	49|29	10|06
D12	27|18	19|14	28|19	28|19	102|70	27|19
D13	16|08	15|10	17|11	18|10	66|39	14!|10
D14	21|12	13|08	20|14	22|14	76|48	22|13
D14b	05|01	06|02	06|01	08|03	25|07	05|01
D15	19|10	11|06	13|07	20|12	63|31	13|07
D16	25|16	26|18	26|17	27|18	104|69	28|18
D17	29|20	16|11	18|12	24|15	87|58	25|16
D18	09|05	09|05	07|02	09|04	34|16	07|03
D19	22|13	08|04	11|05	25|16	66|38	15!|09
D20	24|15	07|03	16|10	14|09	61|37	12|08
D21	18|09	12|07	12|06	11|06	53|28	11|05
D22	12|07	21|16	21|15	12|07	66|45	16!|11
D23	23|14	14|09	19|13	21|13	77|49	23|14
D24	20|11	28|19	27|18	26|17	101|65	26|17
D25	28|19	18|13	14|08	19|11	79|51	24|15
Modelos no paramétricos						
D26	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D27	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D28	04|04	02|02	03|03	01|01	10|10	02!|02!
D29	02|02	03|03	04|04	02|02	11|11	04|04
D30	01|01	04|04	01|01	04|04	10|10	03!|03!
D31	03|03	01|01	02|02	03|03	09|09	01|01
Significación estadística						
Clasificación	L	$E(L)$	$Var(L)$	z	α	
Isótropos	166	180	100	-1.400	0.075	
Anisótropos	12 765	10 164	118 580	7.553	0.000	
No param.	103	100	33.333	0.520	0.174	
Global	36 513	28 830	696 725	9.204	0.000	

Tabla 9.8: Clasificación global de los modelos de acuerdo al RMSD.

ID	Norte	Sur	Este	Oeste	$\mathbf{R_j}$	λ_j
Modelos isótropos						
D01	11!|02!	23!|02!	22!|01!	14!|02!	70|07	18!|02!
D02	12!|03!	24!|03!	23!|02!	15!|03!	70|07	19!|03!
D03	13!|04!	25!|04!	24!|03!	16!|04!	70|07	20!|04!
D04	16|05	14|01	17|04	09|01	56|11	14|01
D05	09|01	28|05	18|05	22|05	77|17	22|05
Modelos anisótropos						
D06	30|21	30|21	30|21	30|21	120|84	30|21
D07	29|20	29|20	29|20	29|20	116|80	29|20
D08	08|04	19|14	05|02	06|03	38|23	07|03
D09	24|15	21|16	13|10	26|17	84|58	23!|15
D10	06|02	26|18	20|14	12|08	64|42	15|10
D11	07|03	11|07	16|12	07|04	41|26	08|05
D12	26|17	15|10	27|18	27|18	95|63	26|18
D13	15|07	09|06	09|06	10|06	43|25	09|04
D14	19|10	07|04	11|08	17|10	54|32	12|09
D14b	04|01	03|01	03|01	03|01	13|04	04|01
D15	21|12	06|03	07|04	20|12	54|31	13|08
D16	23|14	18|13	19|13	24|15	84|55	24!|14
D17	28|19	20|15	25|16	28|19	101|69	28|19
D18	17|08	13|09	10|07	08|05	48|29	10|06
D19	25|16	17|12	26|17	25|16	93|61	25|16
D20	22|13	12|08	15|11	19|11	68|43	17|11
D21	14|06	05|02	06|03	05|02	30|13	06|02
D22	10|05	22|17	21|15	11|07	64|44	16|12
D23	20|11	08|05	08|05	13|09	49|30	11|07
D24	18|09	27|19	28|19	23|14	96|61	27|17
D25	27|18	16|11	12|09	21|13	76|51	21|13
Modelos no paramétricos						
D26	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D27	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D28	01|01	01|01	01|01	01|01	04|04	01|01
D29	03|03	04|03	04|03	04|03	12|12	03|02
D30	05|04	10|04	14|04	18|04	21|16	05|04
D31	02|02	02|02	02|02	02|02	08|08	02|03
Significación estadística						
Clasificación	L	$E(L)$	$Var(L)$	z	α	
Isótropos	159	180	100	−2.100	0.022	
Anisótropos	12 795	10 164	118 580	7.640	0.000	
No param.	116	100	33.333	2.771	0.004	
Global	36 074	28 830	696 725	8.679	0.000	

Tabla 9.9: Clasificación global de los modelos de acuerdo al R^2.

ID	Norte	Sur	Este	Oeste	$\mathbf{R_j}$	$\lambda_\mathbf{j}$
Modelos isótropos						
D01	16!|02!	15!|01!	22!|01!	16!|01!	69|05	15!|01!
D02	17!|03!	16!|02!	23!|02!	17!|02!	69|05	16!|02!
D03	18!|04!	17!|03!	24!|03!	18!|03!	69|05	17!|03!
D04	22|05	20|04	26|04	19|04	87|17	26|05
D05	08|01	27|05	27|05	24|05	86|16	25|04
Modelos anisótropos						
D06	26|17	25|17	25|18	22|15	98|67	28|19
D07	30|21	30|21	30|21	30|21	120|84	30|21
D08	20|12	18|12	15|12	09|06	62|42!	13|08!
D09	14|09	26|18	11|08	27|18	78|53	23|16
D10	07|03	21|13	19|15	14|11	61|42	12|09!
D11	09|04	09|06	16|13	11|08	45|31	08|05
D12	27|18	11|08	13|10	23|16	74!|52	20!|14
D13	24|15	10|07	08|05	10|07	52|34	10|07
D14	10|05	05|03	05|02	05|02	25|12	05|02
D14b	03|01	03|01	02|01	03|01	11|04	03|01
D15	28|19	06|04	10|07	20|13	64|43	14|11
D16	23|14	12|09	07|04	08|05	50|32	09|06
D17	05|02	29|20	28|19	29|20	91|61	27|18
D18	25|16	23|15	17|14	12|09	77|54	22|17
D19	29|20	28|19	29|20	28|19	114|78	29|20
D20	21|13	24|16	12|09	21|14	78|52	24|15
D21	12|07	04|02	09|06	06|03	31|18	06|03
D22	19|11	14|11	21|17	15|12	69|51	18!|13
D23	15|10	07|05	06|03	07|04	35|22	07|04
D24	11|06	13|10	20|16	13|10	57|42	11|10!
D25	13|08	22|14	14|11	25|17	74!|50	21!|12
Modelos no paramétricos						
D26	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D27	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D28	01|01	01|01	01|01	01|01	04|04	01|01
D29	04|03	08|03	04|03	04|03	20|12	04|03
D30	06|04	19|04	18|04	26|04	69|16	19!|04
D31	02|02	02|02	03|02	02|02	09|08	02|02
Significación estadística						
Clasificación	L	$E(L)$	$Var(L)$	z	α	
Isótropos	179	180	100	−0.100	0.199	
Anisótropos	12 594	10 164	118 580	7.057	0.000	
No param.	120	100	33.333	3.464	0.000	
Global	35 860	28 830	696 725	8.422	0.000	

Tabla 9.10: Clasificación global de los modelos de acuerdo al índice $\mu_{0.99}$.

ID	Norte	Sur	Este	Oeste	$\mathbf{R_j}$	λ_j
Modelos isótropos						
D01	13!|02!	23!|02!	23!|03!	15!|02!	74|09	19!|02!
D02	14!|03!	24!|03!	24!|04!	16!|03!	74|09	20!|03!
D03	15!|04!	25!|04!	25!|05!	17!|04!	74|09	21!|04!
D04	10|01	10|01	10|02	07|01	37|05	08|01
D05	17|05	27|05	05|01	23|05	72|16	18|05
Modelos anisótropos						
D06	30|21	30|21	30|21	30|21	120|84	30|21
D07	26|17	29|20	29|20	29|20	113|77	29|20
D08	06|02	20|15	08|03	05|01	39|19	09|04
D09	08|04	05|01	09|04	06|02	28|11	06|02
D10	11|06	22|17	22|16	13|08	68|47	17|12
D11	07|03	17|12	15|09	10|05	49|29	10|06
D12	27|18	19|14	28|19	28|19	102|70	27|19
D13	16|08	15|10	17|11	18|10	66|39	15|10
D14	21|12	13|08	20|14	22|14	76|48	22|13
D14b	05|01	06|02	06|01	08|03	25|07	05|01
D15	19|10	11|06	13|07	20|12	63|35	13|07
D16	25|16	26|18	26|17	27|18	104|69	28|18
D17	29|20	16|11	19|13	25|16	89|60	25|16
D18	09|05	09|05	07|02	09|04	34|16	07|03
D19	22|13	08|04	11|05	24|15	65|37	14|08!
D20	24|15	07|03	16|10	14|09	61|37	12|09!
D21	18|09	12|07	12|06	11|06	53|28	11|05
D22	12|07	21|16	21|15	12|07	66|45	16|11
D23	23|14	14|09	18|12	21|13	76|48	23|14
D24	20|11	28|19	27|18	26|17	101|65	26|17
D25	28|19	18|13	14|08	19|11	79|51	24|15
Modelos no paramétricos						
D26	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D27	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D28	04|04	01|01	01|01	01|01	07|07	01|01
D29	03|03	03|03	03|03	02|02	11|11	03|03
D30	01|01	04|04	04|04	04|04	13|13	04|04
D31	02|02	02|02	02|02	03|03	09|09	02|02
Significación estadística						
Clasificación	L	$E(L)$	$Var(L)$	z	α	
Isótropos	166	180	100	−1.400	0.075	
Anisótropos	12 792	10 164	118 580	7.632	0.000	
No param.	110	100	33.333	1.732	0.044	
Global	36 470	28 830	696 725	9.153	0.000	

9.4. Discusión de resultados

Orientación Norte

Si observamos los resultados obtenidos para la orientación Norte se comprueba que la mayoría de los modelos presenta un buen comportamiento. La figura 9.3 muestra una agrupación de todos los modelos próxima a la representación de las observaciones, tomadas como referencia. Salvo los modelos ASHRAE (D06), Díez-Mediavilla (D07) y Gueymard (D09), la raíz de la diferencia cuadrática media (RMSD) es inferior a 80 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, y el coeficiente de correlación R^2 se sitúa entre 0.70 y 0.96. Según este diagrama no se observan diferencias significativas entre los modelos isótropos y anisótropos.

Por otro lado, atendiendo al Diagrama modificado de Ineichen (véase la figura 9.4), la mediana de los residuos relativos de todos los modelos es inferior al 50 % en valor absoluto, salvo el modelo ASHRAE, donde los residuos son ligeramente mayores y la mediana se sitúa en torno al 75 %. En todos los casos las distribuciones están centradas y los rangos intercuartílicos son de escasa magnitud. Las distribuciones con mayor amplitud entre valores extremos corresponden a los modelos ASHRAE, Gueymard y Willmott (D19). Nótese que los mejores resultados se aprecian en los modelos no paramétricos, con diferencias relativas muy pequeñas y medianas próximas a cero. En todos los casos, los valores medios se sitúan muy próximos a las medianas, y las desviaciones típicas coinciden aproximadamente con los cuartiles.

Evaluando los índices estadísticos para esta orientación (tabla 9.3), encontramos que los modelos isótropos y gran parte de los modelos anisótropos, salvo los modelos ASHRAE, Gueymard y Temps & Coulson (D18), tienden a subestimar. Por otro lado, los modelos no paramétricos tienden a sobreestimar en todos los casos, salvo el modelo GRNN (D30). Precisamente este modelo es el que obtiene mejores resultados en los índices MBD, t-estadístico y $\mu_{0.99}$. Dentro de los modelos isótropos, los que mejor se comportan son el modelo de Koronakis (D04) y el modelo de Olmo (D05). Mientras que el primero presenta mejores resultados en los índices MBD, t-estadístico y $\mu_{0.99}$, el segundo destaca en los valores de RMSD, R^2 e índice de ajuste d de Willmott. En cualquier caso, todos los modelos de esta categoría presentan valores muy similares en todos los índices, y constituyen los mejores modelos en la clasificación global.

En cambio, los modelos anisótropos muestran mayores diferencias entre sí. Obsérvese en este caso el excelente comportamiento del modelo de Perez et al. con coeficientes optimizados (D14b). Mientras que el mismo modelo, empleando los coeficientes propuestos por el autor de forma generalizada (D14), tiene un comportamiento aceptable en comparación con el resto, el modelo optimizado muestra un ajuste extraordinario. No se aprecia una división clara en cuanto al rendimiento de los modelos entre los modelos anisótropos de

superposición y los modelos anisótropos de gradiente de radiancia en este caso.

Finalmente, en el estudio realizado en función de la clasificación de cielos cubiertos, intermedios o despejados (figuras 9.5, 9.6 y 9.7), se observan ligeros cambios en los modelos, especialmente entre las condiciones extremas de cielos claros y cielos cubiertos. Como era de esperar, los modelos isótropos disminuyen sus residuos para los cielos cubiertos e intermedios, aunque la mediana tiende a desviarse de cero. Los modelos anisótropos también tienden a aumentar el valor de los residuos producidos para cielos intermedios y despejados. Los modelos no paramétricos, en cambio, parecen presentar mejores resultados para los cielos claros, aunque en todos los casos obtienen residuos pequeños. No obstante, esto no parece observarse cuando la clasificación de los tipos de cielo se realiza atendiendo al índice Si, donde en los tres casos los modelos no paramétricos presentan una distribución prácticamente idéntica de los residuos. Para cielos típicamente cubiertos, según los tres índices de claridad, destaca que los modelos Steven & Unsworth (D17) y Siala & Hooper (D25) tienen residuos con distribuciones de escasa amplitud, pero muy desviadas de cero. Para cielos más claros, las medianas de la distribuciones tienden a aproximarse muy ligeramente a cero, pero sus amplitudes aumentan significativamente.

Orientación Sur

Para la orientación Sur, la distribución de los modelos en el Diagrama de Taylor es similar a la observada para la orientación Norte (véase la figura 9.8). Todos los modelos, salvo el Díez-Mediavilla, tienen un coeficiente de correlación superior a 0.80, y el valor de RMSD es próximo a los 50 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$. La desviación típica de todos los modelos se encuentra entre 48 y 130 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, salvo el modelo ASHRAE, que supera los 160 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$. El modelo de Gueymard y el Olmo presentan un comportamiento muy similar en este caso, mientras que el modelo MLP ofrece un ajuste casi perfecto, incluso mejor que el modelo de comprobación de las tres componentes (D00).

El Diagrama modificado de Ineichen para la orientación Sur (figura 9.9) muestra una distribución de los residuos para todos los modelos bastante similar, salvo los modelos de Olmo, ASHRAE, Steven & Unsworth y el Siala & Hooper. Para los demás, los valores extremos son inferiores al 100 % en valor absoluto y las medias y medianas muy próximas a cero. Sin embargo, destaca el elevado valor de las desviaciones típicas adoptadas por todos los modelos a excepción del modelo de las tres componentes. Esto indica la presencia de un número significativo de valores atípicos muy extremos en los diferentes modelos. Se observa también, que la mayoría de los modelos tienden a subestimar el valor de irradiancia difusa y reflejada para esta orientación, salvo los modelos de Olmo, ASHRAE, DOE-2 (D08), Steven & Unsworth, Temps & Coulson, Brunger (D20) y Siala & Hooper. Se comprueba además que los residuos obtenidos son, en general, de mayor magnitud que para el Norte.

El análisis de los índices estadísticos de evaluación del comportamiento de los modelos (tabla 9.4) nos conducen a conclusiones similares. De acuerdo al signo del índice $\mu_{0.99}$, la mayoría de los modelos tiende a subestimar para esta orientación. Nuevamente, los modelos no paramétricos son los que ofrecen mejores resultados y, en este caso, con notables diferencias respecto al resto de modelos, en todos los estadísticos evaluados. Por otro lado, para esta orientación sí se aprecia mejores resultados en los modelos anisótropos que en los modelos isótropos. Los mejores modelos paramétricos son el modelo de Perez et al. optimizado y el modelo de Gueymard. Dentro de los modelos anisótropos de gradiente de radiancia, los mejores resultados se obtienen en el modelo de Brunger & Hooper (D20) y el modelo de Igawa et al. (D23). Por otro lado, el modelo isótropo con mejores valores de los índices estadísticos evaluados es el modelo de Koronakis. El resto de modelos isótropos ocupan las últimas posiciones en la clasificación según cualquier índice, salvo el coeficiente de correlación. Finalmente, al igual que en el caso de la orientación Norte, el modelo de Perez et al. con coeficientes optimizados muestra resultados mucho mejores que el modelo con los coeficientes generalizados.

En el estudio de los modelos en función de los valores tomados por los tres índices de claridad se observan de nuevo ciertas diferencias entre los resultados para cielos cubiertos y cielos despejados. En el estudio en función del índice de claridad k_t (véase la figura 9.10), los residuos aumentan en las condiciones de cielos claros respecto de las condiciones de cielos cubiertos. Como era de esperar, los modelos isótropos aumentan significativamente el valor promedio de sus residuos, con una notoria tendencia a subestimar. Los modelos de Olmo, ASHRAE, Steven & Unsworth y Temps & Coulson son los que producen mayores desviaciones respecto a las observaciones, mientras que los modelos no paramétricos y los modelos de Ma & Iqbal (D12) y Perez et al. optimizado son los que menores diferencias muestran. Nótese que el modelo de Perez et al. optimizado es el modelo anisótropo que menos incremento de sus residuos produce para cielos claros en relación con los resultados para cielos cubiertos.

En el análisis respecto de la fracción difusa (véase la figura 9.11), se obtienen idénticas conclusiones. Destaca no obstante, el excelente comportamiento del modelo CIE2004 (D21) para cielos totalmente cubiertos. Para el resto de condiciones este modelo también obtiene muy buenos resultados. Nótese que en la mayoría de los casos, los valores de la mediana y la media de las distribuciones de cada modelo coinciden, con lo que éstas se estiman centradas. Así mismo, las desviaciones típicas son pequeñas en relación, con lo que se concluye que no existen valores atípicos de gran magnitud.

Si el estudio se realiza en base al índice de cielo de Igawa et al. (Si), que se muestra en la figura 9.12, se observa de nuevo un peor comportamiento general en condiciones de cielos claros respecto a condiciones cubiertas. Los mejores modelos para las tres condiciones atmosféricas marcadas, a parte de los no paramétricos, son el modelo CIE2004 y el modelo de Perez et al. optimizado.

Orientación Este

El Diagrama de Taylor obtenido para la orientación Este muestra una mayor dispersión de los modelos que la observada en las orientaciones Norte y Sur (véase la figura 9.13). El coeficiente de correlación promedio disminuye, aunque los valores de RMSD no aumentan significativamente. De nuevo, el mejor modelo claramente es el MLP, seguido del resto de modelos no paramétricos, el modelo de Perez et al., Igawa et al., Brunger & Hooper y Skartveit & Olseth. El modelo ASHRAE es el que mayor valor de RMSD presenta. En esta ocasión, sí se aprecia que los modelos isótropos mantienen un valor promedio de RMSD ligeramente superior que los modelos anisótropos.

De acuerdo al Diagrama modificado de Ineichen, mostrado en la figura 9.14, los mejores modelos siguen siendo los no paramétricos. En esta ocasión, las desviaciones estándar en todos los casos son significativamente pequeñas, pero las distribuciones de los residuos no se observan centradas.

Evaluando los índices estadísticos para esta orientación (tabla 9.5), encontramos que los modelos isótropos y gran parte de los modelos anisótropos, salvo los modelos de Olmo, ASHRAE, MLP, RBF (D29) y ANFIS, tienden a subestimar. El modelo MLP es el que obtiene mejores resultados en los índices RMSD, R^2, d y $\mu_{0.99}$, mientras que el modelo GRNN es el que muestra los mejores valores de MBD y t-estadístico. Dentro de los modelos isótropos, el que mejor se comporta es el modelo de Olmo, aunque tiene un índice de correlación muy bajo. En general, los modelos isótropos son los que peores resultados han obtenido.

Dentro de los modelos paramétricos anisótropos, de nuevo el mejor modelo es el de Perez et al. con coeficientes optimizados, seguido del modelo de Temps & Coulson. Respecto de los modelos de gradiente de radiancia, los mejores resultados para los distintos índices se obtienen con los modelos CIE2004 y Siala & Hooper. No obstante, no se aprecia una división clara en cuanto al rendimiento entre los modelos anisótropos de superposición y los anisótropos de gradiente de radiancia.

Finalmente, en el estudio realizado en función de la clasificación de cielos (véase las figuras 9.15, 9.16 y 9.17), se observan ligeros cambios en los modelos, especialmente entre las condiciones extremas de cielos claros y cielos cubiertos. Como era de esperar, los modelos isótropos disminuyen sus residuos para los cielos cubiertos e intermedios, aunque la mediana tiende a desviarse de cero. Los modelos anisótropos también tienden a aumentar el valor de los residuos producidos para cielos intermedios y despejados. Los modelos no paramétricos, en cambio, parecen presentar mejores resultados para los cielos claros, aunque en todos los casos obtienen residuos pequeños. Por otro lado, destaca la gran amplitud en la distribución de los residuos, y su asimetría, en el modelo de Steven & Unsworth.

Orientación Oeste

Para la orientación Oeste, la distribución de los modelos en el Diagrama de Taylor vuelve a ser concentrada (véase la figura 9.18). El coeficiente de correlación promedio es de 0.85, y el valor de RMSD de todos los modelos, salvo los modelos de Díez-Mediavilla, Steven & Unsworth, Gueymard y ASHRAE es inferior a 50 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$. La desviación típica de todos los modelos se encuentra entre 48 y 75 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$, salvo los modelos de Gueymard y ASHRAE, que superan los 100 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$. El modelo MLP ofrece un ajuste casi perfecto, incluso mejor que el modelo de comprobación de las tres componentes.

El Diagrama modificado de Ineichen para la orientación Oeste muestra una distribución de los residuos para todos los modelos bastante similar, salvo los modelos de Olmo, ASHRAE y Díez-Mediavilla (véase la figura 9.19). Para los demás, los valores extremos son inferiores al 100 % en valor absoluto y las medias y medianas muy próximas a cero. Se observa también, que la mayoría de los modelos tienden a subestimar el valor de irradiancia difusa y reflejada para esta orientación, salvo los modelos de Koronakis, Olmo, ASHRAE, DOE-2, Temps & Coulson y los modelos no paramétricos. Todos los modelos presentan distribuciones prácticamente simétricas, salvo el modelo de Steven & Unsworth.

El análisis de los índices estadísticos de evaluación del comportamiento de los modelos, mostrado mediante la tabla 9.6, nos conducen a conclusiones similares. De acuerdo al signo del índice $\mu_{0.99}$, la mayoría de los modelos tiende a subestimar para esta orientación. Nuevamente, los modelos no paramétricos son los que ofrecen mejores resultados y, en este caso, con notables diferencias respecto al resto, en todos los estadísticos evaluados. Los mejores modelos no paramétricos son el modelo DOE-2 y el modelo de Gueymard. Dentro de los modelos anisótropos de gradiente de radiancia, los mejores resultados se obtienen en el modelo CIE2004 y el modelo TCCD (D22). Por otro lado, el modelo isótropo con mejores valores de los índices estadísticos evaluados es el modelo de Koronakis. El modelo de Perez et al. con coeficientes optimizados muestra resultados mucho mejores que el modelo con los coeficientes generalizados.

En el estudio de los modelos en función de la clasificación de cielos según el índice de claridad k_t (véase la figura 9.20), la fracción difusa k_d (véase la figura 9.21) y el índice de cielo de Igawa et al. Si (véase la figura 9.22) se observan de nuevo ciertas diferencias entre los resultados para cielos cubiertos y cielos despejados. En el estudio en función del índice de claridad k_t, los residuos aumentan en las condiciones de cielos claros respecto de las condiciones de cielos cubiertos. Como era de esperar, los modelos isótropos aumentan significativamente el valor promedio de sus residuos, con una notoria tendencia a subestimar. Los modelos de Koronakis, Olmo y ASHRAE son los que producen mayores desviaciones respecto a las observaciones, mientras que los modelos no paramétricos y los modelos de Hay & Davies (D10), Klucher (D11), Muneer (D13) y CIE2004 son los que me-

nores diferencias muestran. Nótese que el modelo de Perez et al. optimizado es el modelo anisótropo que menos incremento de sus residuos produce para cielos claros en relación con los resultados para cielos cubiertos. En el análisis respecto de la fracción difusa, se extraen idénticas conclusiones. En la mayoría de los casos, los valores de la mediana y la media de las distribuciones de cada modelo coinciden, con lo que éstas se estiman centradas. Así mismo, las desviaciones típicas son pequeñas en relación, con lo que se concluye que no existen valores atípicos de gran magnitud.

Si el estudio se realiza en base al índice de cielo de Igawa et al. (Si), se observa de nuevo un peor comportamiento general en condiciones de cielos claros respecto a condiciones cubiertas. Los mejores modelos para las tres condiciones atmosféricas marcadas, a parte de los no paramétricos, son el modelo CIE2004 y el modelo de Perez et al. optimizado.

Todas las orientaciones

Las tablas 9.7, 9.8, 9.9 y 9.10 muestran el análisis realizado de agregación no paramétrica de clasificaciones de los distintos modelos para las cuatro orientaciones en base a los índices MBD, RMSD, R^2 y $\mu_{0.99}$ respectivamente.

En base al valor de MBD, el modelo que presenta mejores características globalmente es el modelo ANFIS, seguido por el resto de modelos no paramétricos, no observándose diferencias significativas entre el modelo MLP y el modelo GRNN. Dentro de los modelos isótropos, se obtiene como el modelo más preciso el propuesto por Koronakis, mientras que dentro de los modelos anisótropos, el que obtiene mejores resultados para las cuatro direcciones es el modelo de Perez et al. con los coeficientes optimizados. Nótese que el modelo de Perez et al. con los coeficientes generalizados es el decimotercer modelo en esta categoría, en base a este índice. De los modelos de gradiente de radiancia, el más preciso es el modelo CIE2004. Obsérvese que estas conclusiones son para un intervalo de confianza superior al 99 % para la clasificación global y de modelos anisótropos, y superior al 82 % y 92 % para los modelos no paramétricos y modelos isótropos respectivamente.

Si se evalúa la clasificación global de los modelos en base al estadístico RMSD, se obtiene que el mejor modelo es el Perceptrón Multicapa (MLP) seguido por el modelo RBF y el modelo ANFIS. Sin embargo, atendiendo a la tipología de los modelos, se mantiene que el mejor modelo isótropo es el modelo de Koronakis, el mejor modelo anisótropo es el de Perez et al. con coeficientes optimizados y el modelo CIE2004 dentro de los de gradiente de radiancia. En todas las clasificaciones el intervalo de confianza es superior al 97 %.

Por otro lado, si se evalúa la varianza de las estimaciones debidas al modelo, mediante el coeficiente R^2, el mejor modelo resulta el MLP, seguido de nuevo por el modelo ANFIS. Sin embargo, el mejor modelo isótropo en base a este índice, es cuaquiera entre Liu & Jordan,

Tian et al. o Badescu, y dentro de los modelos anisótropos, se mantienen el modelo de Perez et al. con los coeficientes optimizados y el modelo CIE2004.

Finalmente, el análisis en base al índice $\mu_{0.99}$ confirma que los mejores modelos para cualquiera de las cuatro orientaciones son los modelos MLP y ANFIS. De los modelos isótropos, se confirma que el más adecuado es el de Koronakis y, dentro de los anisótropos, el de Perez et al. optimizado y el modelo CIE2004.

Discusión con otros estudios

El estudio de la distribución de la radiancia solar difusa viene realizándose de forma destacada desde los años 1940, con el trabajo de Moon & Spencer. Diversos autores han analizado los valores, especialmente de irradiación media diaria o mensual, en superficies inclinadas, normalmente orientadas hacia el ecuador. Consideramos de interés comparar los resultados obtenidos con los estudios más relevantes de este tipo.

En [Ma and Iqbal, 1983] comparan el modelo isótropo de Liu & Jordan, el modelo de Hay & Davies y el modelo de Klucher en Ontario (Canadá) para valores medios mensuales y planos inclinados en la dirección ecuatorial 30, 60 y 90º. Tras la evaluación de los estadísticos MBD y RMSD, los autores concluyen que los tres modelos producen errores considerables, pero estos disminuyen en los periodos estivales. El modelo isótropo tiende a subestimar de forma sistemática a lo largo de todo el año, resultando el peor modelo de la comparativa, como en nuestro caso de estudio. El modelo de Hay & Davies también tiende a subestimar de forma sistemática, pero en menor medida. En cambio el modelo de Klucher sobreestima en verano y subestima en invierno, pero en términos generales lo consideran tan preciso como el modelo de Hay & Davies. En esta Tesis, el estudio realizado comprende los meses desde septiembre de 2014 hasta abril de 2015, es decir, las estaciones de otoño, invierno y primavera. En nuestro caso, ambos modelos muestran una tendencia a subestimar y, aunque el modelo de Klucher tiene un menor error sistemático (MBD), el modelo de Hay & Davies presenta menor valor de RMSD. Estas observaciones son coherentes con las de Ma & Iqbal.

Por otro lado, en [Perez et al., 1987, Perez et al., 1990], los autores presentan su reconocido modelo y lo comparan con el modelo isótropo (Liu & Jordan), el modelo de Hay & Davies y el modelo de Klucher para distintas superficies verticales y valores horarios. En la primera publicación utilizan datos de Albany (Estados Unidos) y en la segunda realizan el test en 13 localizaciones distribuidas entre Europa y Estados Unidos, pero no incluyen el modelo de Klucher. La evaluación de los modelos muestra que para todas las superficies analizadas, el modelo propuesto es mejor que el de Hay & Davies y, a su vez, éste mejora los resultados del modelo isótropo. Esta conclusión es coherente con los resultados obtenidos en este estudio.

Un estudio similar al anterior se presenta en [Reindl et al., 1990a], donde los autores comparan su modelo con el modelo de Liu & Jordan, el modelo de Perez et al. de 1987 y el de 1990, y el modelo de Hay & Davies. Éstos son evaluados con observaciones de irradiación horaria promedio mensual en superfices verticales según las direcciones cardinales en 6 localizaciones de Estados Unidos. Los registros son de 1 a 3 años. Sus resultados exponen que el modelo isótropo es el que peor se comporta en todos los casos, seguido por el de Hay & Davies y, posteriormente, el de Perez et al. 1987. Los menores valores de MBD y RMSD los obtienen los modelos de Perez et al. y su modelo (Reindl). Éste, junto con el modelo de Perez et al. 1987, tienden a subestimar, mientras que los demás tienden a sobreestimar. La conclusión de que los modelos anisótropos son más precisos que los isótropos coinciden con las expuestas en este trabajo, al igual que su clasificación relativa (si tomamos el modelo de Perez et al. sin optimizar), salvo que en nuestro estudio los modelos isótropos tienden a subestimar, pues no consideran ninguna componente anisótropa.

Aunque en [Díez-Mediavilla et al., 2000] no estudian las superficies verticales, sino aquellas inclinadas 42º hacia el Sur, en la ciudad de Valladolid (España), resulta interesante el hecho de que evalúan los resultados obtenidos por 6 modelos de irradiancia difusa (Bugler, Hay & Davies, Liu & Jordan, Klucher, Muneer y Reindl) en función de cuatro intervalos del índice de claridad k_t para irradiancia horaria. Los autores concluyen que no se observan grandes diferencias, salvo para los intervalos extremos, en los valores obtenidos de MBD y RMSD en los distintos modelos. El modelo de Klucher es el que menor diferencia con las observaciones presenta para días claros, pero éstas aumentan notablemente en este modelo para días intermedios y cubiertos. En estos casos, observan que los mejores resultados los presenta el modelo de Hay & Davies. En nuestro estudio también observamos que, para la orientación Sur, para nuestra clasificación de las condiciones de cielo en función del índice de claridad k_t no se observan grandes diferencias entre los modelos estudiados por Díez-Mediavilla et al., pero sí se coincide en que para valores elevados de la fracción difusa k_d el modelo de Hay & Davies se comporta mucho mejor que el de Klucher, y viceversa. Sin embargo, las diferencias encontradas no son tan significativas.

En [Díez-Mediavilla et al., 2005, Díez-Mediavilla et al., 2006], los autores completan los análisis expuestos en [Díez-Mediavilla et al., 2000] y concluyen que el modelo de Perez et al. (con coeficientes generalizados) es el que mejor se comporta en la comparativa realizada, lo que coincide con nuestras conclusiones. Por otro lado, obtienen resultados inusualmente muy buenos para el modelo de Liu & Jordan en comparación con los estudios llevados a cabo por otros autores. Deducen que es debido a las condiciones climáticas particulares. Éstas se caracterizan en su estudio por presentar un 93.3 % de días un índice de claridad entre 0.25 y 0.75, es decir, cielos no totalmente claros pero tampoco cubiertos (cielos intermedios). En cielos intermedios de este tipo, la distribución de radiancia entienden que es eminentemente isótropa. En nuestro caso, en cambio, la clasificación de cielos intermedios corresponde con un índice de claridad k_t en el intervalo entre 0.32 y 0.50, lo que apoya la

hipótesis de un comportamiento bueno de los modelos isótropos, pero no tanto como en el caso presentado por los autores citados. En el estudio de Díez-Mediavilla et al., concluyen que los modelos de Gueymard, Hay & Davies y Klucher tienden a sobreestimar, mientras que nosotros hemos encontrado resultados opuestos, pero sí coincidimos en que el modelo de Temps & Coulson tiende a sobreestimar y los modelos isótropo, de Muneer, Perez et al., Reindl y Willmott tienden a subestimar. Las discrepancias encontradas en este punto pueden deberse a la modelización y consideración de la irradiancia reflejada y al distinto ángulo de inclinación de las superficies. Por otro lado, también encontramos discrepancias en la clasificación de los modelos, pues según estos autores debería ser, de mejores a peores características, Hay & Davies, Muneer, Willmott, Liu & Jordan, Perez et al. y Temps & Coulson, mientras que para nosotros, la misma clasificación (superficie vertical Sur) ha resultado: Willmott, Temps & Coulson, Perez et al., Muneer, Hay & Davies y Liu & Jordan.

El artículo [Ruiz et al., 2002] realiza un estudio en detalle del modelo de Olmo con medidas de irradiancia global medias horarias en planos verticales orientados según las direcciones Norte, Sur, Este y Oeste en Madrid (España). Los valores de MBD y RMSD relativos a las observaciones son coherentes con los obtenidos en el presente estudio. El mayor valor relativo de RMSD también coincide con la orientación Norte y de MBD para el Sur.

En [Muneer, 2004], el autor presenta parte de los modelos aquí expuestos y realiza un análisis de la irradiancia media horaria para el mes de agosto de 1993 en Edimburgo (55.95^{o}N). Su estudio concluye que para las orientaciones Norte, Este y Sur, los mejores modelos son el de Perez et al. y el de Gueymard, en base a los estadísticos MBD y RMSD.

La publicación [Igawa et al., 2004] destaca por realizar una comparativa de diferentes modelos de gradiente de radiancia, bajo diferentes condiciones o tipos de cielo. Aunque analiza un total de 6 modelos de gradiente de radiancia diferentes, coincidentes con nuestro estudio únicamente se encuentran los modelos de Perez et al. y de Brunger & Hooper. El autor observa un mejor rendimiento (menor valor del índice RMSD) para el modelo de Perez et al., en comparación con el otro, para cualquier condición de cielo. Este resultado coincide con los obtenidos en nuestro estudio.

[Kamali et al., 2006] realiza un estudio en la ciudad de Karaj (Irán) de la estimación de la radiación solar global incidente específicamente en superficies verticales orientadas en las cuatro direcciones cardinales. En todos los casos utiliza el mismo procedimiento para el cálculo de la irradiancia directa y reflejada sobre los planos inclinados, lo que le permite contrastar 8 modelos diferentes para la evaluación de la irradiancia difusa: Badescu, Tian et al., Reindl, Skartveit & Olseth, Koronakis, Steven & Unsworth, Hay & Davies y Liu & Jordan. La evaluación de los modelos se realiza en la Universidad de Teherán (35.90^{o}N, 50.92^{o}E) mediante medidas de irradiación semihorarias en el periodo de junio a octubre de 2002. Los resultados son comparados en términos de irradiación diaria promedio. La

conclusión de este estudio es que no hay diferencia entre los modelos evaluados, al igual que en nuestro caso. La mayoría de los modelos tiende a subestimar, salvo los modelos isótropos y Steven & Unsworth. Éste último es el que peores resultados de MBD y RMSD ofrece respecto al resto. En comparación con nuestros resultados, también coincidimos en que el modelo de Koronakis es el modelo isótropo más preciso. No obstante, los autores inexplicablemente obtienen diferentes valores de MBD y RMSD para los modelos de Liu & Jordan, Badescu y Tian et al. cuando para el caso vertical, los tres modelos proporcionan la misma expresión para R_d. Por otro lado, en nuestro estudio el modelo de Reindl también ofrece buenos resultados y es el que mejor se comporta en comparación con los demás. Sin embargo, obtenemos peores resultados para el modelo de Skartveit & Olseth que para el de Steven & Unsworth.

Los mismos autores de [Kamali et al., 2006] amplían en [Noorian et al., 2008] el estudio realizado incorporando 4 modelos más: Perez et al. 1987 y 1990, Klucher y Temps & Coulson. La metodología seguida es idéntica al estudio previo salvo que en esta ocasión sólo se estudian dos superficies: una orientada hacia el Sur e inclinada 45º y otra orientada hacia el Oeste e inclinada 40º. En esta ocasión, concluyen que, en términos generales, los modelos incurren en mayores errores en la orientación Oeste, al igual que en nuestro estudio. Por otro lado, encuentran que los modelos Skartveit & Olseth, Hay & Davies, Reindl y Perez et al. son los que mejores valores de MBD y RMSD presentan para la orientación Sur, mientras que el modelo de Perez et al. es el que mejor se comporta para la orientación Oeste. Esto confirma nuestro resultado de que el modelo de Perez et al. es el que presenta un mejor comportamiento dentro de los modelos paramétricos.

En [Loutzenhiser et al., 2007] se realiza un análisis de siete modelos de irradiancia solar y su implementación en los software de simulación energética EnergyPlus, DOE-2.1E, TRNSYS-TUD y ESP-r. El estudio incluye únicamente la evaluación de dos periodos de 25 días en los meses de octubre y marzo/abril en la ciudad de Duebendorf en Suiza (47.40ºN, 8.60ºE). Se analiza la irradiancia sobre una única superficie vertical orientada 29º en la dirección Sur-Oeste. Las estimaciones de la irradiancia global media horaria indican que el mejor modelo es, de nuevo, el modelo de Perez et al., seguido por su versión de 1987, Muneer, Hay & Davies y Reindl. Nótese que no todos los modelos son testados en todos los programas, pudiendo existir pequeñas diferencias en los métodos de integración empleados o de evaluación de la geometría solar. No obstante, los resultados mostrados son coherentes con los obtenidos en esta Tesis.

Investigadores de la Universidad Ben-Gurion de Israel [Evseev and Kudish, 2009] analizan el modelo de Olmo para el cálculo de la componente difusa en superficies verticales en la ciudad de Beer Sheva en Israel (31.25ºN, 34.62ºE), en una superficie inclinada 40º hacia el Sur. El modelo de Olmo es comparado con los modelos de Gueymard, Muneer y Perez et al. Además, los autores proponen una modificación del modelo de Olmo añadiéndole un factor de corrección anisótropo en función de las condiciones del cielo, pues observan al igual que

nosotros, variaciones en el comportamiento del modelo si el cielo está totalmente despejado, cubierto o las condiciones presentes son intermedias. Los resultados de su estudio arrojan que el modelo de Olmo original se comporta peor que los otros tres modelos anisótropos analizados, de los cuales el que mejor comportamiento general tiene es el de Perez et al., seguido del modelo de Muneer y finalmente el de Gueymard. Únicamente en las condiciones de cielos totalmente cubiertos, el modelo de Muneer responde mejor que el modelo de Perez et al. Nuestros resultados confirman estas conclusiones, para la caracterización de los cielos en base a la fracción difusa k_d. El modelo de Olmo modificado no ha sido incluido en nuestro estudio.

El trabajo mostrado en [Mehleri et al., 2010] compara el rendimiento entre modelos no paramétricos basados en redes neuronales de tipo RBF con 10 modelos isótropos y anisótropos de superposición. El estudio es llevado a cabo en Atenas (Grecia), de coordenadas geográficas 37.97^{o}N y 23.78^{o}E, a lo largo del año 2004 (enero-diciembre). Se toman medidas diez-minutales pero se evalúan valores medios horarios de irradiancia. La superficie de estudio está inclinada 32° en la dirección Sur. La red neuronal diseñada toma como estimadores la irradiancia global horizontal, la irradiancia extraterrestre, el ángulo cenital del Sol y el ángulo de incidencia con el plano de estudio. Como método de entrenamiento de la red se utiliza un algoritmo de particionamiento del espacio en conjuntos borrosos. Los autores concluyen que la red neuronal diseñada ofrece una modelización más realista que el resto de modelos, de los cuales los más precisos han resultado ser los modelos isótropos de Tian et al. y Badescu, mientras que el modelo anisótropo de Ma & Iqbal es el que peores resultados muestra. Estas conclusiones están en consonancia con las obtenidas en nuestro estudio.

En [Khalil and Shaffie, 2013] se realiza una comparativa de modelos de irradiancia global, directa y difusa sobre superficies horizontales y verticales en la ciudad de El Cairo en Egipto (30.08^{o}N, 31.25^{o}E). Las medidas tomadas son de irradiación global y difusa horizontales medias horarias y diarias y comprenden desde enero de 1990 hasta diciembre de 2010. Obsérvese que no se realizan medidas directas en los planos inclinados estudiados. Analizando el valor del estadístico MBD, los autores encuentran que los modelos de Liu & Jordan, Perez et al., Hay & Davies y Klucher tienden a subestimar la irradiancia sobre las superficies verticales, mientras que el modelo de Temps & Coulson tiende contrariamente a sobreestimar. Además, los modelos anisótropos muestran un comportamiento similar, mientras que los modelos isótropo y el de Temps & Coulson suelen tener mayor error. Según los resultados mostrados, los modelos de Hay & Davies, Skartveit & Olseth y Perez et al. son los que ofrecen estimaciones más precisas para los planos verticales orientados hacia el Sur, mientras que el modelo de Hay & Davies y de Perez et al. son los que mejor se comportan en superficies verticales hacia el Oeste. Estos resultados están en concordancia con los llevados a cabo en este trabajo.

Resulta de interés la configuración de redes neuronales GRNN realizada en la publicación

[Celik and Muneer, 2013] como alternativa a los modelos clásicos de transposición. Como estimadores se toman la irradiancia global horizontal, la declinación y ángulo horario solares. El modelo es evaluado respecto a 2 años de medidas de irradiación obtenidas mediante la producción eléctrica de módulos fotovoltaicos orientados hacia el Sur e inclinados la latitud geográfica de la ubicación: Iskenderun (36.35ºN, 36.10ºE) en Turquía. Para la evaluación de la red neuronal se aplica un método de validación cruzada con $k = 10$ y se compara con los modelos de Liu & Jordan, Muneer y una red neuronal MLP (implementada con los mismos estimadores). Los resultados del estudio concluyen que la red GRNN es la que mejor se comporta, incluso por encima de la red MLP, aunque esta última muestra un coeficiente de determinación R^2 superior. Nuestro estudio coincide en que los modelos no paramétricos, evitando el sub y el sobre-entrenamiento, generan estimaciones más ajustadas que los modelos paramétricos. No obstante, en nuestra evaluación en la orientación Sur, obtenemos mejores resultados en el modelo MLP que para el modelo GRNN. También el coeficiente de determinación es significativamente mejor para la red Perceptrón Multicapa que para la red GRNN.

Priya Yadav y S.S. Chandel, del Instituto Nacional de Tecnología de la India, realizan en [Yadav and Chandel, 2014b] un estudio comparativo de modelos de irradiancia solar difusa para determinar el ángulo óptimo en la ciudad de Hamirpur en Himachal Pradesh, India (31.68ºN, 76.52ºE). Los modelos son evaluados en términos de irradiación global, medida mediante un módulo fotovoltaico de silicio policristalino de 10 Wp, cuya inclinación es modificada de 0 a 90º a intervalos de 5º. Los autores concluyen que el modelo que menor error ofrece en la determinación del ángulo óptimo es el de Liu & Jordan. Este resultado no es comparable con los obtenidos en esta Tesis dadas las diferencias climáticas de las ubicaciones de estudio y el escaso número de datos tomados por los autores (únicamente evalúan los días 7 y 8 de marzo y los día 2 y 3 de mayo de 2013).

Finalmente, uno de los estudios más recientes en este campo es [Yao et al., 2015], en el que los autores comparan una propuesta de modelo anisótropo de superposición con otros 8 modelos de esta misma categoría y el modelo de Liu & Jordan como representación de modelos isótropos. Para el estudio, comparan las estimaciones de los modelos con medidas de irradiancia promedio semihorarias, tomadas en las cuatro direcciones cardinales mediante piranómetros de irradiancia global inclinados 30, 60 y 90º. La toma de datos tiene lugar en la Universidad de Tongji en China (31.28ºN, 121.51ºE) desde julio a diciembre del año 2012. Para el conjunto de las cuatro orientaciones, de acuerdo al estadístico MBD, sus resultados muestran que los mejores modelos son el de Hay & Davies y el de Skartveit & Olseth, siendo claramente peores los modelos de Temps & Coulson, Gueymard y Klucher. No obstante, de acuerdo al índice RMSD, se muestran como modelos más precisos el de Perez et al. y Liu & Jordan, manteniéndose como peores modelos el de Temps & Coulson y Gueymard. Sin embargo, en [Gueymard, 2015] se indica que posiblemente se halla evaluado erróneamente éste último. Para las distintas orientaciones, en base al valor

tomado por la Ecuación de Nash-Sutcliffe (NSE), el mejor modelo para las orientaciones Norte y Este es el modelo de Perez et al. pues puede estimar de forma precisa la anisotropía de los cielos observados. En cambio, para las orientaciones Sur y Oeste muestra mejores resultados el modelo de Liu & Jordan, dado que la irradiancia difusa en este caso se registra más débil y de distribución fuertemente isótropa. Coincidimos con estos autores en que el modelo de Perez et al. es uno de los modelos más precisos en la mayor parte de las situaciones estudiadas. Sin embargo, en nuestro caso, los modelos isótropos no modelizan adecuadamente la orientación Sur y la magnitud de la irradiancia difusa es mayor que la obtenida por Yao et al. Por otro lado, también encontramos a los modelos de Temps & Coulson y Gueymard como poco adecuados en la modelización de la irradiancia difusa sobre superficies verticales, pero no obtenemos resultados tan negativos para el modelo de Gueymard. Obsérvese que para el periodo de estudio en el artículo citado, las condiciones climáticas de la estación de observación empleada se caracterizan por elevadas tasas de humedad y precipitaciones, que contribuyen a una distribución isótropa de la radiancia en la atmósfera.

Capítulo 10

Conclusiones y aportes

En este capítulo se enumeran las principales conclusiones de esta Tesis, los aportes realizados en este campo y se indican las líneas de investigación que quedan abiertas.

10.1. Conclusiones

Como principales consideraciones extraídas a partir de los resultados obtenidos se destacan las siguientes conclusiones generales y particulares:

10.1.1. Conclusiones generales

1. Resulta fundamental para el desarrollo y mejora de sistemas de generación integrados en la edificación, especialmente los BIPVs, el correcto estudio y modelización de las componentes de la irradiancia solar sobre múltiples superficies. Esta modelización es una tarea compleja que no está totalmente desarrollada para superficies inclinadas con orientaciones diferentes a la ecuatorial.

2. Los modelos de transposición de irradiancia solar difusa y reflejada se pueden clasificar en paramétricos y no paramétricos. A su vez, dentro de los modelos paramétricos se puede distinguir entre modelos isótropos y anisótropos. Los modelos anisótropos se dividen en modelos de superposición o de gradiente de radiancia. Por otro lado, dentro de los modelos no paramétricos se incluyen los sistemas de inferencia borrosos y las redes neuronales artificiales. Las redes neuroborrosas son una combinación de ambos tipos de algoritmos.

3. Las medidas de irradiancia difusa tomadas mediante dispositivos con anillo de sombra deben corregirse con un factor de corrección. Éste puede considerar únicamente

aspectos geométricos (corrección isótropa) o tener en cuenta la distribución anisótropa de la radiancia en el cielo (corrección total).

4. El periodo de estudio evaluado se caracteriza por una elevada frecuencia de cielos cubiertos.

5. No se ha encontrado una fuerte correlación entre los índices de claridad clásicos y los tipos de cielo Estándar CIE, en el caso de estudio.

6. Para todas las orientaciones y tipos de cielo, los modelos no paramétricos se muestran como los más capaces para estimar la irradiancia solar difusa y reflejada.

7. De entre los modelos paramétricos se muestra como el más preciso el modelo de Perez et al. con los coeficientes optimizados localmente. De entre los modelos isótropos, el modelo de Koronakis obtiene resultados mucho mejores que los tradicionales de Liu & Jordan y de Tian et al.

10.1.2. Conclusiones particulares

1. La corrección de la medida de irradiancia difusa tomada en un plano inclinado debe tener también en cuenta la reflectancia aparente de albedo.

2. Los modelos de corrección isótropa y total existentes en la actualidad no se pueden aplicar a sensores inclinados y orientados en otras direcciones que la ecuatorial.

3. Para sensores verticales, el factor de corrección geométrico es simétrico respecto al tiempo, pero antisimétrico con la latitud geográfica.

4. El factor de corrección geométrico para sensores verticales en las direcciones Norte y Sur son opuestos, mientras que coinciden para las orientaciones Este y Oeste.

5. El factor de corrección anisótropo más adecuado de forma general según las medidas tomadas, es el modelo de corrección de LeBaron et al., pues optimiza el factor de corrección según 256 condiciones radiativas diferentes. Sin embargo la mayoría de estas condiciones no se han alcanzado en el caso de estudio, y la mayoría de los coeficientes son una media del factor de corrección geométrico para el intervalo.

6. Para la orientación Norte el modelo de Batlles et al. B es el que ofrece una corrección más precisa, mientras que los modelos de Muneer & Zhang, Batlles et al. A y LeBaron son los que resultan más adecuados para las orientaciones Sur, Este y Oeste respectivamente.

7. La componente de mayor peso en la incertidumbre de medida de la irradiancia solar es la incertidumbre de calibración.

8. La incertidumbre expandida de la medida de irradiancia difusa y reflejada vertical de forma indirecta, mediante el modelo de las tres componentes, es significativamente mayor que la incertidumbre de la medida directa obtenida mediante el equipo MK6. En concreto, para las medidas tomadas en el desarrollo de esta Tesis, la incertidumbre de la medida indirecta puede llegar a ser hasta 3 veces superior a la de la medida directa (para un valor de $D = 200$ W·m^{-2}).

9. Aunque los cuatro modelos de reflectancia de albedo evaluados para la estación radiométrica SWIFT0001, ubicada en Burgos, ofrecen resultados muy similares, el modelo más preciso es el de Iqbal, o isótropo constante.

10. El valor de la irradiancia de albedo obtenida ha resultado un 25 % inferior a la adoptada de forma general en ausencia de medidas.

11. Para el periodo de estudio, comprendido entre septiembre de 2014 y abril de 2015, la moda de la fracción difusa en Burgos fue 0.95 y del índice de claridad 0.25. La moda de las fracciones difusas correspondientes a las distintas superficies verticales fue de 0.55 para todas las direcciones salvo el Este, donde alcanzó un valor ligeramente superior (0.65). Las medianas y las modas tomaron valores muy próximos en todos los casos.

12. Para las condiciones estudiadas, el mejor modelo que permite estimar el valor de la fracción difusa a partir del índice de claridad k_t ha sido el modelo de Muneer & Saluja. No obstante, los modelos de Boland et al. y de Reindl et al. también obtuvieron buenos resultados.

13. De los dos procedimientos utilizados para la identificación de cielos en Burgos utilizando las medidas de irradiancia tomadas por el dispositivo MK6, el procedimiento B se muestra más rápido y preciso que el procedimiento A. El procedimiento B obtiene valores de MBD y RMSD relativos significativamente menores.

14. Mediante el procedimiento A, los Estándares CIE más frecuentes en Burgos para el periodo de estudio fueron los Estándares 5, 9 y 14. Éstos corresponden con cielos intermedios y cubiertos. Tomando el procedimiento B, los Estándares CIE más frecuentes fueron los Estándares 5, 9 y 10, propios de cielos principalmente cubiertos.

15. Los mayores valores de MBD y RMSD obtenidos en la identificación de cielos se obtuvieron para la dirección Sur. Se intuye que esto es debido a la mayor exposición de esta superficie a la irradiancia circunsolar.

16. Los índices que permiten una mejor caracterización de los cielos en cubiertos, intermedios y claros, son el índice de Igawa et al. (Si) y la función de claridad (F).

17. El modelo que ha dado los mejores resultados globalmente es el modelo MLP, seguido por los modelos ANFIS y GRNN.

18. Dentro de los modelos paramétricos, se observa que el modelo de Perez et al. con coeficientes optimizados es el que mejores resultados muestra en todos los casos.

19. La optimización local de los coeficientes del modelo de Perez et al. permite una mejora significativa de los resultados obtenidos por el modelo respecto al uso con coeficientes generalizados.

20. De los diferentes modelos isótropos, el más preciso ha resultado el modelo de Koronakis, tanto en el análisis global como en los estudios por orientaciones.

21. De entre los modelos de gradiente de radiancia, el modelo CIE2004 se muestra como el más preciso en la clasificación global.

22. Para la orientación Norte, los modelos que se han encontrado más adecuados son el modelo GRNN, Koronakis y Perez et al. Los modelos ASHRAE, Díez-Mediavilla y Gueymard son los que han obtenido peores resultados.

23. Para la orientación Sur, el modelo MLP ofrece claramente las mejores estimaciones, mientras que el modelo ASHRAE es el que obtiene los peores resultados. Los mejores modelos paramétricos para esta orientación son el modelo de Perez et al. con coeficientes optimizados y el modelo de Gueymard.

24. Para la orientación Este, nuevamente el modelo MLP es el que mejores estimaciones produce, en contra del modelo ASHRAE, que es el que peores resultados obtiene. Los mejores modelos paramétricos en este caso son el modelo de Perez et al. optimizado y el de Temps & Coulson.

25. Para la orientación Oeste, el modelo MLP es el que mejor se comporta y los modelos de Gueymard y ASHRAE son los que peores resultados obtienen. El mejor modelo isótropo para esta orientación es el modelo de Koronakis y el mejor modelo paramétrico es el de Perez et al. con coeficientes optimizados localmente.

26. Salvo en los modelos no paramétricos, en general, el comportamiento de los modelos de transposición empeora conforme los cielos son más claros. Sin embargo, apenas varían las diferencias entre los distintos modelos.

27. De entre los modelos paramétricos, los de gradiente de radiancia son los más estables ante los diferentes tipos de cielo.

10.2. Objetivos cumplidos y aportes de la Tesis

Se han alcanzado con éxito todos los objetivos propuestos. Además, esta Tesis Doctoral presenta los siguientes aportes principales:

1. Se ha realizado una revisión exhaustiva de las técnicas de medida y modelización de la irradiancia difusa y reflejada sobre planos inclinados y orientados. Además se ha establecido una clasificación de todos los modelos en función de su estructura y características.

2. Se ha desarrollado y construido un prototipo de estación radiométrica para la medida de irradiancia difusa en distintos planos, denominado MK6. El sistema está constituido por un único anillo de sombra, que actúa sobre múltiples sensores simultáneamente (el prototipo construido dispone inicialmente de cuatro) lo que le hace muy competitivo con otros dispositivos existentes.

3. Se ha programado una aplicación de software en MATLAB que permite el dimensionamiento y simulación del equipo MK6 en función de las características geométricas.

4. Se ha realizado un análisis en detalle de los factores de corrección necesarios para la validación de las medidas de irradiancia difusa obtenidas mediante dispositivos con anillo de sombra. Como resultado teórico se proponen las expresiones generalizadas tanto de la corrección geométrica como la total, según 5 modelos diferentes, para sensores con cualquier orientación e inclinación.

5. Se ha creado una base de datos que integra medidas radiativas y meteorológicas de dos fuentes: estaciones meteorológicas de la AEMET y estaciones de la micro-red SWIFT gestionada y mantenida por el grupo de investigación. En total, el sistema gestiona más de 6 000 000 de registros de precisión horaria y diez-minutal.

6. Se han identificado, mediante dos procedimientos diferentes, los tipos de cielo según el Estándar CIE 2004, en el periodo comprendido desde septiembre de 2014 hasta abril de 2015, en Burgos.

7. Se han analizado las relaciones existentes entre 9 índices de claridad clásicos con los resultados de la clasificación CIE obtenidos. Se han calculado los intervalos de las medianas de la distribución de cada índice para tres grupos de cielos: cubiertos, intermedios y despejados.

8. Se han evaluado 29 modelos de irradiancia sobre planos verticales en las cuatro direcciones cardinales y para los tres grupos de cielos indicados. Para cada caso de estudio se han clasificado los modelos, según los resultados obtenidos para diferentes índices estadísticos, y se ha obtenido la clasificación global mediante un método de agregación no paramétrica.

9. Se ha propuesto un nuevo índice estadístico, denominado $\mu_{1-\alpha}$, para mejorar las conclusiones sobre el análisis de los modelos. Éste se caracteriza por tener en cuenta el tamaño de la muestra analizada y permitir realizar la comparación entre distintos modelos bajo un nivel de significación dado.

10. Se ha implementado una modificación de los Diagramas de Ineichen para el análisis de los residuos generados por los modelos y su comparación que permite evaluar gráficamente un número elevado de métodos simultáneamente.

10.3. Futuras líneas de investigación

Como futuras líneas de investigación y trabajo planteadas por esta Tesis destacan:

1. Desarrollar una nueva versión del equipo de medida MK6 de forma que éste sea capaz de evaluar la irradiancia difusa en planos con orientaciones diferentes de las cardinales y que disponga de posicionamiento automático del anillo de sombra.
2. Optimizar la identificación de cielos realizada con el dispositivo MK6 comparando los resultados con los obtenidos mediante equipos como el escáner de cielo.
3. Completar el estudio del análisis de las frecuencias de ocurrencia de los cielos Estándar CIE en Burgos con al menos un año completo de medidas.
4. Profundizar en la aplicación de modelos no paramétricos para la estimación de las diferentes componentes de la irradiancia, especialmente los modelos borrosos.
5. Aplicar los mejores modelos de transposición en la simulación y optimización de instalaciones solares.

ANEXOS

Documentación complementaria y material adicional.

Anexo A

Definiciones y fundamentos

A.1. Introducción

Sin pretender en ningún caso sustituir cualquiera de las excelentes publicaciones sobre física de radiación solar o modelización de sus componentes, entre los que se recomiendan [Iqbal, 1983, Muneer, 2004, Badescu, 2008, Vignola et al., 2012, Myers, 2013] o, en castellano y acceso libre, [Perpiñán Lamigueiro, 2013], se recogen en este anexo los fundamentos y definiciones de las magnitudes físicas incluidas a lo largo de la Tesis, utilizando una notación unificada para facilitar su comprensión.

La primera parte de este anexo recoge las definiciones de las principales magnitudes mencionadas en este trabajo. Se finaliza con una sección que repasa los principios de astronomía de posición utilizados. En este punto, nos centraremos principalmente en la descripción de la posición del Sol en la bóveda celeste, su posición relativa a una superficie cualquiera, y el ángulo formado entre éste y una región particular del cielo.

A.2. Definiciones

El estudio, medida y caracterización de la energía radiante o radiación, independientemente de su origen, se denomina *"Radiometría"*, y en esta disciplina se distingue:

Flujo radiante (ϕ): energía total de la radiación electromagnética emitida, recibida o transportada por unidad de tiempo [Badescu, 2008]. Se mide en [W].

Radiancia (I): flujo radiante en una dirección transmitido por un rayo elemental que se propaga en un ángulo sólido $d\Omega$ [Badescu, 2008]. Esta magnitud también se denomina

intensidad de radiación y se define por la expresión:

$$I = \frac{d^2\phi}{\cos\alpha d\Omega dA}. \tag{A.1}$$

Sus unidades son [W·m^{-2}sr^{-1}].

Irradiancia (i): energía de radiación incidente por unidad de tiempo sobre una superficie unitaria [Badescu, 2008].

$$i = \int_0^{2\pi} I d\Omega. \tag{A.2}$$

Se mide en [W·m^{-2}].

Irradiancia espectral (i_λ): irradiancia dada para una determinada longitud de onda λ por unidad del intervalo de longitud de onda. La irradiancia dada para una determinada banda espectral es la integral de la irradiancia espectral a lo largo de la longitud de onda dentro del intervalo correspondiente a la banda considerada [Muneer, 2004]. Se mide con *"espectrómetros"*, *"espectroradiómetros"* o *"fotómetros"*.

Irradiación (e): irradiancia total que ha incidido sobre una superficie durante un intervalo de tiempo t [Badescu, 2008].

$$e = \int_0^t i dt. \tag{A.3}$$

Se mide en [J·m^{-2}].

Radiación (E): energía total que ha incidido sobre una superficie de área S [Badescu, 2008].

$$E = \int_0^S e dS. \tag{A.4}$$

Se mide en [J].

Flujo luminoso (ϕ_v): flujo radiante ponderado de acuerdo a la curva fototípica, siendo ésta la curva que tiene en cuenta el efecto de la radiación sobre un patrón de observación fotométrico [Badescu, 2008]. Se mide en [cd·sr=lm].

Luminancia (D_v): equivalente a la radiancia pero aplicado al flujo luminoso [Badescu, 2008].

$$D_v = \frac{d^2\phi_v}{\cos\alpha d\Omega dA}. \tag{A.5}$$

Se mide en [cd·m^{-2}].

Iluminancia (d_v): flujo luminoso total incidente sobre una superficie, por unidad de área [Badescu, 2008].

$$d_v = \int_0^{2\pi} L d\Omega. \tag{A.6}$$

Se mide en [lm·m^{-2}=lx].

Eficacia luminosa (η): relación existente entre el flujo luminoso ϕ_v [lm] emitido por una fuente de luz y el flujo radiante ϕ [W].

$$\eta = \frac{\phi_v}{\phi}. \tag{A.7}$$

Absortancia: fracción del flujo incidente absorbido por un medio [Muneer, 2004].

Reflectancia: fracción del flujo radiante reflejado por una superficie [Muneer, 2004].

Transmitancia: fracción del flujo radiante transmitida por una capa de la atmósfera o un cuerpo no opaco (translúcido) [Muneer, 2004].

Constante solar (B_{sc}): valor de irradiancia solar incidente en un plano normal al vector Sol-Tierra en el límite superior de la atmósfera terrestre. Diferentes campañas de medidas han obtenido valores distintos para la constante solar, pero se acepta como representativo el valor promedio de $B_{sc} = 1\,367$ W·m^{-2} propuesto por la Organización Meteorológica Mundial (*"World Meteorological Organization"* (WMO)).

La distancia entre la Tierra y el Sol varía a lo largo del año debido a la excentricidad de su órbita elíptica. Esta variación influye en la irradiancia solar que alcanza la atmósfera, pues depende del cuadrado de la distancia que recorre. Teniendo en cuenta este hecho, para calcular la irradiancia incidente en una superficie tangente a la atmósfera, en una latitud geográfica ϕ_g determinada, emplearemos la ecuación:

$$B_{ext}(0) = B_{sc}\varepsilon_0 \cos\theta_{zs}, \tag{A.8}$$

donde θ_{zs} es el ángulo cenital solar y ε_0 es la excentricidad de la órbita terrestre, definida según la ecuación[1]:

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi N}{365}\right), \tag{A.9}$$

estando el argumento de la función coseno en [rad]. El radio o distancia promedio r_0 está cuantificada en lo que se denomina *"unidad astronómica" (UA)* y su valor es $r_0 = 1\text{UA} = 1.496\text{E}8$ km. N es el número de día del año.

El valor $B_{ext}(0)$, denominado como irradiancia extra-atmosférica o extraterrestre en el plano horizontal, constituye el límite físico de irradiancia alcanzable en la superficie terrestre en un plano horizontal. Es importante resaltar que el valor de la irradiancia

[1] Existen expresiones alternativas, como la indicada en [Spencer, 1971], obtenida mediante un análisis de Fourier para una serie de medidas realizadas en Australia:

$$\varepsilon_0 = 1.000110 + 0.034221\cos\Gamma + 0.001280\sin\Gamma + 0.000719\cos(2\Gamma) + 0.000077\sin(2\Gamma),$$

siendo Γ un ángulo auxiliar medido en [rad] y definido como: $\Gamma = 2\pi(N-1)/365$.

extra-atmosférica sólo requiere consideraciones geométrica,s por lo que es posible calcular, por ejemplo, la irradiación diaria extra-atmosférica ($B_{ext,d}(0)$) integrando la ecuación (A.8) respecto del tiempo, según:

$$B_{ext,d}(0) = -\frac{t_d}{\pi} \cdot B_{sc}\varepsilon_0(\omega_{sd}\sin\phi_g\sin\delta_s + \cos\delta_s\cos\phi_g\sin\omega_{sd}), \tag{A.10}$$

donde t_d es la duración del día en [h] y ω_{sd} es el ángulo horario que abarca desde el amanecer hasta el mediodía solar, el cual se puede calcular a partir de la expresión (A.29), resultando:

$$\cos\omega_{sd} = -\tan\phi_g\tan\delta_s. \tag{A.11}$$

Masa óptica relativa de aire: cuando la radiación atraviesa un medio, cada molécula o partícula atenúa su energía. Dicha atenuación es función del tipo y número de moléculas en la trayectoria de la radiación. Por ello la irradiancia que alcanza una superficie dependerá en gran medida del espesor de la capa atmosférica que ha tenido que recorrer el flujo radiante para alcanzarla. La relación entre el citado espesor para un determinado ángulo cenital respecto del espesor en la dirección cenital se denomina *"masa óptica relativa de aire"*.

La densidad ϱ, multiplicada por la longitud de la trayectoria s_t, representa la masa de substancia en una columna de base unitaria, y se denomina *"masa de aire"*:

$$m_a = \int_0^\infty \varrho ds_t, \tag{A.12}$$

donde ϱ es la densidad del medio y ds es la longitud geométrica de la trayectoria de la radiación. La integral de la expresión (A.12) debe realizarse desde el límite superior de la atmósfera hasta la superficie terrestre. Como la refracción[2] depende de la longitud de onda, la ecuación (A.12) sólo puede aplicarse a la radiación monocromática. Cuando el Sol está en su cenit (mediodía solar) la trayectoria de la luz es completamente vertical, entonces ds es igual a la altura de un elemento dh_z, donde h_z es la distancia vertical.

Despreciando la curvatura de la Tierra y suponiendo que la atmósfera es no refractiva y completamente isótropa, el valor de la masa relativa puede aproximarse por:

$$m = \frac{1}{\cos\theta_{zs}} = \frac{1}{\sin h_s}. \tag{A.13}$$

Sin embargo, bajo condiciones de anisotropía de la atmósfera, especialmente pronunciadas en días despejados o claros, la expresión puramente geométrica (A.13)

[2]La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina por el cambio de velocidad de propagación de la onda señalada.

debe ser modificada. Varios autores han propuesto expresiones semi-empíricas para calcular dicho valor. Así en [Kasten, 1993] se resuelve la expresión teniendo en cuenta la modificación de la densidad del aire con la altitud, utilizando el perfil del *"Modelo Atmosférico ARDC"* de 1959 [Kasten, 1966], y el índice de refracción para una longitud de onda $\lambda = 0.7$ μm:

$$m_K = \frac{1}{\sin h_s + 0.50572(h_s + 6.07995)^{-1.6364}}, \tag{A.14}$$

donde h_s es la altura solar en [º]. Para medidas a nivel del mar, la expresión (A.14) tiene una precisión superior al 99.6 % para ángulos cenitales inferiores a 89º.

Por otro lado, Gueymard en [Gueymard, 1993] propone la expresión alternativa:

$$m_G = \frac{1}{\sin h_s + 0.00176759(94.37515 - h_s)^{-1.21563}}. \tag{A.15}$$

Tanto (A.13) como (A.14) o (A.15) están dadas para presiones estándar de $p_0 = 1\,013.25$ mbar, pero pueden corregirse mediante:

$$\frac{m_p}{m_{p_0}} = \frac{p}{p_0}, \tag{A.16}$$

donde p es la presión local medida en [mbar]. Si ésta se desconoce, se puede aproximar gracias a la ecuación dada en [Muneer, 2004] en función de la altura h_z en [m] sobre el nivel del mar:

$$\frac{p_z}{p_0} = \exp(-0.0001184 h_z). \tag{A.17}$$

Las tres definiciones dadas para la masa óptica relativa de aire se pueden comparar en la figura A.1. Podemos apreciar que su comportamiento es prácticamente idéntico salvo en el entorno de la franja del horizonte observado ($h_s \approx 0$).

A.3. Geometría solar

El planeta Tierra realiza un movimiento de traslación en una órbita elíptica alrededor del Sol, a la vez que rota alrededor de su propio eje (eje del mundo). La combinación de ambos movimientos es percibida por un observador en la superficie terrestre como un movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste. Este movimiento aparente puede describirse mediante un sistema de coordenadas esféricas, que pueden estar referidas, bien a un sistema de ejes terrestres ligados al plano ecuatorial y al eje del mundo (*"coordenadas ecuatoriales"*), o a un sistema de ejes locales que toman como elementos base el plano horizonte y la vertical del lugar de observación (*"coordenadas horizontales"*). La posición del observador queda descrita mediante la pertenencia a un meridiano (caracterizado por su distancia angular al meridiano de referencia de Greenwich o longitud geográfica λ_g) y la pertenencia a un paralelo (definido por la distancia angular al plano ecuatorial o latitud geográfica ϕ_g).

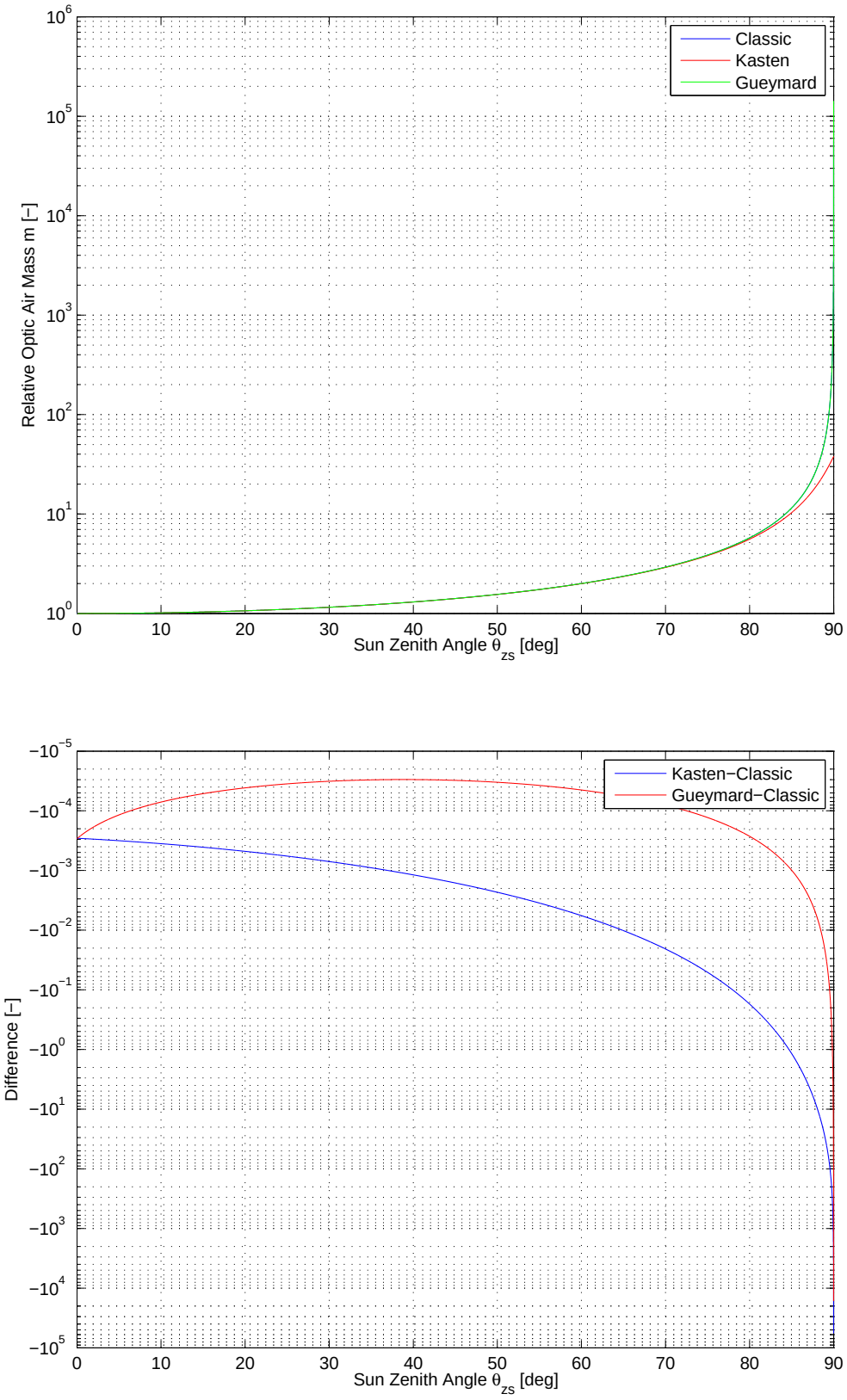


Figura A.1: Comparación entre las definiciones de masa óptica relativa de aire.

A.3.1. Coordenadas ecuatoriales u horarias

Son un sistema de coordenadas esféricas referidas al plano ecuatorial (definido éste como aquel que es perpendicular al eje del mundo en el punto de observación) y al plano meridiano. Se compone de dos coordenadas (véase la figura A.2): la *"declinación"* (δ) y el *"ángulo horario"* (ω). La primera mide la distancia angular entre el plano ecuatorial y la posición del astro, que en el caso de ser el Sol es el plano de la eclíptica, y la segunda determina el ángulo formado por la proyección de la posición del astro sobre el plano ecuatorial y la intersección de este último con el plano meridiano, o lo que es lo mismo, la dirección Norte-Sur. Así podemos describir un sistema de referencia expresado en función de los siguientes tres vectores ortonormales (véase la figura A.2):

- **Vector polar ($\mathbf{z_0}$):** vector con la dirección del eje de rotación terrestre y sentido del polo Sur al polo Norte geográficos. Coincide por tanto con el eje del mundo.
- **Vector ecuatorial ($\mathbf{y_0}$):** vector que caracteriza la recta intersección del plano meridiano y el plano ecuatorial, con origen en el observador y dirección hacia el Ecuador (por lo tanto, indicando la dirección del mediodía solar).
- **Vector perpendicular ($\mathbf{x_0}$):** vector que resulta del producto vectorial $\mathbf{y_0} \times \mathbf{z_0}$. Es perpendicular al plano meridiano, o lo que es lo mismo, está contenido en el primer vertical. Apunta en dirección Este.

Así, un vector $\mathbf{r} = (x, y, z)$ quedaría expresado según las coordenadas ecuatoriales como:

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta\cos\omega \\ \cos\delta\sin\omega \\ \sin\delta \end{pmatrix}. \tag{A.18}$$

Declinación solar

El plano de la eclíptica y el plano ecuatorial terrestre intersectan en los primeros puntos de Aires y Libra y forman entre ellos un ángulo constante $\delta_s = 23,45^{\text{o}}$. Sin embargo, debido al movimiento de traslación del planeta Tierra en su órbita alrededor del Sol, el ángulo entre ambos planos observado desde la superficie terrestre varía a lo largo del año y da lugar a las distintas estaciones (invierno, primavera, verano y otoño). Así, el Sol recorre una trayectoria más elevada en los días estivales que en los invernales. En los equinoccios la declinación es nula, de forma que el Sol sale y se pone exactamente por el Este y el Oeste respectivamente, siendo idénticas la duración del día y la noche. En el solsticio de verano en el hemisferio Norte (suele tener lugar entre los días 21 y 22 de junio), la declinación

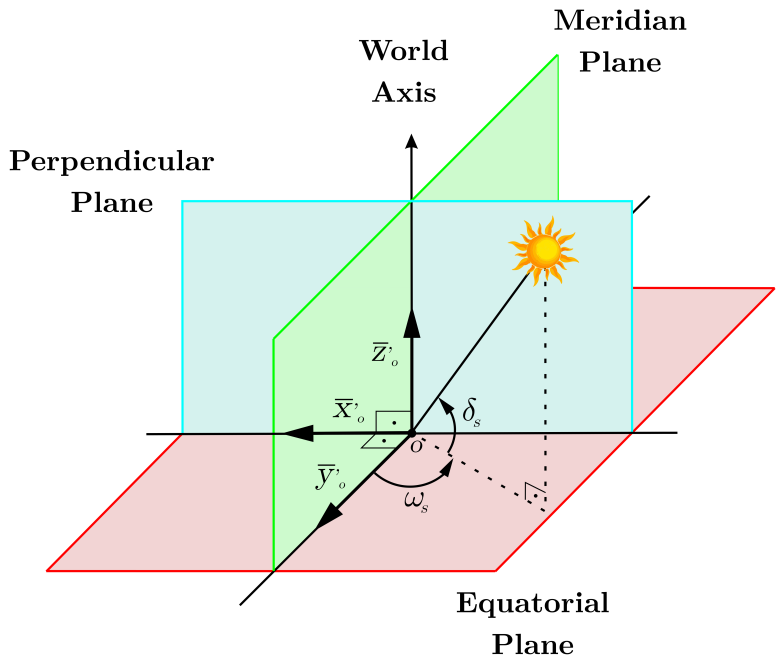


Figura A.2: Coordenadas horarias o ligadas a ejes terrestres.

toma su valor máximo: $\delta_s = \text{máx}(\delta_s) = 23.45^{\text{o}}$. Se produce en este momento el día más largo del año, amaneciendo por el Noreste y anocheciendo por el Noroeste. En el solsticio de invierno en el hemisferio Norte (entre los días 21 y 22 de diciembre), la declinación es mínima: $\delta_s = \text{mín}(\delta_s) = -23.45^{\text{o}}$, dando lugar al día más corto, con el Sol amaneciendo por el Sureste y poniéndose por el Suroeste. En el hemisferio Sur, los solsticios son opuestos.

La declinación es calculada habitualmente mediante la *"Fórmula de Cooper"*:

$$\delta_s = 23.45 \sin\left[\frac{2\pi(N+284)}{365}\right], \tag{A.19}$$

donde δ_s está expresado en grados sexagesimales [^{o}] y N es el día correspondiente del año ($N \in [1, 365]$ siendo $N = 1$ para el día 1 de enero). El argumento de la función seno está en [rad].

No obstante, existen otras expresiones empíricas, como las indicadas en [Spencer, 1971], [Michalsky, 1988] o [Perpiñán Lamigueiro, 2013], que plantean una expresión alternativa obtenida mediante un análisis de Fourier:

$$\begin{aligned}\delta_s = {} & 0.396372 - 22.9133\cos\Gamma + 4.02543\sin\Gamma - 0.387205\cos(2\Gamma) \\ & + 0.051967\sin(2\Gamma) - 0.154527\cos(3\Gamma) + 0.084798\sin(3\Gamma),\end{aligned} \tag{A.20}$$

obteniendo el resultado en [^{o}] y siendo $\Gamma = 2\pi(N-1)/365$.

La figura A.3 compara los resultados de las expresiones (A.19) y (A.20), mostrando en la serie de color verde la diferencia entre ambos valores multiplicada por 10. Las diferencias aumentan a partir del solsticio de junio, pero en cualquier caso la diferencia máxima es inferior a 1.4º (en torno al equinoccio de otoño).

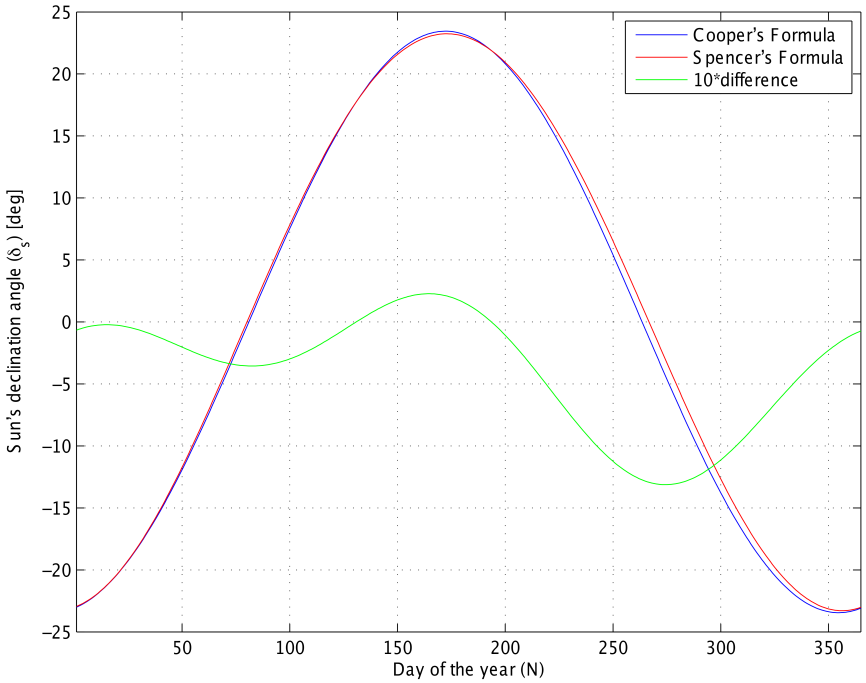


Figura A.3: Declinación del Sol a lo largo del año.

Ángulo horario solar

Esta magnitud equivale a la hora solar o *"Tiempo Solar Verdadero"* (TSV) medida en unidades angulares. Describe el ángulo formado entre la proyección del astro sobre el plano ecuatorial y la dirección Norte-Sur, marcada por la intersección de éste con el plano meridiano. Su valor es nulo al mediodía solar, negativo por la mañana y positivo por la tarde. Su valor en [º] se determina a partir de la expresión:

$$\omega_s = 15(\text{TSV} - 12), \tag{A.21}$$

donde TSV es el Tiempo Solar Verdadero en [h].

El Tiempo Solar Verdadero se puede determinar para cada localización a partir de la hora civil o legal (H_c) y la latitud (ϕ_g) y longitud (λ_g) geográficas correspondientes al lugar de observación mediante la expresión:

$$\text{TSV} = H_c + \Delta H_{adel} + \Delta H_{\lambda_g} + \Delta H_{et}, \tag{A.22}$$

donde ΔH_{adel} es la corrección por adelanto horario, ΔH_{λ_g} es la corrección por longitud geográfica y ΔH_{et} es la corrección por ecuación de tiempo. Dichas correcciones se encuentran descritas en las ecuaciones (A.23), (A.24) y (A.26) respectivamente.

La corrección por adelanto horario cuantifica el desfase horario por adelanto u atraso horario que se realiza en algunos países (entre ellos España) para adecuar en mayor medida el periodo de luz natural a las actividades humanas. Concretamente, en el periodo estival se atrasa una hora respecto a la hora civil marcada en ese momento, y en periodo invernal se adelanta una hora. Así, en España esta corrección vale:

$$\Delta H_{adel} = \begin{cases} -1 & \text{si es horario de verano,} \\ 0 & \text{si es horario de invierno.} \end{cases} \tag{A.23}$$

La corrección por longitud geográfica evalúa la discrepancia existente entre la hora real y la adoptada de referencia en una localización por encontrarse ésta a una longitud geográfica distinta de la del huso horario correspondiente a dicha hora de referencia. Esta corrección se cuantifica en [h] mediante:

$$\Delta H_{\lambda_g} = \frac{\lambda_0 - \lambda_g}{15}, \tag{A.24}$$

siendo λ_0 la longitud de referencia horaria o longitud geográfica correspondiente al huso horario adoptado, y que se determina en [°E][3] según:

$$\lambda_0 = -15 n_h, \tag{A.25}$$

donde n_h es el número de horas de diferencia respecto de la hora correspondiente al Meridiano de Greenwich. En España su valor es $n_h = 1$, o lo que lo mismo, la referencia horaria de España es GMT+1.

Finalmente, la corrección por ecuación de tiempo determina la variación de la hora solar por la variación de la velocidad de traslación terrestre alrededor del Sol y a la inclinación del eje del mundo con respecto al plano de la eclíptica. Esta variación de velocidad se cuantifica mediante las *"Leyes de movimiento orbital"* formuladas por Kepler sobre los movimientos de traslación. Éstas indican que *"tiempos iguales barren áreas iguales"* en las órbitas. Esto significa que la Tierra disminuye su velocidad de traslación a lo largo de su órbita cuando está próxima al afelio y la acelera al acercarse al perhielio. Podemos observar este fenómeno a través del estudio de las *"analemas"*[4]. Su valor en [h] se puede cuantificar mediante la ecuación:

$$\Delta H_{et} = \frac{9.87 \sin(2\Gamma') - 7.53 \cos(\Gamma') - 1.50 \sin(\Gamma')}{60}, \tag{A.26}$$

[3] Se ha tomado la notación de °E refiriéndose a que se consideran positivas las longitudes hacia el Este del meridiano de Greenwich, y negativas hacia el Oeste del mismo.

[4] Analema es la curva descrita por el Sol en la bóveda celeste para un año completo a la misma hora del día en Tiempo Solar Medio.

donde Γ' es un ángulo auxiliar cuyo valor en [rad] es:

$$\Gamma' = \frac{2\pi(N-81)}{364}. \tag{A.27}$$

La figura A.4 muestra cómo varía la corrección por ecuación de tiempo a lo largo del año.

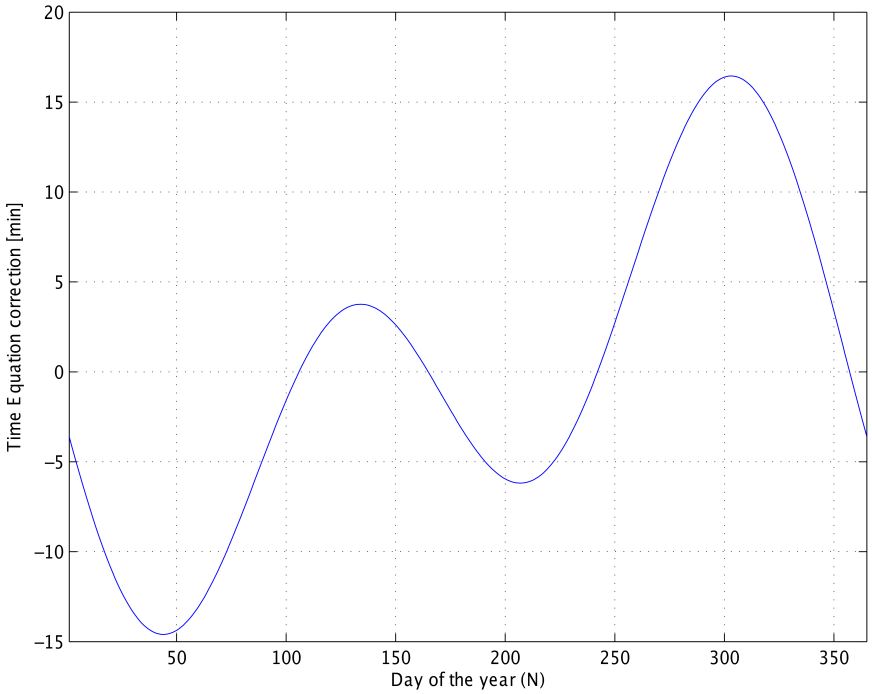


Figura A.4: Corrección por ecuación de tiempo a lo largo del año.

A.3.2. Coordenadas horizontales

Se denomina coordenadas horizontales a aquellas que están referidas al plano horizontal o del horizonte (descrito como aquel que es perpendicular a la vertical del lugar en el punto de observación) y al plano meridiano. De esta forma se puede definir un sistema de coordenadas referenciadas a un triedro definido por un conjunto de tres vectores ortonormales (véase la figura A.5):

- **Vector cenital ($\mathbf{z'_0}$):** vector según la vertical.
- **Vector horizontal ($\mathbf{x'_0}$:)** vector que define la dirección de la recta intersección entre el plano horizontal y el plano meridiano, y con dirección hacia el Ecuador.
- **Vector perpendicular ($\mathbf{y'_0}$):** vector que resulta del producto vectorial: $\mathbf{z'_0} = \mathbf{x'_0} \times \mathbf{y'_0}$, y por tanto, perpendicular a los planos horizontal y meridiano respectivamente.

Se puede definir de forma análoga como aquel que determina la dirección de la recta intersección entre el plano horizontal y el primer vertical. Por definición, su sentido es hacia el Este.

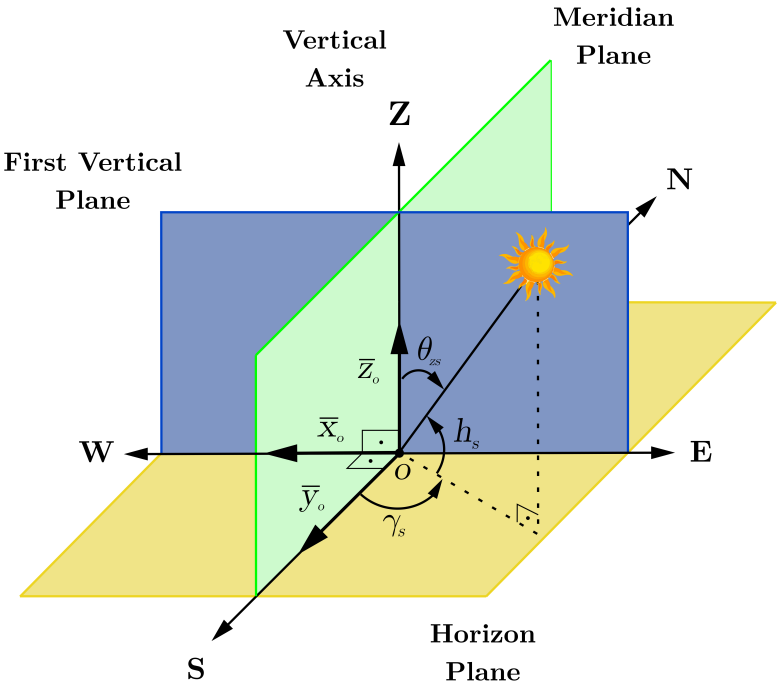


Figura A.5: Coordenadas horizontales o ligadas a ejes locales.

Así, un vector $\mathbf{r} = (x', y', z')$ quedaría expresado según las coordenadas horizontales como:

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta\cos\gamma \\ \sin\theta\sin\gamma \\ \cos\theta \end{pmatrix}. \tag{A.28}$$

A partir del sistema de referencia anterior, se definen dos coordenadas: el *"ángulo cenital"* (θ) y el *"ángulo acimutal"* (γ). El primero determina la distancia angular entre la vertical del lugar y la posición del astro en la bóveda celeste, y el segundo define el ángulo entre la dirección ecuatorial y la proyección de la posición del astro sobre el plano horizontal.

Ángulo cenital solar

Se define como ángulo cenital, o simplemente cenit o zenith, al formado por la vertical del lugar de observación y la visual con el Sol. Su valor exacto se puede determinar mediante la ecuación:

$$\cos\theta_{zs} = \sin\phi_g \sin\delta_s + \cos\phi_g \cos\delta_s \cos\omega_s. \tag{A.29}$$

Ángulo acimutal solar

El ángulo acimutal, o simplemente acimut o azimuth, es el ángulo formado por la proyección sobre el plano ecuatorial de la visual del observador con el Sol y el vector horizontal o intersección del plano meridiano con el plano del horizonte. Su cálculo se realiza aplicando:

$$\tan\gamma_s = \frac{\cos\delta_s \sin\omega_s}{\cos\delta_s \sin\phi_g \cos\omega_s - \sin\delta_s \cos\phi_g}. \tag{A.30}$$

A.3.3. Transformación de coordenadas

La transformación de coordenadas ecuatoriales a horizontales y viceversa se puede realizar mediante las correspondientes matrices de cambio de base (A.31) y (A.32), las cuales representan un giro respecto del vector perpendicular, común a ambos sistemas de referencia. Se debe prestar especial cuidado al hecho de que en el ecuador terrestre, la latitud geográfica ϕ_g cambia de signo, y el vector $\mathbf{z'_0}$ (coordenadas horizontales) mantiene la dirección pero cambia el sentido respecto al sistema de referencia absoluto (coordenadas ecuatoriales u horarias). Esta circunstancia se tiene en cuenta en la mencionada matriz de cambio de base añadiendo el factor $\text{sign}(\phi_g)$. Así, para el paso de coordenadas ecuatoriales a coordenadas horizontales se empleará:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{sign}(\phi_g)\sin\phi_g & 0 & -\text{sign}(\phi_g)\cos\phi_g \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\phi_g & 0 & \sin\phi_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \tag{A.31}$$

Si se desea hacer la transformación en sentido inverso, es decir, de coordenadas horizontales a coordenadas ecuatoriales u horarias, basta con calcular la matriz traspuesta de (A.31):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{sign}(\phi_g)\sin\phi_g & 0 & \cos\phi_g \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sign}(\phi_g)\cos\phi_g & 0 & \sin\phi_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}. \tag{A.32}$$

Combinando las expresiones (A.18), (A.28), (A.31) y (A.32) deducimos las relaciones exis-

tentes entre las coordenadas horizontales y ecuatoriales:

$$\sin\theta\cos\gamma = \text{sign}(\phi_g)\sin\phi_g\cos\delta\cos\omega - \text{sign}(\phi_g)\cos\phi_g\sin\delta, \tag{A.33}$$

$$\sin\theta\sin\gamma = \cos\delta\sin\omega, \tag{A.34}$$

$$\cos\theta = \cos\phi_g\cos\delta\cos\omega + \sin\phi_g\sin\delta, \tag{A.35}$$

$$\cos\delta\cos\omega = \text{sign}(\phi_g)\sin\phi_g\sin\theta\cos\gamma + \cos\phi_g\cos\theta, \tag{A.36}$$

$$\cos\delta\sin\omega = \sin\theta\sin\gamma, \tag{A.37}$$

$$\sin\delta = -\text{sign}(\phi_g)\cos\phi_g\sin\theta\cos\gamma + \sin\phi_g\cos\theta. \tag{A.38}$$

A.3.4. Distancia angular entre dos puntos de la bóveda celeste

Determinar el ángulo o mínima distancia formada entre dos puntos de la bóveda celeste, definidos por sus coordenadas cartesianas $A = (x_a, y_a, z_a)$ y $B = (x_b, y_b, z_b)$, es tan sencillo como realizar el producto escalar entre ambos vectores de posición. El resultado será el coseno del ángulo formado entre ambos, $\cos\xi$, según:

$$\mathbf{a}\cdot\mathbf{b} = |\mathbf{a}||\mathbf{b}|\cos\xi \Rightarrow \cos\xi = \mathbf{a}\cdot\mathbf{b}. \tag{A.39}$$

Desarrollando la ecuación anterior se obtiene:

$$\cos\xi = \cos\theta_a\cos\theta_b + \sin\theta_a\sin\theta_b\cos(\gamma_a - \gamma_b), \tag{A.40}$$

siendo (θ_a, γ_a) y (θ_b, γ_b) las coordenadas horizontales de los puntos A y B respectivamente.

En ocasiones, será interesante conocer el ángulo o mínima distancia entre un punto cualquiera de la bóveda observada y la posición del Sol, descrita por las coordenadas horizontales (θ_{zp}, γ_p). En ese caso, la expresión (A.40) quedaría como:

$$\cos\xi_s = \cos\theta\cos\theta_{zs} + \sin\theta\sin\theta_{zs}\cos(\gamma_s - \gamma). \tag{A.41}$$

Por otro lado, también resultará de interés determinar dicha distancia angular entre un punto cualquiera de la bóveda observada y una superficie cualquiera, caracterizada por su vector director $\mathbf{p}$, de forma que:

$$\cos\xi_p = \cos\theta\cos\theta_{zp} + \sin\theta\sin\theta_{zp}\cos(\gamma_p - \gamma), \tag{A.42}$$

siendo los ángulos θ_{zp} y γ_p los ángulos cenital y acimutal de la superficie respectivamente, es decir, las coordenadas horizontales de su vector director.

En el caso particular del cálculo del ángulo formado entre una superficie y la posición del Sol (figura A.6), la expresión (A.42) queda:

$$\cos\theta_{sp} = \cos\theta_{zs}\cos\theta_{zp} + \sin\theta_{zs}\sin\theta_{zp}\cos(\gamma_p - \gamma_s), \tag{A.43}$$

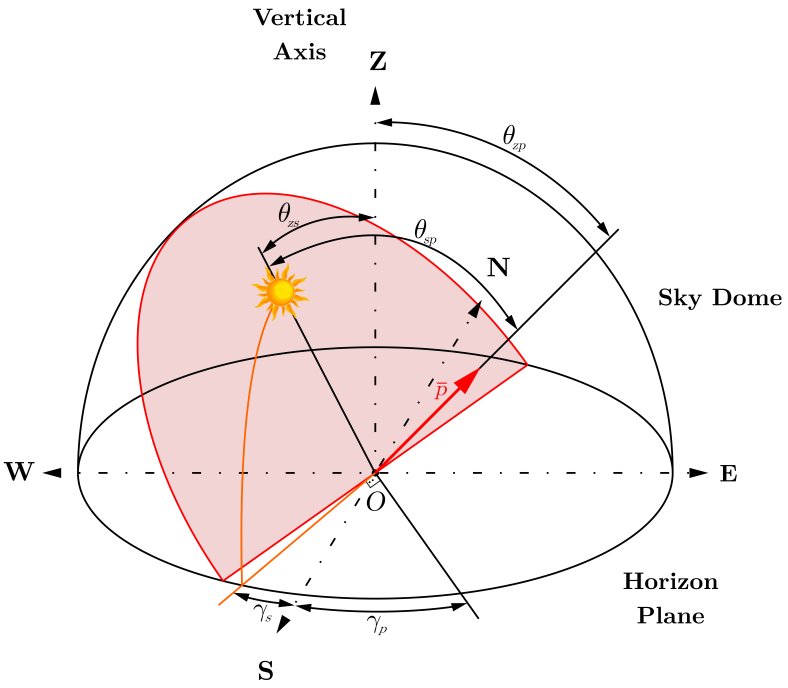


Figura A.6: Ángulo formado por una superficie y la posición del Sol.

o en términos de las coordenadas horarias (δ_s, ω_s):

$$\begin{aligned}\cos\theta_{sp} = {} & \sin\phi_g \sin\delta_s \cos\theta_{zp} - \cos\phi_g \sin\delta_s \sin\theta_{zp} \cos\gamma_p \\ & + \cos\phi_g \cos\delta_s \cos\omega_s \cos\theta_{zp} + \sin\phi_g \cos\delta_s \cos\omega_s \sin\theta_{zp} \cos\gamma_p \\ & + \cos\delta_s \sin\omega_s \sin\theta_{zp} \sin\gamma_p.\end{aligned} \tag{A.44}$$

Para el caso de que la superficie esté orientada hacia el Ecuador ($\gamma_p = 0$), la expresión (A.44) puede simplificarse a:

$$\cos\theta_{sp} = \sin(\phi_g - \theta_{zp}) \sin\delta_s - \cos(\phi_g - \theta_{zp}) \sin\delta_s, \tag{A.45}$$

resultando el ángulo $\phi'_g = \phi_g - \theta_{zp}$, definido como *"latitud equivalente"*.

No obstante, se ha comprobado que computacionalmente las expresiones (A.43) y (A.44) no se comportan igual (véase la figura A.7). Es preferible utilizar la primera.

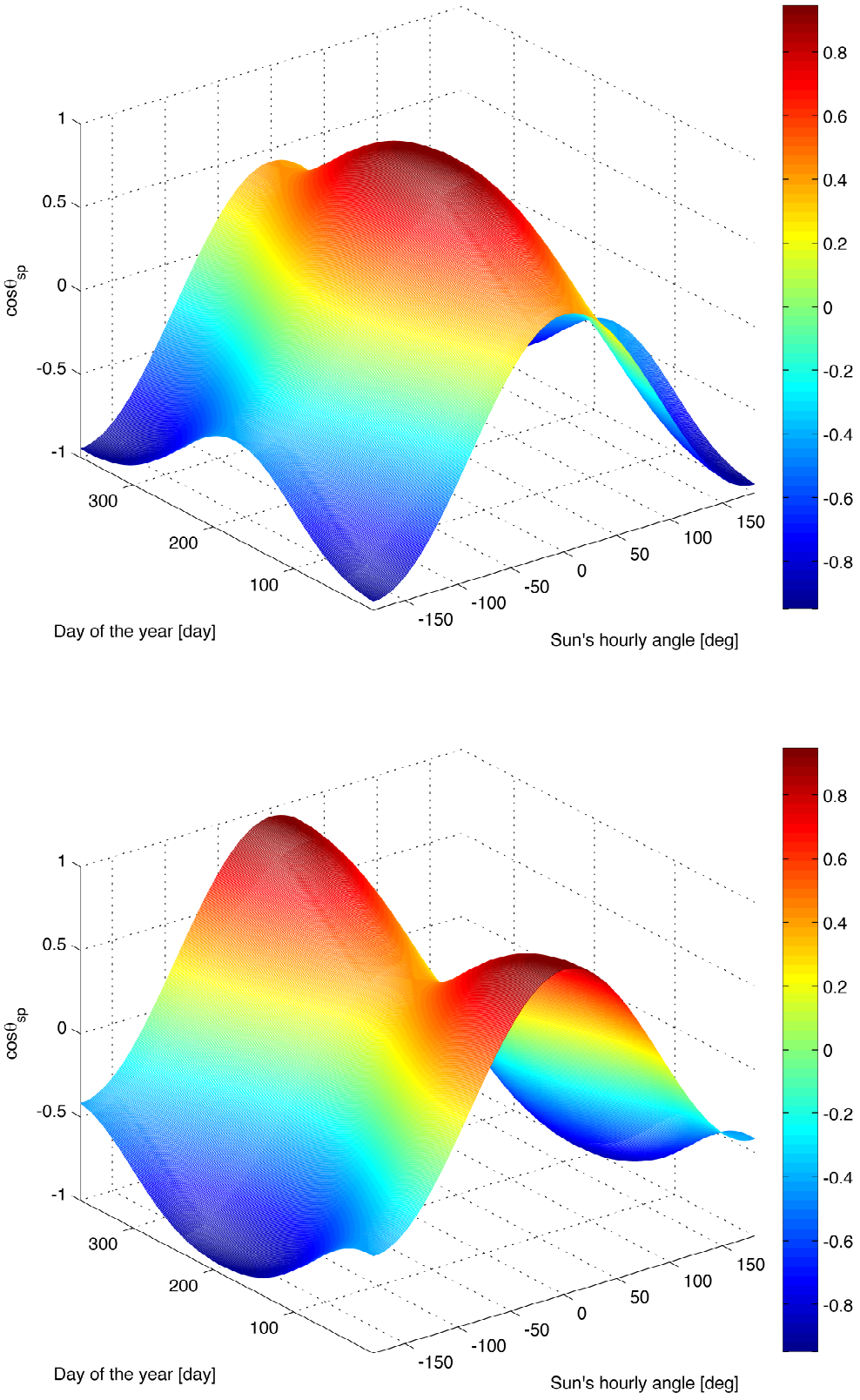


Figura A.7: Comparación entre el cálculo de θ_{sp} para una superficie inclinada 0° en $\phi_g = 42^o$N. (a) Utilizando la expresión (A.44). (b) Utilizando la expresión (A.43).

Anexo B

Medida de la irradiancia difusa

B.1. Introducción

En los últimos años, gracias al desarrollo experimentado por la radiometría absoluta, se ha mejorado enormemente la precisión de las medidas de irradiancia. Por ello se ha definido una *"Referencia Radiométrica Mundial"* o *"World Radiometric Reference"* (WRR) a partir de los resultados obtenidos con la realización de numerosas comparaciones de 15 pirheliómetros absolutos individuales. La WRR se considera representativa de las unidades físicas de irradiancia total con una precisión superior a $\pm 0.3\,\%$. Fue adoptada por el congreso de la OMM en 1979, donde además se creó el *"Grupo Mundial de Normalización"* (WSG) [WMO, 2013].

Con objeto de garantizar la estabilidad a largo plazo de la nueva referencia, como WRR se utiliza por lo menos un grupo de 4 pirheliómetros absolutos de distinto diseño. Los instrumentos del grupo se comparan entre sí al menos una vez al año, tal y como se indica en [WMO, 2013]. El WSG se mantiene en el *"Centro Mundial de Calibración Radiométrica"* en Davos (Suiza).

Para la medida local de irradiancia difusa, el método más extendido es utilizar un piranómetro como el empleado para la medida de irradiancia global, al que se le incorpora un dispositivo de sombreamiento para bloquear la irradiancia directa sobre el mismo. Normalmente se evalúa la irradiancia en todo el ancho del espectro electromagnético, pero existe una rama de la radiometría que particulariza las medidas a determinadas longitudes de onda de dicho espectro, dando lugar a las denominadas *"medidas de radiancia espectral"*. Por otro lado, cuando se toman medidas sobre planos inclinados, existe una componente de irradiancia reflejada no nula. Para determinar el valor de la irradiancia difusa únicamente procedente del cielo, la irradiancia reflejada debe medirse y sustraerse,

o se debe disponer de un escudo que impida su incidencia sobre el sensor.

Este anexo recoge la instrumentación utilizada para la medida de la irradiancia solar difusa. Se describen los distintos equipos de sombreamiento convencionales, otras alternativas y los equipos de medida de la distribución espacial de la radiancia. Además, se indican las posibles fuentes de error y el procedimiento de calibración de la instrumentación en campo. Finalmente, se realiza una breve alusión a las diferencias existentes entre la toma de medidas en estaciones en tierra respecto a la utilización de medidas por satélite, así como se hará una referencia a las distintas bases de datos radiométricos disponibles en la actualidad.

B.2. Dispositivos de sombreamiento convencionales

Para la medida de radiación solar difusa se emplea un piranómetro, al que se le coloca un sistema blocante de la radiación directa, o lo que es lo mismo, que oculte el disco solar en su trayectoria aparente por la bóveda celeste. Para ello suele emplearse un anillo, una banda rotativa o un disco móvil (véase las subsecciones B.2.1, B.2.2 y B.2.3 respectivamente).

Si se utiliza un elemento blocante de una región del cielo, dicho elemento está distorsionando la medida obtenida, en el sentido en que el sensor no puede medir la irradiancia difusa procedente de la región de cielo bloqueada. Cuanto mayor sea el elemento de proyección de sombra, mayor será esta distorsión y, por tanto, más alejada de la realidad será la medida realizada. Por este motivo se debe corregir la medida obtenida directamente en el sensor mediante un factor de corrección f_c, el cual debe tener en cuenta la irradiancia isótropa (corrección geométrica) y la radiancia anisótropa que no ha percibido el sensor en la medida directa [Drummond, 1964, Batlles et al., 1995, Ineichen et al., 1983, LeBaron et al., 1990]. Así la medida se obtendría aplicando:

$$D_c(\theta_{zp}, \gamma_p) = f_c D_m(\theta_{zp}, \gamma_p), \tag{B.1}$$

siendo D_c la medida corregida, f_c el factor de corrección total (corrección isótropa y anisótropa) y D_m la medida registrada por el sensor.

Mientras que la corrección geométrica, que supone una distribución isótropa de la radiancia en el cielo, se puede determinar mediante el análisis de las relaciones geométricas entre la fracción de bóveda celeste observada por el sensor y la fracción oculta por el elemento de sombra, la corrección anisótropa o total, debe aplicar un modelo de distribución de radiancia.

B.2.1. Anillo de sombra de Drummond

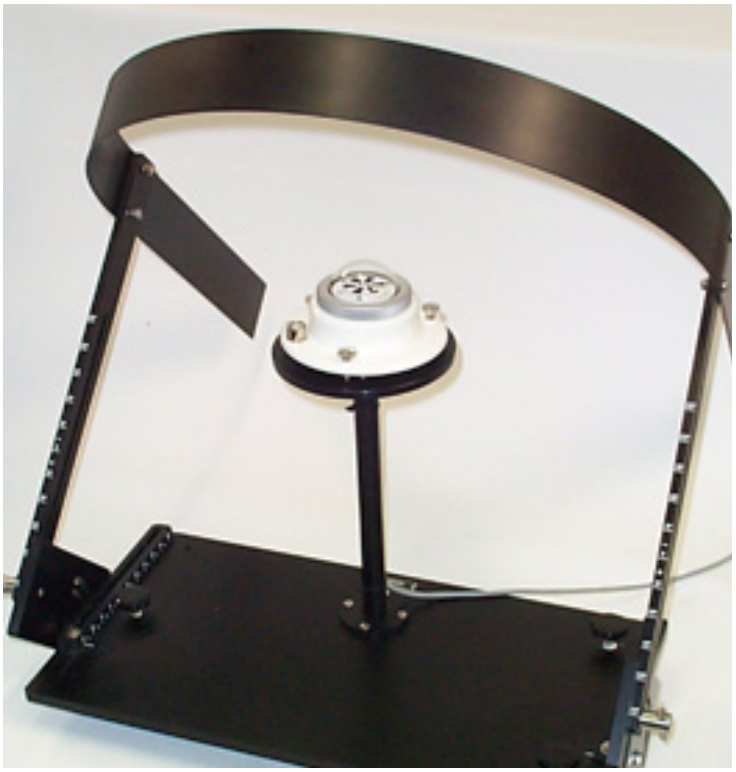
El anillo, o también denominada banda, de sombra de Drummond, descrito y desarrollado en [Drummond, 1956, Drummond, 1964, Robinson and Stoch, 1964], es un dispositivo sencillo y práctico para evitar la incidencia de irradiancia directa sobre un piranómetro. Probablemente sea el dispositivo para la medida de irradiancia difusa sobre plano horizontal o inclinado en dirección ecuatorial más extendido en la actualidad. Consiste en una banda de metal, abierta o cerrada, que oculta la trayectoria del Sol desde su salida hasta su puesta, con el ancho suficiente para que proyecte sombra sobre toda la superficie sensora del piranómetro. Por otro lado, el ancho de la banda debe ser lo más estrecho posible para minimizar la distorsión en la medida del sensor, ya que la banda no sólo oculta al Sol en un instante dado, sino una franja completa de cielo. Debido a que el ancho está limitado, es necesario regular y ajustar periódicamente (cada varios días dependiendo del ancho del anillo) la posición del dispositivo para adaptarse a la trayectoria del Sol, la cual es paralela al Ecuador Celeste a una distancia igual a la declinación. Las posiciones extremas tendrían lugar en los solsticios de junio y diciembre respectivamente. La sección transversal del anillo, típicamente es plana, pero los nuevos dispositivos aprovechan secciones en U que permiten emplear bandas más estrechas.

La figura B.1(a) muestra una banda de sombra abierta y sección plana, mientras que la figura B.1(b) muestra un dispositivo más moderno con anillo cerrado y sección en U. La figura B.2 indica cada una de las partes que componen un dispositivo convencional.

B.2.2. Banda rotativa

Otro dispositivo convencional, sobre todo en las estaciones radiométricas automatizadas, es la banda rotativa, cuyo ejemplo constructivo se puede apreciar en la figura B.3. Consiste en una banda curvada y motorizada que realiza un movimiento de rotación diario, desplazándose con el ángulo horario correspondiente a la posición del Sol en cada instante (ω_s). La banda curvada debe tener como mínimo la longitud de arco correspondiente a la variación de declinación de la posición del Sol a lo largo de todo el año. Este elemento también genera una distorsión en las medidas realizadas y su ancho debe ser tal que, por un lado dicha distorsión sea mínima, y por otro, se garantice la proyección de sombra sobre el domo del piranómetro para cualquier posición.

Respecto al anillo de Drummond, presenta las ventajas de ser fácilmente automatizable y no precisar un reajuste periódico.

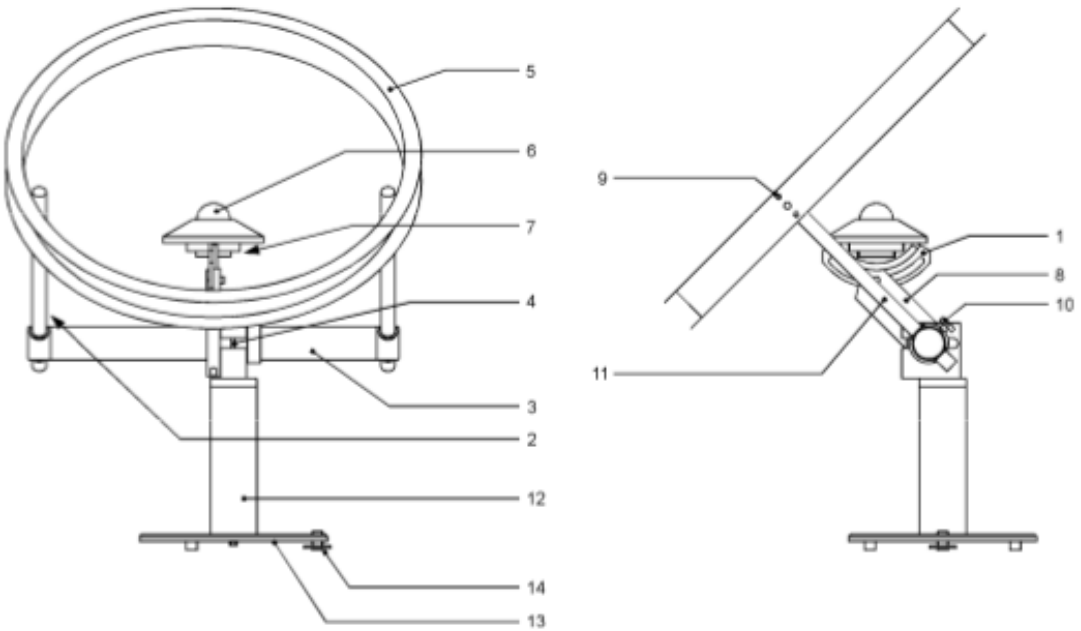


(a) Anillo de Drummond de banda abierta.



(b) Anillo de Drummond cerrado.

Figura B.1: Anillos de sombra de Drummond. Fuente: [Kipp & Zonen, 2015].



1	sector (including sight)
2	scale on the sliding bar (point of readout is indicated)
3	crossbar
4	securing bolt for the crossbar to the pyranometer support
5	shadow ring
6	pyranometer (normally not included in delivery)
7	spirit level of the pyranometer
8	pyranometer support
9	screws for attachment of the sliding bar to the shadow ring
10	fixing screws for the sliding bars
11	sliding bar
12	pillar
13	base
14	leveling screw for the base

Figura B.2: Elementos de un anillo de Drummond. Fuente: [Kipp & Zonen, 2015].

B.2.3. Disco o bola de sombra con seguidor

El disco o bola solar con seguidor es el dispositivo existente más sofisticado para la medida de irradiancia difusa sobre un plano (normalmente horizontal). Como su nombre indica, consiste en un disco o bola metálica que se sitúa en la posición observada del Sol en cada instante, gracias a la actuación de un seguidor. Al tener un diámetro equivalente a los 2.5^{o} de abertura correspondientes al diámetro observado del disco solar, permiten proyectar la sombra adecuada sobre el piranómetro.

Este sistema apenas produce distorsión en la medida y, de hecho, muchos autores consideran despreciable el factor de corrección aplicable en este caso, por lo que se suelen tomar como medidas de referencia a comparar con otros sistemas. Normalmente, en el mismo seguidor que se utiliza para la instalación del pirheliómetro de una estación automatizada, se coloca este dispositivo para la medida de irradiancia difusa en el plano horizontal.

Nótese que el dispositivo así montado sólo permite la medida de irradiancia difusa en el plano horizontal, pues el piranómetro sobre el que se proyecta sombra gira solidariamente al eje vertical del seguidor, siendo imposible fijarlo en un plano cualquiera. Además, estos sistemas precisan de un ajuste fino y su sistema de control puede constituir una importante fuente de fallos y desviaciones del modo de operación.

En la figura B.4 se puede observar un modelo de este dispositivo, en el cual, sobre el seguidor se ha instalado un piranómetro para la medida de irradiancia global horizontal, un piranómetro sobre el que uno de los discos proyecta sombra para la medida de irradiancia difusa horizontal y un pyrgeómetro también sombreado para la medida de irradiancia difusa en el espectro del infrarrojo. Además el brazo del seguidor lleva acoplado un pirheliómetro para la medida de irradiancia directa.

B.3. Otros dispositivos

Existen otra serie de dispositivos, de uso menos extendido, para la medida de irradiancia difusa. Normalmente su uso se descarta debido a su complejidad, coste, baja fiabilidad o elevada tasa de error. Dentro de los numerosos instrumentos y prototipos que se pueden encontrar, cabe destacar el presentado en [de Oliveira and Machado, 2001] que, siendo análogo al anillo de sombra de Drummond, en lugar de realizar el ajuste de dicho anillo, éste permanece fijo a la estructura y es el piranómetro el que se desplaza a lo largo de un eje. Este dispositivo no tiene en principio ninguna ventaja respecto al anillo de sombra de Drummond y su aplicación fiable, debido a su propia constitución geométrica, queda restringida a latitudes próximas al ecuador. Para latitudes superiores, el ancho de la banda del anillo necesario para una cobertura total de la superficie sensora del piranómetro lo

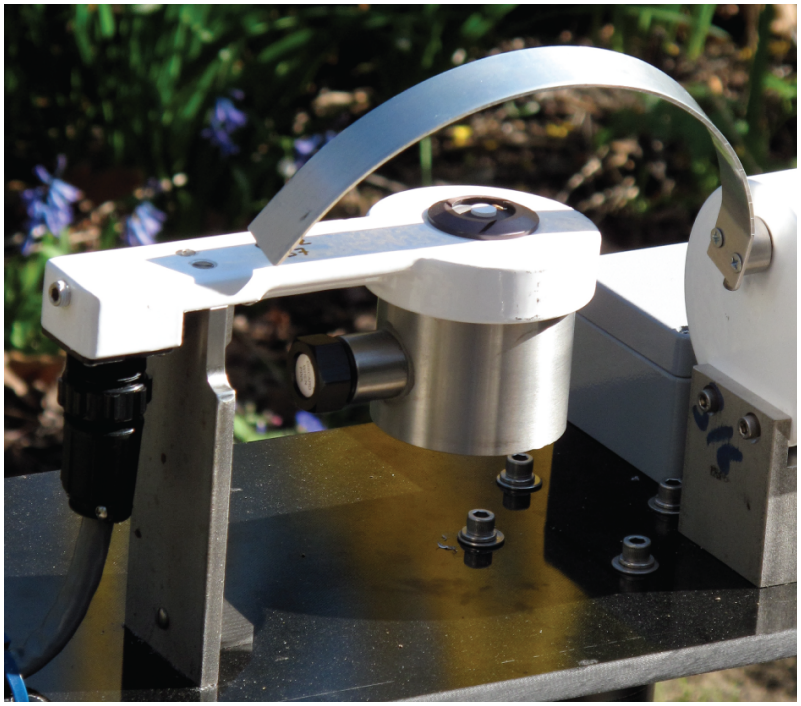


Figura B.3: Banda rotativa. Fuente: [Vignola et al., 2012].



Figura B.4: Disco solar con seguidor. Fuente: [Kipp & Zonen, 2015].

haría inviable para obtener medidas precisas.

Por otro lado, el sistema presentado en la patente [Burba, 2011] realiza la medición de radiancia difusa mediante la comparación de la salida de varios sensores (termopilas) colocados en un patrón radial en torno a un cilindro opaco. Dicho cilindro proyecta sombra en función de la posición del Sol en cada instante, de forma que siempre existe al menos un sensor iluminado y al menos un sensor en sombra. Por comparación de los valores de las medidas tomadas en todos los sensores, se determina que la irradiancia global corresponde al sensor que mayor lectura ofrece, y la irradiancia difusa correspondería al menor. La diferencia de ambos valores coincidiría con el de la irradiancia directa proyectada sobre el plano horizontal.

Finalmente, y basado en el principio de funcionamiento del dispositivo anterior, la empresa Cambridge del Reino Unido, ha diseñado el dispositivo *"Delta-T"* [Wood, 2002]. Este dispositivo permite la medida de irradiancia global y difusa horizontal mediante una serie de sensores (termopilas o fotodiodos), distribuidos según un patrón determinado, sobre los que se coloca, antes del domo del sensor, una máscara con un patrón diseñado por ordenador. Ésta hace que en todo momento al menos un sensor esté completamente iluminado y, al mismo tiempo, al menos un sensor esté sombreado. De igual forma que el dispositivo anterior, la determinación del sensor iluminado (que dará la medida de irradiancia global) y del sensor sombreado (que determinará el valor de irradiancia difusa) se realiza comparando y ordenando los valores de las señales de salida. El dispositivo puede ser adaptado para cualquier latitud y ángulo customizando la máscara de sombreamiento.

Aunque los dos dispositivos anteriores tienen la ventaja de carecer de elementos móviles, la medida obtenida sufre una gran distorsión, dado que los elementos de sombreamiento ocupan la mayor parte de la bóveda celeste observada por los sensores, hecho que debería ser corregido posteriormente mediante el adecuado coeficiente de corrección total.

B.4. Medida de la distribución espacial de la radiancia

Los dispositivos vistos hasta este momento realizan medidas a lo largo de todo el espectro de la irradiancia incidente sobre un plano concreto, normalmente el horizontal. En esta sección se describen los dispositivos que permiten la medida de la distribución angular de la radiancia en la bóveda celeste. Cabe destacar que son dispositivos poco comunes en la mayor parte de las estaciones radiométricas debido a su complejidad y coste, pero poco a poco su uso se va extendiendo por la necesidad de una estimación más precisa de la irradiancia incidente en superficies de cualquier clase.

Uno de los principales problemas que se presentan a la hora de la medida de la distribución



Figura B.5: Dispositivo Delta-T. Fuente: [Wood, 2002].

espacial de la radiancia es que, o se precisa de una gran cantidad de sensores, o el tiempo de escaneo de la cúpula celeste es prolongado.

B.4.1. Escáner de cielo

El escáner de cielo, más popularmente conocido por su denominación en inglés *"skyscanner"*, se compone de un sistema robotizado sobre el cual se instala un pirheliómetro y un fotómetro. La plataforma robotizada realiza barridos completos del cielo para que ambos sensores tomen las medidas necesarias. De acuerdo a la norma CIE 108-1994 [CIE, 1994], la cúpula celeste se ha de dividir en 145 sectores, que abarquen aproximadamente el mismo ángulo sólido, y el escaneo debe ejecutarse en espiral. Así mismo, el ángulo de apertura de los sensores debe ser inferior a 15º.

La figura B.6(a) muestra un dispositivo comercial de este tipo, mientras que la figura B.6(b) es un ejemplo de la medida obtenida con el sistema.

B.4.2. Sensor estático

Como su propio nombre indica, este dispositivo sustituye el sistema robotizado que orienta los sensores del escáner de cielo, por un mayor número de sensores colocados sobre una

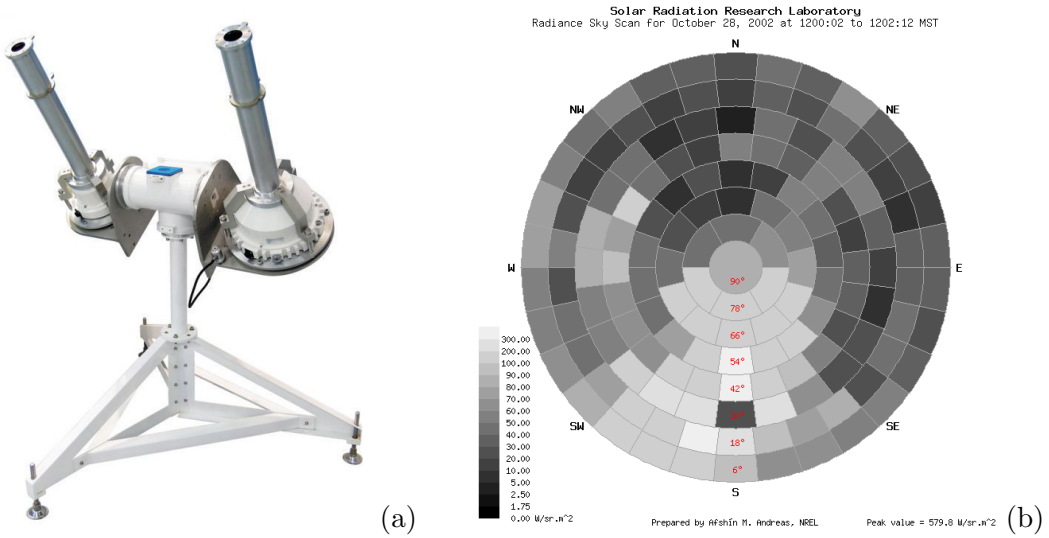


Figura B.6: Escáner de cielo. (a) Dispositivo equipado con espectroradiómetro y fotómetro montados sobre seguidor a dos ejes. (b) Resultado de un escaneo completo. Fuente: [EKO, 2015].

esfera, de forma que cada sensor puede recoger la información de cada punto o sector del cielo. Instrumentos de este tipo, como el *"Solar-Igel"* que se muestra en la figura B.7, posee 135 sensores fotosensibles distribuidos en una orientación radial según la configuración propuesta en [Appelbaum and Bergshtein, 1987] que minimiza el solapamiento y las áreas ciegas [University of Paderborn, 2011]. La existencia de puntos ciegos, junto con el coste y las limitaciones geométricas impuestas por un elevado número de sensores, son los principales inconvenientes de estos dispositivos. Sin embargo, su gran ventaja reside en que pueden realizar un escaneo completo de forma instantánea (salvo el tiempo de procesamiento de la señales y la capacidad de saturación del procesador).

B.4.3. Cámara de cielo

La cámara de cielo, como la mostrada en la figura B.8, es otro dispositivo estático que permite la medida de la distribución angular de la radiancia para un instante determinado. Este sistema consta de un ojo de pez que cubre un ángulo sólido de 2π sr y que refleja dicha radiación sobre un sensor fotosensible digital o célula CCD (*"Charged Coupled Device"*). Para evitar la saturación de la cámara y la región circunsolar, suele añadirse un disco de sombra motorizado que oculta el disco Solar. La determinación de los valores de irradiancia se obtiene mediante el análisis computacional de las imágenes obtenidas. La precisión, por lo tanto, depende en gran medida de la resolución de la cámara empleada, la configuración de la matriz en el dispositivo CCD y el espectro de sensibilidad del mismo.



Figura B.7: Sensor estático Solar Igel. Fuente: [University of Paderborn, 2011].



Figura B.8: Cámara de cielo EKO SRF All-Sky Camera. Fuente: [EKO, 2015].

B.5. Fuentes de error

De forma general, se puede definir el error de medición como la diferencia entre el valor obtenido y el valor real de la magnitud de medida [Sanchís, 1999]. En cualquier procedimiento de medición existen errores, algunos de los cuales son sistemáticos, mientras que otros son inherentes al equipo empleado. Esto da lugar a una clasificación general de los errores en sistemáticos y accidentales. Los errores sistemáticos son aquellos que siempre se reproducen y además en un mismo sentido. Se deben a un vicio del aparato de medida o a una tendencia errónea de la persona encargada de realizar la medición. Los errores accidentales, en cambio, están motivados por causas no cuantificables y no controlables. Este tipo de errores no son evitables, aunque se pueden nivelar y tratar mediante procedimientos estadísticos.

En la medida de la irradiancia solar los errores más comunes provienen de los propios sensores por su construcción [Vignola et al., 2012], pudiéndose clasificar en los siguientes tipos o clases:

- **Respuesta coseno:** es la dependencia de la respuesta del sensor al ángulo de incidencia de la radiancia. Cuanto mayor sea el ángulo (por ejemplo, al amanecer o al atardecer, en un sensor horizontal), mayor es este error. Éste suele ser el error más común y la causa de despreciar observaciones correspondientes a un ángulo cenital del Sol superior a 85º.

- **Respuesta acimutal:** es debida a imperfecciones en la cúpula del sensor. Es un error inherente a la fabricación del sensor con un porcentaje similar al de la respuesta coseno.

- **Respuesta a la temperatura:** algunos piranómetros incorporan dispositivos para el control de la temperatura, tales como escudos térmicos, ventiladores y cúpulas dobles. De esta forma mantienen la temperatura del sensor estable y próxima a las condiciones de calibración. En caso de carecer de estos sistemas, se pueden producir fluctuaciones en las medidas.

- **Selectividad espectral:** depende de la absortancia espectral del recubrimiento negro del sensor y de la transmisividad espectral de la cúpula. El efecto combinado genera errores en las medidas.

- **Estabilidad de la medida:** normalmente los sensores poseen un alto nivel de estabilidad, es decir, no sufren cambios en la sensibilidad ante la degradación o deterioro de las células, siendo la variación normalmente inferior al 1 % al año para la escala completa de medida.

- **No linealidad:** es una función del nivel de irradiancia y caracteriza la desviación respecto al comportamiento lineal del sensor. Se determina como la variación de la sensibilidad a 500 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$ en el rango de 100 a 1 000 $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$.

Además, existe otra fuente de errores de tipo operacional, siendo las causas más relevantes:

- Desalineamiento total o parcial del disco o anillo de sombra.
- Polvo, nieve, rocío u otras partículas sobre la cúpula del sensor.
- Incorrecta nivelación del sensor.
- Campos eléctricos en la proximidad de los cables.
- Cargas mecánicas en los cables (efectos piezoeléctricos).
- Posicionamiento incorrecto del escudo anti-reflejada en sensores inclinados.
- Desconexiones de la estación.
- Cálculo erróneo del factor de corrección f_c.
- Programación incorrecta de las constantes de calibración.

B.6. Calibración de piranómetros de irradiancia difusa

El procedimiento de calibración consiste en garantizar la trazabilidad a un estándar aceptado internacionalmente, en el caso de un piranómetro o un pirheliómetro, es la WRR. La calibración debe efectuarse en el mismo entorno en el que se vayan a realizar las medidas rutinarias. Numerosos autores han realizado estudios sobre la caracterización y los procedimientos de calibración de piranómetros, tanto para irradiancia global como difusa, con el objetivo de definir un procedimiento estándar para la toma de medidas en este campo [Vignola et al., 2012, Myers, 2013]. El procedimiento más extendido es el que se describe a continuación.

Una vez que se ha calibrado un piranómetro de referencia o patrón para la medida de irradiancia difusa, es posible calibrar otros piranómetros, de similares características, por comparación de las medidas tomadas, siempre y cuando se realice bajo condiciones de cielos totalmente cubiertos y nubes bajas. Aunque bajo estas condiciones no se puede garantizar una distribución completamente isótropa de la radiancia del cielo, sí es lo suficientemente uniforme como para realizar una buena calibración en campo. Además, la desviación térmica bajo estas condiciones es casi nula dado que la temperatura efectiva del cielo es próxima a la temperatura del instrumento.

Se denomina *"sensibilidad"* al cociente entre la variación en la señal de tensión de salida y la variación en el nivel de irradiacia sobre el sensor. Un piranómetro ideal tendría siempre un ratio constante, pero éste cambia con el tiempo y la exposición al Sol. Una de las razones de este cambio puede ser el deterioro de la pintura negra en el sensor. Es por ello que se requiere una calibración periódica, siendo aconsejable recalibrar los sensores al menos una vez al año, y los instrumentos de referencia o patrones, cada 2 años.

Cada sensor tiene su propia curva de sensibilidad. Ésta se determina en laboratorio por comparación con un piranómetro patrón. La calibración puede ajustarse mediante uno, dos o tres puntos en sensores con respuesta lineal, como es el caso. Cuantos más puntos de calibración se dispongan, mayor será la precisión de ésta, pero pasados los dos puntos de calibración, las mejoras en el ajuste no suelen compensar el arduo proceso para tomar puntos adicionales.

El procedimiento para la calibración por comparación en campo es el siguiente:

1. Tapar el sensor al menos 24 horas antes.
2. Medir la señal con el piranómetro tapado y estabilizado: punto de calibración (V_{p1}, V_{s1}).
3. Destapar el piranómetro y esperar a la estabilización de la señal (de 1 a 10 minutos).
4. Realizar la medición con el piranómetro a calibrar y comparar con la medida realizada con un piranómetro patrón de calidad superior: punto de calibración (V_{p2}, V_{s2}).
5. Aplicar la corrección:

$$D_c = k_{cal} D_{uc} + o_{cal} = \frac{V_{p2} - V_{p1}}{V_{s2} - V_{s1}} D_{uc} + \left(V_{p1} - \frac{V_{p2} - V_{p1}}{V_{s2} - V_{s1}} V_{s1} \right), \tag{B.2}$$

   donde D_c es la medida corregida, D_{uc} es la medida sin corregir, V_{si} es la i-ésima medida del sensor, V_{pi} es la i-ésima medida del patrón, k_{cal} es la constante de calibración [-] y o_{cal} es la ordenada en el origen, desviación u offset [$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$].

Si se dispone de un registro de trazabilidad de las calibraciones realizadas, se verifica que:

$$k_{cal,n} = \prod_{i=1}^{n} k_{cal,i}, \tag{B.3}$$

$$o_{cal,n} = \sum_{i=1}^{n} o_{cal,i}. \tag{B.4}$$

B.7. Estaciones en tierra y medidas por satélite

La medición de la irradiancia sobre la superficie terrestre puede realizarse de dos formas:

1. Tomando medidas directas en estaciones climatológicas terrestres.
2. Tomando medidas indirectas mediante datos de satélite.

La medida directa de valores de irradiancia en superficie ofrece datos de muy alta resolución y precisión para ubicaciones específicas. Sin embargo, los equipos requieren ciertas tareas de mantenimiento, tales como limpieza de los sensores de polvo, nieve, hielo... y pueden sombrearse esporádicamente por la presencia de obstáculos en el horizonte. Si no se presta atención a estos aspectos, las medidas podrían resultar no válidas [EU Commission, 2014, Rigollier et al., 2000].

Los inconvenientes anteriores pueden salvarse gracias a la transformación de medidas realizadas mediante redes de satélites, que miden en distintos anchos de banda del espectro electromagnético, la radiación reflejada por la superficie terrestre. A partir de estos datos, infieren las magnitudes correspondientes. Normalmente tienen una buena resolución temporal (las redes de satélites geoestacionarios toman instantáneas de la Tierra en intervalos de 15 a 30 minutos) y cubren toda la superficie del globo. Sin embargo, cada píxel de las imágenes digitales tomadas representa un rectángulo de varios kilómetros de lado, con lo que la medida para ubicaciones específicas debe promediarse a lo largo de amplias extensiones. Los satélites con órbitas polares ofrecen una mejor resolución espacial. Por otro lado, las medidas realizadas con satélite tienen el inconveniente de que presentan dificultades para distinguir la luz reflejada por la nieve y por las nubes. Además, cometen grandes errores en terrenos con cambios de altitud pronunciados (terrenos montañosos) y cuando la altura solar es baja [EU Commission, 2014]. Finalmente, los costes de operación y mantenimiento de la red de satélites es mucho mayor que la de estaciones en tierra.

B.8. Redes radiométricas y bases de datos de irradiancia

Existen diversas redes radiométricas públicas y privadas en todo el mundo. En España, la red radiométrica principal es la de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y se denomina Red Radiométrica Nacional. Ésta tiene como finalidad la medida de la irradiancia solar en sus diferentes componentes (global, difusa, directa y reflejada) y principales longitudes de onda (visible, infrarroja y ultravioleta). La red está compuesta por 58 estaciones repartidas a lo largo de todo el territorio español:

- 24 estaciones donde se mide radiación global, directa y difusa.
- 13 estaciones donde se mide radiación global y difusa.
- 22 estaciones donde se mide radiación infrarroja.
- 2 estaciones donde se mide radiación infrarroja directa y reflejada.
- 26 estaciones donde se mide radiación ultravioleta B (de 280 a 320 nm).
- 22 estaciones donde se mide solamente radiación global, de las cuales 21 son sensores integrados en estaciones automáticas en aeropuertos.

De estas estaciones, en Castilla y León se ubican únicamente las descritas en la tabla B.1.

Tabla B.1: Estaciones radiométricas de la AEMET en Castilla y León.

ID	Provincia	Nombre	G	B	D	PR	T	HR	PL	V
2030	Soria	Soria	×	×	×	×	×	×	×	×
2331	Burgos	Villafría				×	×	×	×	×
2422	Valladolid	Valladolid (obs)	×	×	×	×	×	×	×	×
2661	León	Virgen del Camino	×	×	×	×	×	×	×	×

En la tabla B.1 G es la irradiancia global sobre el plano horizontal [W·m^{-2}], B es la irradiancia directa sobre el plano horizontal [W·m^{-2}], D es la irradiancia difusa sobre el plano horizontal [W·m^{-2}], PR es la presión barométrica [Pa], T es la temperatura ambiente [ºC], HR es la humedad relativa del ambiente [%], PL es la cantidad de agua precipitada [mm] y V es la dirección [ºN] y velocidad del viento [m·s^{-1}] promedio en el intervalo de medida. Los huecos en blanco indican que no existe el dispositivo de medida necesario en dicha estación meteorológica. Los datos medidos en estas estaciones son medias horarias y la AEMET facilita observaciones desde el año 1999 hasta la actualidad.

Las estaciones de la Red Radiométrica Nacional están equipadas con piranómetros termoeléctricos para la medida de irradiancia global y difusa, pirheliómetros para la medida de irradiancia directa, pirgeómetros para la medida de irradiancia infrarroja y piranómetros de banda ancha para la medida de irradiancia ultravioleta. Los equipos de global, directa, difusa e infrarroja están montados sobre seguidores solares automáticos.

También existen distintas bases de datos de irradiancia, tanto de estaciones en tierra como de imágenes de satélite, de acceso público o privado. Dentro de las de acceso público son destacables las de la Red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) [MAAMA, 2015], NREL-MIDC [NREL, 2015], HELIOS-IES [UPM, 2015], NASA [NASA, 2015b], SODA-Esra [MINES Paris Tech, 2015] y PVGIS [EU Commission, 2014].

Sin embargo, aunque constituyen un buen conjunto de partida para la mayoría de las aplicaciones, estos datos están restringidos a determinadas ubicaciones, de las cuales, salvo la Red SIAR, no disponen de datos precisos en Castilla y León. Su resolución temporal normalmente es de orden mensual o anual.

Por otro lado, la Comisión Internacional de Luminancia (*"Commission International de l'Éclairage"* o CIE) viene desarrollando desde el año 1991 el Programa Internacional de Medidas Lumínicas (*"International Daylight Measurement Programme"* o IDMP) con el objeto de obtener un año promedio de variables radiativas y de iluminancia (el denominado *"International Daylight Measurement Year"* o IDMY). Su actividad ha sido intensa especialmente en el Reino Unido gracias a los profesores T. Muneer y P.R. Tregenza y en Japón mediante el profesor H. Nakamura [Muneer, 2004]. Así se pueden obtener determinados datos de irradiancia e iluminancia, medidos en intervalos de tiempo entre 1 y 10 minutos en ciudades como Edimburgo, Fukuoka, Garston, Manchester o Sheffield sobre planos horizontal y verticales en las direcciones cardinales [Muneer and Gul, 2000]. Nótese que las medidas sobre plano vertical son de irradiancia e iluminancia global y no específicamente de difusa. Recientemente se van incorporando escaneos del cielo realizados mediante escáneres de cielo, como el mostrado en la sección B.6, pero dada la complejidad y coste de los equipos, sus medidas son aún escasas y muy localizadas.

Finalmente, destacar la existencia de bases de datos con registros de la cantidad de ozono y/o NO_2 en la atmósfera [Gov. of Canada, 2015, US Dep. of Energy, 2015], para poder determinar la transmisividad de la misma, o calcular su turbidez [NASA, 2015a].

Anexo C

Implementación de los modelos de transposición

C.1. Introducción

En este anexo se han incluido las particularidades de implementación de ciertos modelos de transposición. La primera sección desarrolla la demostración de que el modelo de Liu & Jordan es el resultado de un modelo de radiancia constante. A continuación se indica el procedimiento de cálculo, así como los resultados obtenidos, de los coeficientes F_{ij} del modelo de Perez et al. (descrito en el apartado 1.6.9) optimizados para Burgos (SWIFT0001). Finalmente, el anexo concluye con la descripción detallada y justificación de las configuraciones adoptadas para los modelos no paramétricos implementados.

C.2. Demostración del modelo de Liu & Jordan

Si denominamos I_{sky} a la radiancia procedente de la bóveda celeste, e I_{gr} a la radiancia reflejada, encontramos que ambas se encuentran relacionadas por la expresión:

$$I_{gr} = \frac{\rho}{k_d} I_{sky}, \tag{C.1}$$

siendo ρ la reflectancia aparente del entorno y k_d la fracción difusa horizontal.

El modelo de radiancia constante permite determinar la irradiancia difusa y reflejada sobre una superficie inclinada y orientada suponiendo que la radiancia procedente de cualquier punto de la bóveda celeste observada es constante. La figura C.1 muestra un esquema de la sección transversal aplicada a una superficie inclinada un ángulo θ_{zp} referido con la

vertical del lugar, y un ángulo γ_p respecto del plano meridiano. Dicha superficie está caracterizada por su vector director **p**, perpendicular a la misma y de módulo unitario, y un punto O coincidente con el observador. Tal y como muestra la figura, al estar la superficie inclinada, ésta observa parte de la cúpula celeste y parte del terreno circundante. Ambas secciones se encuentran delimitadas por el plano horizontal. Nótese que los ángulos indicados corresponden a un ángulo acimutal del sensor $\gamma_p = 0$, y que éstos son dependientes del ángulo acimutal γ.

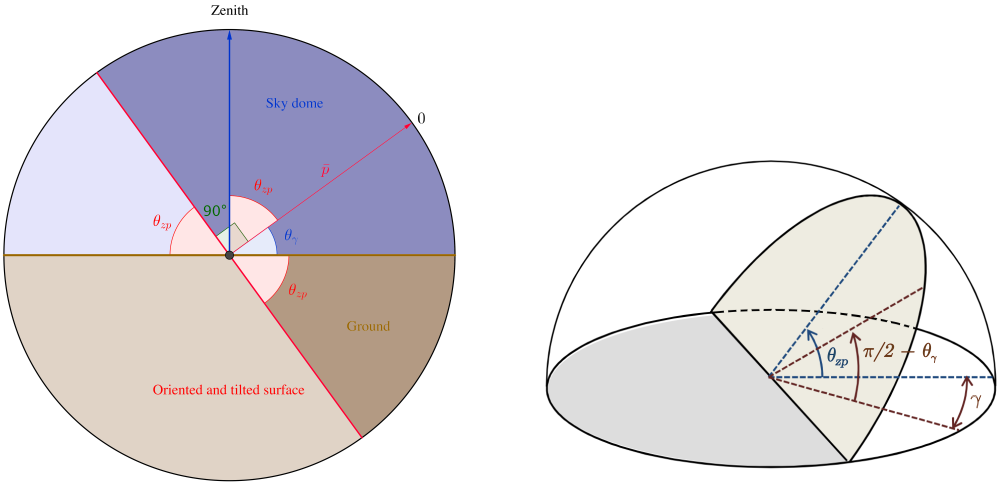


Figura C.1: Ángulos considerados para la integración de la radiancia.

Aunque la integración de la radiancia podría realizarse según las coordenadas θ y γ, definidas en base a la vertical del lugar y el plano horizontal, dado que la radiancia es constante para facilitar esta operación se realiza un cambio de base a un nuevo sistema de referencia formado por el vector **p** y el plano de estudio Π, dando lugar a las coordenadas θ' y γ'. Éstas son análogas a los ángulos cenital y acimutal respectivamente, y de esta forma: $\cos\xi_p = \cos\theta'$.

En base a lo expuesto anteriormente, y tal y como se describe en el apartado 1.5.1, la irradiancia difusa y reflejada incidente sobre el plano de estudio Π suponiendo una radiancia I constante es:

$$\begin{aligned} D(\theta_{zp},\gamma_p) + R(\theta_{zp},\gamma_p) = I_{sky}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{0}^{\theta_\gamma}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma' \\ + I_{sky}\int_{\pi/2}^{3\pi/2}\int_{0}^{\pi/2}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma' \\ + \frac{\rho}{k_d}I_{sky}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{\theta_\gamma}^{\pi/2}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma'. \end{aligned} \tag{C.2}$$

donde el límite de integración θ_γ se define como el ángulo cenital correspondiente a la

intersección de la superficie de estudio (plano definido por un vector director, de coordenadas horizontales $\mathbf{p} = (\theta_{zp}, \gamma_p)$, y el punto origen $O = (0, 0)$) con la bóveda celeste. Obsérvese que éste no toma un valor constante [Rakovec and Zakšek, 2015] sino que:

$$\sin\theta_{zp}\sin\gamma_p\sin\theta_\gamma\cos\gamma + \sin\theta_{zp}\sin\gamma_p\sin\theta_\gamma\sin\gamma + \cos\theta_{zp}\cos\theta_\gamma = 0, \tag{C.3}$$

por lo que despejando el límite de integración, este quedaría:

$$\tan\theta_\gamma = \frac{-\cos\theta_{zp}}{\sin\theta_{zp}\cos\gamma_p\cos\gamma + \sin\theta_{zp}\sin\gamma_p\sin\gamma}, \tag{C.4}$$

o si se prefiere, aplicando la equivalencia $\cos\theta_\gamma = 1/\sqrt{1+\tan^2\theta_\gamma}$, y tomando un ángulo acimutal[1] $\gamma_p = 0$:

$$\cos\theta_\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \dfrac{\cos^2\theta_\gamma}{\sin^2\theta_\gamma\cos^2\gamma}}}. \tag{C.5}$$

La resolución de la primera parte de la expresión (C.2) es:

$$\begin{aligned} I_{sky}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_0^{\theta_\gamma}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma' &= I_{sky}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\left[-\frac{\cos^2\theta'}{2}\right]_0^{\theta_\gamma} d\gamma' = \frac{I_{sky}}{2}\int_{-\pi/2}^{\pi/2} 1-\cos^2\theta_\gamma d\gamma' \\ &= \frac{I_{sky}}{2}\int_{-\pi/2}^{\pi/2} 1 - \frac{1}{1+\dfrac{\cos^2\theta_{zp}}{\sin^2\theta_{zp}\cos^2\gamma'}} d\gamma', \end{aligned}$$

donde haciendo el cambio de variable: $a = \sin^2\theta_{zp}$, o lo que es lo mismo: $1 - a = \cos^2\theta_{zp}$:

$$\begin{aligned} \frac{I_{sky}}{2}\int_{-\pi/2}^{\pi/2} 1 - \frac{1}{1+\dfrac{\cos^2\theta_{zp}}{\sin^2\theta_{zp}\cos^2\gamma'}} d\gamma' &= \frac{I_{sky}}{2}\int_{-\pi/2}^{\pi/2} 1 - \frac{1}{1+\dfrac{1-a}{a\cos^2\gamma'}} d\gamma' \\ &= \frac{I_{sky}}{2}\left[-\sqrt{1-a}\arctan\left(\tan\gamma'\sqrt{1-a}\right)\right]_{-\pi/2}^{\pi/2}. \end{aligned}$$

Nótese que $\sqrt{1-a} = \sqrt{\cos^2\theta_{zp}} = \pm\cos\theta_{zp}$. De esta forma, $\forall a = \sin^2\theta_{zp} < 1$:

$$I_{sky}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_0^{\theta_\gamma}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma' = \pm\frac{\pi I_{sky}}{2}\cos\theta_{zp}.$$

Para $a = \sin^2\theta_{zp} = 1$:

$$I_{sky}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_0^{\theta_\gamma}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma' = 0.$$

De forma análoga, la resolución de la segunda parte de la expresión (C.2) es:

$$\begin{aligned} I_{sky}\int_{\pi/2}^{3\pi/2}\int_0^{\pi/2}\cos\theta'\sin\theta' d\theta' d\gamma' &= I_{sky}\int_{\pi/2}^{3\pi/2}\left[-\frac{\cos^2\theta'}{2}\right]_0^{\pi/2} d\gamma' = \frac{I_{sky}}{2}\int_{\pi/2}^{3\pi/2} d\gamma' \\ &= \frac{I_{sky}}{2}\left[\gamma'\right]_{\pi/2}^{3\pi/2} = \frac{\pi I_{sky}}{2}. \end{aligned}$$

[1] Al ser la radiancia constante, ésta es independiente de los ángulos cenital (θ_{zp}) y acimutal (γ_p) de la superficie de estudio.

Finalmente, la resolución de la tercera parte de la expresión (C.2) es:

$$\frac{\rho}{k_d} I_{sky} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\theta_\gamma}^{\pi/2} \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\gamma' = \frac{\rho}{k_d} I_{sky} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[-\frac{\cos^2\theta'}{2} \right]_{\theta_\gamma}^{\pi/2} d\gamma' = \frac{\rho}{k_d} \frac{I_{sky}}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2\theta_\gamma d\gamma'$$
$$= \frac{\rho}{k_d} \frac{I_{sky}}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{1}{1 + \dfrac{\cos^2\theta_{zp}}{\sin^2\theta_{zp}\cos^2\gamma'}} d\gamma',$$

donde haciendo de nuevo el cambio de variable propuesto tal que: $1 - a = \cos^2\theta_{zp}$:

$$\frac{\rho}{k_d} \frac{I_{sky}}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{1}{1 + \dfrac{\cos^2\theta_{zp}}{\sin^2\theta_{zp}\cos^2\gamma'}} d\gamma' = \frac{\rho}{k_d} \frac{I_{sky}}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{1}{1 + \dfrac{1-a}{a\cos^2\gamma'}} d\gamma'$$
$$= \frac{\rho}{k_d} \frac{I_{sky}}{2} \left[\gamma' + \sqrt{1-a} \arctan\left(\tan\gamma' \sqrt{1-a} \right) \right]_{-\pi/2}^{\pi/2}.$$

De esta forma, $\forall a = \sin^2\theta_{zp} < 1$:

$$\frac{\rho}{k_d} I_{sky} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\theta_\gamma}^{\pi/2} \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\gamma' = \frac{\rho}{k_d} \frac{\pi I_{sky}}{2} (1 \pm \cos\theta_{zp}).$$

Para $a = \sin^2\theta_{zp} = 1$:

$$\frac{\rho}{k_d} I_{sky} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\theta_\gamma}^{\pi/2} \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\gamma' = \frac{\rho}{k_d} \frac{\pi}{2}.$$

Así se demuestra que, $\forall a = \sin^2\theta_{zp} < 1$:

$$D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p) = \pi I_{sky} \frac{1 \pm \cos\theta_{zp}}{2} + \frac{\rho}{k_d} \pi I_{sky} \frac{1 \pm \cos\theta_{zp}}{2}, \tag{C.6}$$

y para $a = 1$:

$$D(\pi/2, \gamma_p) + R(\pi/2, \gamma_p) = I_{sky} \frac{\pi}{2} + \frac{\rho}{k_d} I_{sky} \frac{\pi}{2}. \tag{C.7}$$

Para que la expresión (C.6) verifique el caso horizontal, en el que $R(0) = 0$, el criterio de signos ha de ser:

$$D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p) = \pi I_{sky} \frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2} + \frac{\rho}{k_d} \pi I_{sky} \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}, \tag{C.8}$$

Queda demostrado así que, bajo la hipótesis de radiancia constante, se verifica que:

$$R_d = \frac{D(\theta_{zp}, \gamma_p)}{D(0)} = \frac{1 + \cos\theta_{zp}}{2}, \tag{C.9}$$

y

$$R_r = \frac{R(\theta_{zp}, \gamma_p)}{\rho G(0)} = \frac{1 - \cos\theta_{zp}}{2}. \tag{C.10}$$

C.3. Coeficientes F_{ij} óptimos locales del modelo de Perez et al. para Burgos

En la evaluación del modelo de Perez et al. (1990), a parte de utilizar los coeficientes propuestos por el autor, y que están recogidos en la tabla 1.1, se han calculado los coeficientes F_{ij} óptimos para Burgos (42.351ºN, −3.688ºE, 857 m.s.n.m.), con el ánimo de comprobar si, de esta forma, se observan mejoras significativas en el comportamiento del modelo. Para su cálculo se ha aplicado el siguiente procedimiento:

1. Para el conjunto de datos de entrenamiento se calculan los parámetros:
   - Índice de claridad de Perez (ε) según la ecuación (3.12).
   - Luminosidad o brillo celeste (Δ) según la ecuación (3.13).
   - Masa óptica relativa de aire (m) según la ecuación (A.14).
   - Ángulo cenital (θ_{zs}) según la ecuación (A.29).
2. Se divide el conjunto de datos en 8 intervalos para el valor de ε, tal y como muestra la tabla 1.1, y que se deben a los diferentes tipos de cielo que este autor reconoce en su estudio.
3. Para cada uno de los intervalos anteriores se realiza un ajuste por regresión múltiple, garantizando que el valor absoluto de los residuos studentizados de la regresión sean inferiores o iguales a 2 y se verifiquen las condiciones de normalidad y homocedasticidad. Para realizar la regresión, se reorganiza la expresión (1.69) en la forma:

$$R_d - \frac{1+\cos\theta_{zp}}{2} = \left(R_b - \frac{1+\cos\theta_{zp}}{2}\right) F_1 + \sin\theta_{zp} F_2, \tag{C.11}$$

donde por simplicidad, renombramos a $R_d-(1+\cos\theta_{zp})/2 = y$, $R_b-(1+\cos\theta_{zp})/2 = a_0$ y $\sin\theta_{zp} = a_1$, quedando entonces la expresión anterior:

$$y = a_0 F_1 + a_1 F_2. \tag{C.12}$$

De acuerdo a las expresiones (1.71) y (1.72), esta ecuación la podemos expresar como:

$$y = a_0 \,\text{máx}\left(b_0 + \Delta b_1 + \theta_{zs} b_2, 0\right) + a_1 \left(b_3 + \Delta b_4 + \theta_{zs} b_5\right), \tag{C.13}$$

o si se prefiere, reordenando términos:

$$y = (b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_0\Delta \\ a_0\theta_{zs} \\ a_1 \\ a_1\Delta \\ a_1\theta_{zs} \end{pmatrix} = \mathbf{b}\cdot\mathbf{x}, \forall(b_0 + \Delta b_1 + \theta_{zs} b_2) \geq 0. \tag{C.14}$$

Los términos del vector **b** corresponden a los coeficientes F_{ij} que se desean calcular. Para ello se efectúa la regresión de **y** sobre **x** mediante ajuste por mínimos cuadrados.

Dadas las características del procedimiento de cálculo empleado, la expresión (1.71) del modelo debe modificarse a:

$$F_1 = F_{11} + \Delta F_{12} + \theta_{zs} F_{13}. \tag{C.15}$$

Las tablas C.1, C.2, C.3 y C.4 incluyen los coeficientes resultantes de la optimización para la localización de estudio y cada una de las direcciones cardinales. La columna encabezada como n indica el número de datos empleados. Las figuras C.2, C.3, C.4 y C.5 muestran los diferentes resultados de aplicar el modelo con los coeficientes originales a utilizar los optimizados.

Tabla C.1: Coef. optim. para el modelo de Perez et al. plano vertical Norte.

ε	$\mathbf{F_{11}}$	$\mathbf{F_{12}}$	$\mathbf{F_{13}}$	$\mathbf{F_{21}}$	$\mathbf{F_{22}}$	$\mathbf{F_{23}}$	**n**
$[1.000, 1.065)$	4.9162	0.1700	−3.3044	2.5337	−0.2041	−1.6493	2 529
$[1.065, 1.230)$	3.6704	−0.8449	−2.1940	1.8100	−0.8878	−0.9287	461
$[1.230, 1.500)$	26.0119	−15.5762	−15.3389	12.9858	−8.3944	−7.4305	294
$[1.500, 1.950)$	8.1197	−1.6223	−5.1510	4.0352	−1.4660	−2.2592	287
$[1.950, 2.800)$	14.2622	−4.7962	−9.2914	7.0663	−3.4007	−4.1360	362
$[2.800, 4.500)$	−11.5172	−2.1111	7.9667	−5.7005	−3.7316	4.7829	407
$[4.500, 6.200)$	−29.1294	83.0965	12.2495	−14.2495	−11.4740	−1.4021	344
$[6.200, \infty)$	0.0000	0.0000	0.0000	0.7774	−16.3996	1.8531	352

Tabla C.2: Coef. optim. para el modelo de Perez et al. plano vertical Sur.

ε	$\mathbf{F_{11}}$	$\mathbf{F_{12}}$	$\mathbf{F_{13}}$	$\mathbf{F_{21}}$	$\mathbf{F_{22}}$	$\mathbf{F_{23}}$	**n**
$[1.000, 1.065)$	0.0258	0.5152	−0.0965	−0.0476	0.4633	−0.0596	2 353
$[1.065, 1.230)$	0.2677	0.2685	−0.1231	0.2750	−0.1962	−0.0905	319
$[1.230, 1.500)$	0.0966	0.2392	0.0511	0.5476	−0.9859	−0.0698	253
$[1.500, 1.950)$	0.6628	0.0354	−0.3033	0.4057	−1.0153	0.1047	311
$[1.950, 2.800)$	0.8308	0.1800	−0.4493	0.4590	−1.8045	0.3043	306
$[2.800, 4.500)$	0.6564	0.5086	−0.2940	0.1460	−0.3735	−0.0337	467
$[4.500, 6.200)$	−2.2645	7.2689	1.2381	0.2611	−2.8320	0.5583	210
$[6.200, \infty)$	−6.3986	−1.1998	6.2560	2.0019	−5.7962	−0.9248	346

Tabla C.3: Coef. optim. para el modelo de Perez et al. plano vertical Este.

ε	$\mathbf{F_{11}}$	$\mathbf{F_{12}}$	$\mathbf{F_{13}}$	$\mathbf{F_{21}}$	$\mathbf{F_{22}}$	$\mathbf{F_{23}}$	**n**
$[1.000, 1.065)$	-0.1801	0.6737	0.0650	-0.0359	0.1607	0.0560	2 533
$[1.065, 1.230)$	0.7597	0.1483	-0.4324	0.4356	-0.5023	-0.0856	382
$[1.230, 1.500)$	1.2882	-0.0235	-0.7758	0.6942	-0.5323	-0.2778	259
$[1.500, 1.950)$	1.5962	-0.3800	-0.8843	0.8935	-0.7547	-0.3489	198
$[1.950, 2.800)$	1.7237	-1.2441	-0.7659	0.9132	-1.7646	0.0144	358
$[2.800, 4.500)$	2.7837	-6.4281	-0.9458	1.1751	-6.5760	0.2677	446
$[4.500, 6.200)$	2.8265	-9.5151	-1.0141	1.1346	-7.9869	1.0231	422
$[6.200, \infty)$	1.7574	-7.9710	-0.3404	0.9010	-8.4128	1.0149	398

Tabla C.4: Coef. optim. para el modelo de Perez et al. plano vertical Oeste.

ε	$\mathbf{F_{11}}$	$\mathbf{F_{12}}$	$\mathbf{F_{13}}$	$\mathbf{F_{21}}$	$\mathbf{F_{22}}$	$\mathbf{F_{23}}$	**n**
$[1.000, 1.065)$	0.0003	0.4051	-0.0396	0.2052	0.0605	-0.1884	2 593
$[1.065, 1.230)$	0.4545	0.1915	-0.2509	0.4405	-0.3437	-0.2085	409
$[1.230, 1.500)$	0.7273	0.0114	-0.3426	0.4332	-0.5256	-0.0766	270
$[1.500, 1.950)$	0.7307	-0.0585	-0.3044	0.3355	-0.4402	0.0525	234
$[1.950, 2.800)$	0.9867	-0.5006	-0.5066	0.5221	-1.2777	0.1064	321
$[2.800, 4.500)$	0.1030	6.3977	-1.1165	0.1878	-0.1709	0.2044	394
$[4.500, 6.200)$	-1.3807	17.8185	-0.8820	-1.0179	1.8237	1.3093	393
$[6.200, \infty)$	-3.8425	35.8095	-0.2569	-1.2171	9.5899	0.5050	274

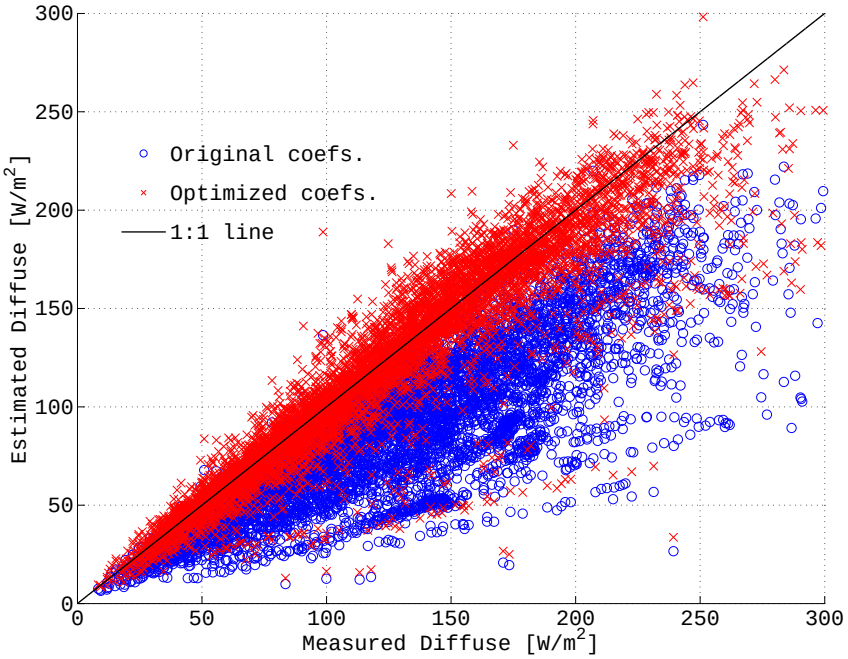


Figura C.2: Modelo con coeficientes genéricos respecto óptimos locales (Norte).

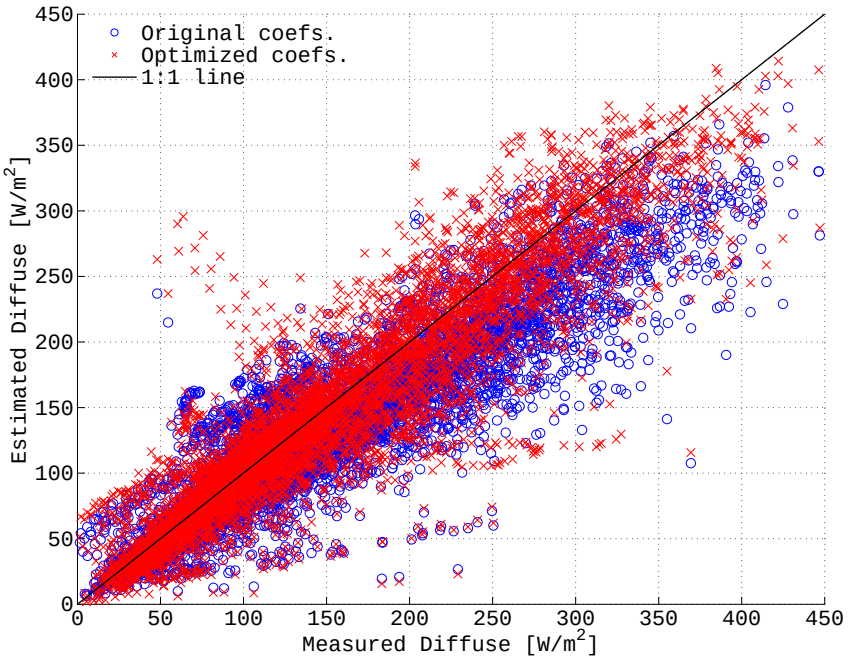


Figura C.3: Modelo con coeficientes genéricos respecto óptimos locales (Sur).

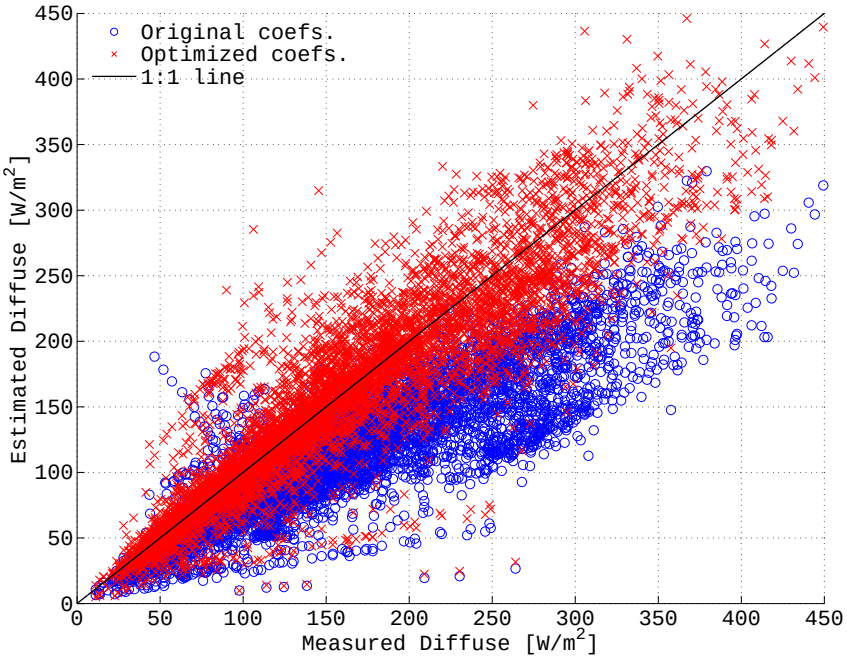


Figura C.4: Modelo con coeficientes genéricos respecto óptimos locales (Este).

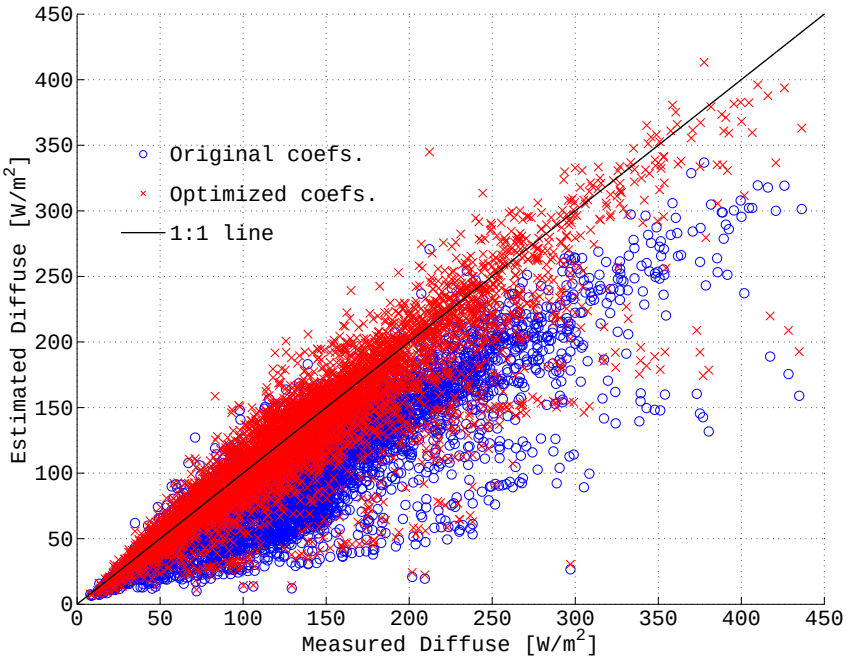


Figura C.5: Modelo con coeficientes genéricos respecto óptimos locales (Oeste).

C.4. Configuración del modelo MLP

La configuración del modelo Perceptrón multicapa (MLP) se resume en la tabla C.6. Para caracterizar la red, deben definirse los parámetros de entrada que se van a utilizar, para lo cual se ha ejecutado previamente el siguiente algoritmo:

1. Se ha seleccionado un conjunto de parámetros de entrada candidatos:
   - Ángulo acimutal del piranómetro (γ_p).
   - Declinación solar (δ_s).
   - Ángulo horario de la posición del Sol (ω_s).
   - Ángulo cenital de la posición del Sol (θ_{zs}).
   - Ángulo acimutal de la posición del Sol (γ_s).
   - Ángulo entre la posición del Sol y el sensor (θ_{sp}).
   - Irradiancia solar extraterrestre horizontal ($B_{ext}(0)$).
   - Irradiancia global horizontal ($G(0)$).
   - Irradiancia difusa horizontal ($D(0)$).
   - Irradiancia directa horizontal ($B(0)$).
   - Irradiancia de albedo según modelo isótropo ($R(\theta_{zp}) = \rho G(0)(1 + \cos\theta_{zp})/2$).
2. Se definen sendos conjuntos de entrenamiento y validación.
3. Se realiza un análisis preliminar de los resultados de la red estudiando el valor de la diferencia cuadrática media (RMSD) obtenida en C_n^k modelos, con $k \in \{1, 2, 3, 4\}$, siendo n el número de parámetros candidatos y k el número de parámetros de entrada del modelo.
4. Se escoge la configuración que ofrece menor valor de RMSD en los conjuntos de entrenamiento y validación (véase la tabla C.5).
5. Para la optimización del número de neuronas de la capa oculta del modelo se ha analizado estadísticamente.

Para la determinación del número óptimo de neuronas que debe poseer la capa oculta de un modelo no paramétrico MLP, se ha aplicado el *"Método Estadístico de Monte Carlo"*. Éste consiste en analizar el promedio de los resultados obtenidos por n muestras independientes, siendo $n > 30$. En este caso, se ha tomado $n = 100$.

Cada muestra se ha obtenido a partir de dividir aleatoriamente (según una distribución normal) el conjunto de datos de evaluación en tres conjuntos: entrenamiento, validación

Tabla C.5: Selección de parámetros de entrada en el modelo MLP.

k	n	Modelos	Mejor combinación	$\mathbf{RMSD}_{tr}$ [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	$\mathbf{RMSD}_{ck}$ [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]
1	11	11	$G(0)$	53.1199	52.1286
2	11	55	$[G(0), D(0)]$	18.1415	18.7425
3	11	165	$[G(0), D(0), \theta_{sp}]$	17.9863	18.0933
4	11	330	$[G(0), D(0), \theta_{sp}, R(\theta_{zp})]$	15.2569	15.3846

Tabla C.6: Configuración adoptada del modelo MLP.

Parámetro	Valor
Variables de entrada	Tras el análisis de variables realizado, se decide que las variables de entrada sean: ▪ p_1: Irradiancia difusa horizontal ($D(0)$). ▪ p_2: Irradiancia global horizontal ($G(0)$). ▪ p_3: Ángulo entre la posición del Sol y el piranómetro (θ_{sp}). ▪ p_4: Irradiancia reflejada ($R(\theta_{zp})$).
Variables de salida	a: Irradiancia difusa y reflejada sobre el plano $[D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p)]$.
Función de activación	Función logística.
Número de capas ocultas	1 (optimizado).
Neuronas en la capa oculta	1-5 (optimizado).
Algoritmo de entrenamiento	Levenberg-Marquardt (optimizado).
Épocas de entrenamiento	$epoch = 100$.
Tolerancia	$e = 0.001$.

y prueba. El conjunto de entrenamiento recoge el 80 % de los datos y, como su propio nombre indica, permite el entrenamiento supervisado de la red neuronal, la cual es ajustada mediante el método de propagación hacia atrás analizando las diferencias obtenidas en el conjunto de validación, que recoge otro 10 % de los datos. Finalmente, la red entrenada es evaluada mediante su rendimiento ante un conjunto de test o prueba, que recopila el 10 % de los datos restantes.

Todo el procedimiento se ha realizado para un número de neuronas $k \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$, obteniendo los resultados mostrados en las tablas C.7, C.8, C.9 y C.10 para cada orientación.

Los parámetros estadísticos empleados para la evaluación de la bondad de cada modelo son; MBD, RMSD y $\mu_{0.99}$, cuya descripción se encuentra en las expresiones (D.22), (D.23) y (9.3) respectivamente.

Tabla C.7: Análisis de Monte Carlo del modelo MLP (Norte).

Neuronas	**MBD** $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$	**RMSD** $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$	$\mu_{\mathbf{0.99}}$ $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$
1	0.0195 (2)	16.5924 (3)	−0.0261 (2)
2	0.1590 (5)	16.5145 (5)	0.2325 (5)
3	0.1576 (4)	17.1873 (4)	0.1836 (4)
4	0.0110 (1)	14.7713 (1)	−0.0134 (1)
5	0.0947 (3)	16.3306 (2)	0.1615 (3)

Tabla C.8: Análisis de Monte Carlo del modelo MLP (Sur).

Neuronas	**MBD** $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$	**RMSD** $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$	$\mu_{\mathbf{0.99}}$ $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$
1	0.3575 (3)	11.8426 (1)	0.4677 (3)
2	0.7650 (5)	20.1082 (5)	0.9604 (5)
3	0.2267 (1)	15.9359 (2)	0.3456 (1)
4	0.4229 (4)	18.6710 (4)	0.5688 (4)
5	0.3037 (2)	17.8766 (3)	0.4368 (2)

Tabla C.9: Análisis de Monte Carlo del modelo MLP (Este).

Neuronas	**MBD** $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$	**RMSD** $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$	$\mu_{\mathbf{0.99}}$ $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$
1	0.2490 (4)	9.6414 (1)	0.2785 (4)
2	−0.0500 (1)	19.1843 (5)	−0.0753 (1)
3	0.4228 (5)	17.2119 (2)	0.5448 (5)
4	0.1793 (3)	17.4036 (3)	0.2269 (3)
5	0.1064 (2)	18.1956 (4)	0.1732 (2)

Así, se obtiene que en base al estadístico $\mu_{0.99}$, el número óptimo de neuronas para un

Tabla C.10: Análisis de Monte Carlo del modelo MLP (Oeste).

Neuronas	**MBD** [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	**RMSD** [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]	$\mu_{\mathbf{0.99}}$ [$\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}$]
1	0.0364 (1)	22.7978 (5)	0.0145 (1)
2	0.1010 (2)	15.1654 (2)	0.1340 (2)
3	0.2505 (5)	14.2247 (1)	0.3552 (4)
4	0.2480 (4)	16.8809 (3)	0.3594 (5)
5	0.1685 (3)	17.0050 (4)	0.2299 (3)

modelo tipo MLP con una sola capa oculta es de 4 para la orientación Norte, 3 para la orientación Sur, 2 para la orientación Este y 1 para la orientación Oeste. Si se desea determinar el número óptimo de neuronas para el conjunto de las cuatro orientaciones, se recomienda emplear el procedimiento de agragación no paremétrica de clasificaciones descrito en el apartado 9.2.3. Para este caso y, para cada uno de los indicadores estadísticos analizados, se muestra la clasificación obtenida en las tablas C.11, C.12 y C.13.

De acuerdo a las clasificaciones globales obtenidas, se observa que la mejor configuración correspondería a 1, 5 ó 3 neuronas, y la peor a 2 ó 4 neuronas en la capa oculta.

Tabla C.11: Clasificación de modelos MLP para cualquier orientación en base a MBD.

Or./Neur.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Norte	2	5	4	1	3
Sur	3	5	1	4	2
Este	4	1	5	3	2
Oeste	1	2	5	4	3
Clas. (0.001)	1,2	4	5	3	2,1

Tabla C.12: Clasificación de modelos MLP para cualquier orientación en base a RMSD.

Or./Neur.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Norte	3	5	4	1	2
Sur	1	5	2	4	3
Este	1	5	2	3	4
Oeste	5	2	1	3	4
Clas. (0.001)	2	5	1	3	4

Tabla C.13: Clasificación de modelos MLP para cualquier orientación en base a $\mu_{0.99}$.

Or./Neur.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Norte	2	5	4	1	3
Sur	3	5	1	4	2
Este	4	1	5	3	2
Oeste	1	2	4	5	3
Clas. (0.001)	1,2	3,4	5	4,3	2,1

C.5. Configuración del modelo RBF

La configuración particular adoptada del modelo RBF se muestra en la tabla C.14. Para caracterizar la red, deben definirse los parámetros de entrada que se van a utilizar, para lo cual se ha ejecutado previamente el mismo algoritmo que el descrito en la sección C.4.

Tabla C.14: Configuración adoptada del modelo RBF.

Parámetro	**Valor**
Variables de entrada	Tras la aplicación de un análisis de sensibilidad, se decide que las variables de entrada sean: ▪ p_1: Irradiancia difusa horizontal ($D(0)$). ▪ p_2: Irradiancia global horizontal ($G(0)$). ▪ p_3: Ángulo entre la posición del Sol y el piranómetro (θ_{sp}). ▪ p_4: Irradiancia reflejada ($R(\theta_{zp})$).
Variables de salida	a: Irradiancia difusa y reflejada sobre el plano ($D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p)$).
Función de activación	Función logística.
Número de capas	2.
Neuronas de base radial	150 (optimizado).
Algoritmo de entrenamiento	Regularización bayesiana (optimizado).
Tolerancia	$e = 0.001$.

C.6. Configuración del modelo GRNN

La configuración del modelo GRNN realizada se muestra en la tabla C.15. Para caracterizar la red, deben definirse los parámetros de entrada que se van a utilizar y el margen o dispersión máxima σ. Su definición se ha realizado aplicando el algoritmo de configuración propuesto en la sección C.4.

Tabla C.15: Configuración adoptada del modelo GRNN.

Parámetro	**Valor**
Variables de entrada	Tras la aplicación de un análisis de sensibilidad, se decide que las variables de entrada sean: ▪ p_1: Irradiancia difusa horizontal ($D(0)$). ▪ p_2: Irradiancia global horizontal ($G(0)$). ▪ p_3: Ángulo entre la posición del Sol y el piranómetro (θ_{sp}). ▪ p_4: Irradiancia reflejada ($R(\theta_{zp})$).
Variables de salida	a: Irradiancia difusa y reflejada sobre el plano ($D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p)$).
Sesgo	$\sigma = 0.9\,\text{máx}(\bar{d}_i)$. Siendo d_i la distancia entre valores del estimador i-ésimo.

C.7. Configuración del modelo ANFIS

Uno de los aspectos fundamentales para el correcto diseño de una red ANFIS es la selección de las variables de entrada de la red. Para tomar un criterio objetivo, se ha seguido el siguiente procedimiento, descrito en [Jang et al., 1997]:

1. Se ha seleccionado un conjunto de parámetros de entrada candidatos análogos a los mostrados en la sección C.4.
2. Se definen sendos conjuntos de entrenamiento y validación.
3. Se realiza un análisis preliminar de los resultados de la red ANFIS con los siguientes parámetros:
   - Número de épocas: $epoch = 1$.

- Número de conjuntos borrosos para cada variable: $m = 3$.
- Número de reglas: $r = n^m$.

4. Se evalúa el paso anterior estudiando el valor de RMSD obtenido para C_n^k modelos, con $k \in \{1, 2, 3, 4\}$, siendo n el número de parámetros candidatos y k el número de parámetros de entrada del modelo.

5. Se escoge la configuración que ofrece menor valor de RMSD en los conjuntos de entrenamiento y validación.

Los resultados obtenidos de este análisis se muestran en la tabla C.16.

Tabla C.16: Selección de parámetros de entrada en el modelo ANFIS.

k	n	Modelos	Mejor combinación	$\mathbf{RMSD}_{tr}$ $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$	$\mathbf{RMSD}_{ck}$ $[\mathbf{W{\cdot}m^{-2}}]$
1	11	11	$G(0)$	32.8009	32.1826
2	11	55	$[G(0), D(0)]$	26.1318	26.7542
3	11	165	$[G(0), D(0), \theta_{sp}]$	21.4569	22.3309
4	11	330	$[G(0), D(0), \theta_{sp}]$	17.5360	17.8718

Se puede observar en la tabla C.16 que, de forma significativa el mejor valor de RMSD se obtiene tomando 3 parámetros de entrada: $G(0)$, $D(0)$ y θ_{sp}.

Finalmente, la configuración del modelo ANFIS realizada se muestra en la tabla C.17.

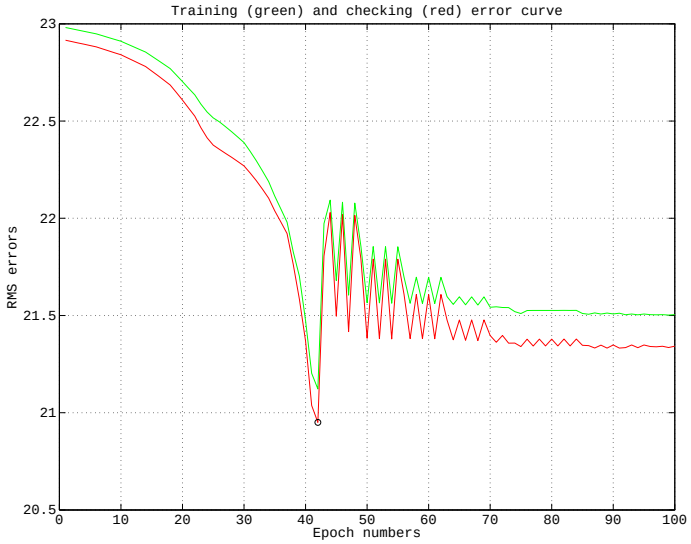


Figura C.6: Evaluación del error en el entrenamiento de la red ANFIS.

Tabla C.17: Configuración adoptada del modelo ANFIS.

Parámetro	**Valor**
Variables de entrada	Tras la aplicación de un análisis de sensibilidad por búsqueda exhaustiva (véase el párrafo C.7): ▪ p_1: Irradiancia difusa horizontal ($D(0)$). ▪ p_2: Irradiancia global horizontal ($G(0)$). ▪ p_3: Ángulo entre el Sol y el sensor (θ_{sp}).
Variables de salida	a: Irradiancia difusa y reflejada sobre el plano ($D(\theta_{zp}, \gamma_p) + R(\theta_{zp}, \gamma_p)$).
Subconjuntos definidos	$\mathcal{A}_{i,1}$ = Bajo, $\mathcal{A}_{i,2}$ = Medio, $\mathcal{A}_{i,3}$ = Alto.
Funciones de pertenencia	Campana generalizada.
Definición de reglas	El particionamiento en red del espacio de entradas genera $3^3 = 27$ reglas.
Épocas de entrenamiento	$epoch = 42$ (optimizado, véase la figura C.6).

Anexo D

Técnicas estadísticas

D.1. Introducción

En este anexo se describen distintos fundamentos estadísticos utilizados a lo largo del desarrollo de la Tesis. La primera sección detalla cómo se ha realizado la validación cruzada indicada en aquellos modelos que precisan de etapas de entrenamiento y/o que dependen del conjunto de datos de evaluación. A continuación, se indica el proceso de análisis de los residuos, diferenciando los distintos tipos e indicando el significado de los resultados. La cuarta sección del anexo aborda el procedimiento general del cálculo de incertidumbres de medida, eminéntemente estadístico. Finalmente, la última sección contiene las definiciones de los índices estadísticos empleados para la evaluación del rendimiento de los distintos modelos implementados.

D.2. Validación cruzada

Esta técnica permite la evaluación de modelos que precisan de entrenamiento, y consiste en calcular la media aritmética de las índices de rendimiento sobre diferentes particiones de entrenamiento y prueba. En la variante tomada de k iteraciones, los datos de muestra se dividen en k subconjuntos. Uno de los subconjuntos se utiliza como datos de prueba o test y el resto, $k-1$, como datos de entrenamiento. El proceso de validación cruzada es repetido durante k iteraciones, tomando cada vez cada uno de los posibles subconjuntos de prueba. Finalmente se realiza la media aritmética de los resultados de cada iteración para obtener un único resultado. Este método se considera muy preciso, pero requiere un alto coste computacional. Normalmente se toma $k = 10$, es decir, el subconjunto de prueba en cada caso es un décimo del conjunto total, tomando el resto como datos de entrenamiento.

D.3. Análisis de los residuos

Los residuos generados por las estimaciones de un modelo respecto de los valores observados pueden clasificarse en:

Residuo ordinario: es la diferencia entre el valor estimado y el valor observado:

$$r_{o,i} = \hat{y}_i - y_i, \tag{D.1}$$

siendo $\hat{y}_i$ la respuesta del modelo e y_i el valor observado asociado. La definición se realiza en este sentido puesto que normalmente, tal y como se indica en la mayor parte de la bibliografía, se consideran las medidas tomadas de mejor calidad que las estimaciones del modelo. Esto no siempre es así, pues en numerosas ocasiones se emplea un modelo para evaluar la validez de las medidas tomadas y detectar errores de funcionamiento o de calibración del instrumento utilizado [Badescu, 2008].

El i-ésimo residuo e_i es una variable aleatoria continua que tiene las siguientes propiedades:

- Esperanza: $E(r_{o,i}) = 0$.
- Varianza: $Var(r_{o,i}) = s^2(r_{o,i}) = s_r^2(1 - h_{ii}), \forall i \in \{1, 2, \ldots, n\}$,

siendo h_{ii} la ventaja del valor y s_r la desviación estándar del residuo ordinario o varianza residual:

$$s_r^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{j=1}^{n} r_{o,j}^2, \tag{D.2}$$

donde m es el número de parámetros del modelo. Además, bajo la hipótesis de normalidad se obtiene que:

$$r_{o,i} \approx N[0, s^2(1 - h_{ii})], \forall i \in \{1, 2, \ldots, n\}. \tag{D.3}$$

Residuo estandarizado: como s_r^2 no es constante, es costoso identificar las estimaciones con residuos grandes. Para ello se suele tipificar, obteniendo así los residuos estandarizados definidos como:

$$r_{n,i} = \frac{r_{o,i}}{s_r \sqrt{1 - h_{ii}}}, \forall i \in \{1, 2, \ldots, n\}. \tag{D.4}$$

Al tipificar, los residuos estandarizados tienen media 0 y varianza próxima a 1, lo que permite distinguir residuos grandes, y por lo tanto, detectar valores atípicos o *"outliers"*. Normalmente se considera que un dato es atípico si tiene un residuo estandarizado mayor que 2. Cuanto mayor es el residuo estandarizado más atípico es el dato considerado. La detección de valores atípicos resulta de vital importancia para la realización de ajustes de regresión válidos.

Residuo studentizado: en la definición del residuo estandarizado dada en (D.4) se observa que existe una relación de dependencia entre el numerador y el denominador de $r_{n,i}$. En el cálculo de la desviación estándar del residuo ordinario se utiliza precisamente $r_{o,i}$. Para eliminar este problema se estima la varianza residual a partir de toda la muestra salvo la observación i-ésima, dando lugar a la varianza residual de los residuos eliminados:

$$s^2_{r,(i)} = \frac{1}{n-j-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} r^2_{o,j}. \tag{D.5}$$

Los residuos studentizados se definen entonces como:

$$r_{t,i} = \frac{r_{o,i}}{s_{r,(i)}\sqrt{1-h_{ii}}}, \forall i \in \{1, 2, \ldots, n\}. \tag{D.6}$$

Nótese que si el número de observaciones n es grande, los residuos estandarizados y studentizados toman valores muy próximos.

En este caso también suele aplicarse el criterio de reconocimiento de valores atípicos como aquellos que poseen un residuo studentizado superior a 3, o incluso a 2 si se es conservador.

El análisis analítico y gráfico de los residuos estandarizados o studentizados permite verificar las hipótesis de un modelo de regresión, que son:

Normalidad: los residuos del modelo siguen una distribución normal.

Homocedasticidad: la varianza de los residuos tipificados es constante.

Independencia: los residuos son variables aleatorias independientes.

Si la hipótesis de normalidad no se verifica, los estimadores por mínimos cuadrados de los parámetros del modelo no coinciden con los máximo verosímiles, es decir, los estimadores obtenidos son centrados pero no eficientes. Por otro lado, los contrastes de significación (usualmente de F y de t) dejan de ser válidos y los intervalos de confianza obtenidos para los parámetros del modelo no son correctos[1]. Entre otros motivos, la falta de normalidad puede ser debida a un conjunto pequeño de observaciones atípicas que originan un apuntamiento, o la existencia de una variable cualitativa oculta que hace que la distribución sea unimodal. En otras ocasiones la fata de normalidad es debida a una fuerte asimetría de la distribución que suele producir también una falta de linealidad o heterocedasticidad. En este último caso resultaría recomendable una transformación de la variable respuesta.

[1] A pesar de ello, si el tamaño muestral es razonablemente grande, por el *"Teorema Central del Límite"* los contrastes e intervalos de confianza obtenidos son una buena aproximación de los reales.

Por otro lado, la falta de independencia manifiesta una autocorrelación y esto afecta gravemente a los resultados del modelo de regresión pues se obtienen estimadores de los parámetros y predicciones ineficientes. Además, los intervalos de confianza y contrastes que se deducen no son válidos, pues se invalida la hipótesis de que:

$$s^2\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right) = \sum_{i=1}^{n} s^2(x_i). \tag{D.7}$$

Para analizar estos aspectos es conveniente realizar gráficos de caja e histogramas de los residuos. No obstante, el gráfico que más información proporciona para determinar si se verifican las hipótesis en la regresión es el gráfico de los residuos frente a las predicciones del modelo. Si éste muestra una nube de puntos enmarcada en un rectángulo imaginario simétrico respecto al eje de abcisas es un indicador claro de que se cumplen las citadas hipótesis. En caso contrario, el ajuste del modelo no es adecuado. Así, por ejemplo, si se observa que los residuos siguen una distribución uniforme, pero respecto a una función que no coincide con el eje de abcisas, implica que el tipo de ajuste realizado no es correcto o los parámetros del ajuste no han sido bien calculados. Por otro lado, si la distribución de los puntos no es uniforme, es un signo de que existe heterocedasticidad en los datos.

D.4. Cálculo de incertidumbres de medida

El objetivo de realizar una medición es determinar el valor del *"mensurando"*, siendo éste la cantidad objeto de medida. Nótese que el resultado de una medida es sólo una estimación del valor real del mensurando, realizada tanto de forma directa como indirecta. Por ello el valor de una medida debe contener especificaciones en relación al mensurando y al método y procedimiento de medida. De esta forma, y con el fin de poder evaluar la fiabilidad del resultado, es imprescindible que la medida vaya siempre acompañada de una indicación cuantitativa de la calidad de la misma, es decir, de su *"incertidumbre"*:

$$X_i \Rightarrow \overline{X}_i \pm U_{1-\alpha}, \tag{D.8}$$

siendo U_e la incertidumbre expandida de la medida X_i, cuyo estimador más adecuado es el valor medio $\overline{X}_i$.

La incertidumbre de medida es un parámetro que va asociado al resultado de una medida y que caracteriza su fluctuación, es decir, refleja la falta de conocimiento del valor exacto del mensurando [JCGM, 2008]. En el supuesto de que no exista la correspondiente indicación, no será posible comparar los resultados de distintas medidas [Arce Fariña, 2013].

Para el cálculo de las incertidumbres de medida, en esta Tesis se ha seguido el procedimiento general marcado en [JCGM, 2008] y los procedimientos particulares indicados en [Myers et al., 1989, ISO, 2007, CIE, 1994, Reda, 2011, Vignola et al., 2012, WMO, 2013].

Las incertidumbres en los resultados experimentales se pueden dividir en dos categorías: las derivadas de fluctuaciones en las medidas y las asociadas con la descripción teórica de los resultados [Hughes and Hase, 2010]. Su estimación se puede realizar mediante un procedimiento sistematizado caracterizado por los siguientes cinco pasos [Vignola et al., 2012]:

1. Determinar la ecuación de medida: $Y = f(X_1, X_2, \ldots, X_n)$.
2. Estimar la incertidumbre estándar para cada variable de la ecuación de medida, $u_{std,i}$, para un nivel de confianza del 68 %, que corresponde con una desviación típica 1σ. La incertidumbre estándar depende de la función densidad de probabilidad de la distribución asociada a la incertidumbre u_i del parámetro correspondiente. Esta función puede ser:
   - **Distribución Normal:** con carácter general y, especialmente con un elevado número de individuos en la muestra tomada, las medidas repetidas siguen esta distribución. El contorno de la misma es una curva con forma de campana llamada campana de Gauss.
   $$u_{std,i} = \sqrt{s_i^2}, \tag{D.9}$$
   siendo s_i la varianza correspondiente a la variable X_i y definida como:
   $$s_i^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(X_{i,j} - \overline{X_i}), \tag{D.10}$$
   donde n es el número de medidas tomadas (tamaño de la muestra).
   - **Distribución Rectangular:** en este tipo de distribución, cada valor dentro de un intervalo dado tiene la misma probabilidad. Es decir, la función de densidad de probabilidad es constante para dicho intervalo. Suele utilizarse cuando únicamente se dispone de información sobre los límites inferior y superior del intervalo de medida [Janotte et al., 2010].
   $$u_{std,i} = \frac{u_i + o_i}{\sqrt{3}}, \tag{D.11}$$
   donde $u_i + o_i$ es la suma de la varianza de la medida, u_i, y el offset o desviación respecto de 0, o_i, cuyo resultado es el punto medio del intervalo de la varianza de la variable X_i:
   $$u_i + o_i = \frac{X_i^{\text{mín}} + X_i^{\text{máx}}}{2}. \tag{D.12}$$
   - **Distribución Triangular:** se adopta esta distribución cuando, además de disponer de información de los límites inferior y superior del intervalo de variabilidad de la magnitud, existen evidencias de que las probabilidades más altas se dan en los valores centrales, y las más bajas en los límites.
   $$u_{std,i} = \frac{u_i + o_i}{\sqrt{6}}. \tag{D.13}$$

3. Calcular los coeficientes de sensibilidad c_i para cada variable de la ecuación de medida:

$$c_i = \frac{\partial f(\mathbf{X})}{\partial X_i}. \tag{D.14}$$

4. Calcular la incertidumbre estándar combinada u_C para todos los términos para el mismo nivel de confianza:

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} c_i^2 u_{std,i}^2}. \tag{D.15}$$

5. Calcular la incertidumbre expandida U_e multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el coeficiente de cobertura k_c. Éste se calcula normalmente a partir de una distribución t-student para un nivel de confianza del 95 % ó 99 %.

A su vez, según [JCGM, 2008], las incertidumbres de medida pueden clasificarse según su método de evaluación en dos tipos: *"tipo A"* y *"tipo B"*. La clasificación en tipo A y tipo B no implica ninguna diferencia de naturaleza entre las componentes de estos tipos. Consiste únicamente en dos formas diferentes de evaluar la incertidumbre, y ambas se basan en distribuciones de probabilidad:

Incertidumbres tipo A: (u_A) se deben a los errores aleatorios que se producen de forma natural, según una distribución estadística, en el proceso de medida. Pueden ser calculadas a partir de una serie de n observaciones:

$$u_A^2 = \sum_{i=1}^{n} c_i^2 u_{std,i}^2. \tag{D.16}$$

Las incertidumbres tipo A sólo pueden cuantificarse en aquellas variables que son medidas directamente y que no tienen por qué ser todas las variables de la ecuación de medida.

En el supuesto de que las variables de entrada estén correlacionadas, se han de considerar las covarianzas entre dichas variables:

$$u_A^2 = \sum_{i=1}^{n} c_i^2 u_{std,i}^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{n} \frac{\partial f(\mathbf{X})}{\partial X_i} \frac{\partial f(\mathbf{X})}{\partial X_j} R(X_i, X_j) u_{std,i} u_{std,j}, \tag{D.17}$$

siendo $R(X_i, X_j)$ el coeficiente de correlación entre las variables X_i y X_j:

$$R(X_i, X_j) = \frac{\mathrm{cov}(X_i, X_j)}{u_{std,i} u_{std,j}}. \tag{D.18}$$

Incertidumbres tipo B (u_B): son todas aquellas incertidumbres que no están sujetas a un análisis estadístico de las observaciones. Se deben a una serie de causas accidentales, como influencias locales y meteorológicas, errores sistemáticos por el equipo o el operario que toma la medida, o incertidumbres del sistema de calibración empleado. Se determinan mediante:

$$u_B^2 = \sum_{i=1}^{n} c_i^2 u_{std,i}^2, \tag{D.19}$$

Las incertidumbres tipo B afectan a todas las variables de la ecuación de medida.

De igual forma que para las incertidumbres tipo A, en el supuesto de que las variables de entrada estén correlacionadas, se han de considerar las correlaciones entre dichas variables.

Los dos tipos de incertidumbre anteriores, u_A y u_B, se analizan de forma separada e independiente, y después se determina la incertidumbre combinada, u_C, como su suma cuadrática:

$$u_C^2 = \sum_{i=1}^{n} u_{A,i}^2 + \sum_{i=1}^{n} u_{B,i}^2. \tag{D.20}$$

La incertidumbre combinada estima el equivalente de la desviación estándar de la medida, según una distribución específica, de la fuente de error [Stoffel et al., 2010].

Finalmente, la incertidumbre expandida $U_{1-\alpha}$ se obtiene a partir de la incertidumbre combinada, dada para un nivel de confianza del 68 %, multiplicada por un factor de cobertura k_c para aumentar el nivel de confianza (usualmente al 95 % ó 99 %):

$$U_{1-\alpha} = k_c u_C. \tag{D.21}$$

D.5. Índices estadísticos

En esta sección del anexo se describen aquellos índices estadísticos usualmente empleados para evaluar el rendimiento (capacidad de estimación) de modelos. Estos índices se han utilizado frecuentemente a lo largo de esta Tesis y se han completado con algunos índices más específicos, los cuales se han detallado en los apartados correspondientes.

Se desea remarcar de nuevo, que el criterio adoptado en este trabajo es el de emplear *"diferencias"* en lugar de *"errores"*, pues las estimaciones de los modelos son comparadas con observaciones que poseen cierta incertidumbre y que, por lo tanto, no se pueden categorizar estrictamente como *"valores verdaderos"*.

Diferencia de Sesgo Promedio (MBD)

La diferencia de sesgo promedio se determina mediante:

$$\text{MBD} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i), \tag{D.22}$$

donde n es el tamaño del conjunto de validación, $\hat{y}_i$ el valor estimado o predicho por el modelo e y_i el valor de referencia u observado.

Se considera que un modelo es más adecuado cuanto menor sea su valor de MSD.

Raíz de la Diferencia Cuadrática Promedio (RMSD)

Este estadístico queda definido a partir de la expresión:

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)^2}. \tag{D.23}$$

Se considera que un modelo es más adecuado cuanto menor sea su valor de RMSD [2].

Coeficiente de determinación R^2

El coeficiente de determinación, o R^2, determina la varianza de los resultados que puede explicarse por el modelo. Como en nuestro caso los ajustes por regresión son siempre lineales, este coeficiente coincide con el cuadrado del *"coeficiente de correlación de Pearson"*, y viene dado por:

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{s_X^2 s_Y^2}, \tag{D.24}$$

siendo σ_{XY} la covarianza entre las variables dependiente e independiente de la regresión, σ_X^2 la varianza de la variable independiente X y σ_Y^2 la varianza de la variable Y.

Se considera que un modelo es más adecuado cuanto mayor sea su valor de R^2.

[2] Algunos autores, en lugar de emplear el RMSD prefieren utilizar la media de las diferencias de sesgo absolutas o MABD (*"Mean Absolute Bias Differences"*). Su comportamiento es similar al del RMSD pues evita que se cancelen las diferencias positivas y negativas, pero no permite distinguir entre un número elevado de pequeñas diferencias respecto de un bajo número de ellas, pero de gran magnitud, lo que sí permite el RMSD dado que no es lineal.

Parámetros de la recta de regresión (a, b)

La recta de regresión entre los valores medidos corregidos y los de referencia indica, a través de su pendiente a, si la corrección se ajusta adecuadamente independientemente de la escala, y a través de la ordenada en el origen b, de si existe una desviación constante en el ajuste. Los valores de la pendiente y de la ordenada, de la recta de regresión $y = ax + b$, se pueden calcular mediante:

$$a = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}, \tag{D.25}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i - a\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}. \tag{D.26}$$

Se considera que un modelo es más adecuado cuanto más próximos a 1 y 0 los valores de la pendiente y ordenada de la recta de regresión, respectivamente.

t-estadístico

En [Stone, 1993] se detallan los inconvenientes de evaluar la bondad del ajuste de modelos a una serie de referencia según los parámetros MBD y RMSD, pudiendo llevar a controversia. Dado que el primero provee información sobre el sesgo global del modelo y el segundo sobre la varianza del mismo, sus evaluaciones sobre un conjunto de modelos aplicados al mismo caso de estudio puede dar lugar a clasificaciones diferentes. Además, aunque estos indicadores consituyen un procedimiento razonable para comparar modelos, no permiten indicar objetivamente si las estimaciones del modelo son estadísticamente significativas o no, es decir, si son significativamente diferentes de las partes medidas.

Por todo lo expuesto anteriormente, se propone el índice t-estadístico como medida para comparar modelos con capacidad para indicar si las estimaciones de los mismos son estadísticamente significativas a un nivel α de significación[3]. Además, este índice presenta la ventaja de que puede definirse a partir de los valores de MBD y RMSD y tiene en cuenta la dispersión de los resultados, la cual es despreciada cuando se evalúan los dos indicadores anteriores por separado, esto es, tiene en cuenta el tamaño de la serie de datos.

[3]Un nivel α de significación corresponde a un nivel $(1 - \alpha)$ de confianza.

El t-estadístico se define como:

$$t = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)}{\frac{s}{\sqrt{n}}}, \tag{D.27}$$

siendo s la desviación estándar de las diferencias entre las estimaciones del modelo y las observaciones medidas, y n el número de pares de datos. Fácilmente puede demostrarse que la expresión (D.27) puede escribirse como:

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)\mathrm{MBD}^2}{\mathrm{RMSD}^2 - \mathrm{MBD}^2}}. \tag{D.28}$$

Cuanto menor es el valor de t, mejor es el comportamiento del modelo. Para determinar si las estimaciones de un modelo son estadísticamente significativas, simplemente debe evaluarse el valor crítico de t, para un nivel de significación α dado, procedente de una distribución t-Student con $n-1$ grados de libertad. Así, las estimaciones del modelo podrán decirse estadísticamente significativas a un nivel de confianza $1-\alpha$ cuando:

$$t \leq t_{\alpha/2}. \tag{D.29}$$

Distancia d de Willmott

En [Willmott, 1982b] se propone un nuevo índice que evalúa las diferencias entre las estimaciones dadas por un modelo y las observaciones denominado como *"índice de acuerdo"* o distancia de Willmott:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|\hat{y}'_i| + |y'_i|)^2}, \tag{D.30}$$

donde $\hat{y}'_i = \hat{y}_i - \bar{y}$ e $y'_i = y_i - \bar{y}$.

El índice d es una medida descriptiva para la comparación de modelos cuyo valor se encuentra limitado al intervalo $d \in [0, 1]$. En términos generales, representa la distancia relativa entre los valores observados y los estimados por el modelo respecto a la distancia centrada, o sin error sistemático. El autor indica que debe evaluarse en conjunto con otros índices como el MBD o el RSMD. Así mismo, para analizar la correlación indica que es preferible el análisis de los coeficientes a (pendiente) y b (ordenada en el origen) de la recta de regresión en lugar del coeficiente de determinación R^2 [Willmott, 1981, Willmott, 1982b].

REFERENCIAS

Referencias y bibliografía utilizada.

Referencias

[Alados-Arboledas et al., 2000] Alados-Arboledas, L., Olmo, F. J., Alados, I., and Pérez, M. (2000). Parametric models to estimate photosynthetically active radiation in Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101(2–3):187–201.

[Alavi et al., 2011] Alavi, A. H., Ameri, M., Gandomi, A. H., and Mirzahosseini, M. R. (2011). Formulation of flow number of asphalt mixes using a hybrid computational method. *Construction and Building Materials*, 25(3):1338–1355.

[Appelbaum and Bergshtein, 1987] Appelbaum, J. and Bergshtein, O. (1987). A solar radiation distribution sensor. *Solar Energy*, 39(1):1–10.

[Arce Fariña, 2013] Arce Fariña, M. E. (2013). *Optimización mediante técnicas de Teoría Gris de la combustión de biomasa en un Drop Furnace.* PhD thesis, Universidad de Vigo, Spain.

[Arnfield, 1988] Arnfield, A. (1988). Validation of an estimation model for urban surface albedo. *Physical Geography*, 9(4):361–372.

[Arnfield, 1975] Arnfield, A. J. (1975). Note on the diurnal, latitudinal and seasonal variation of the surface reflection coefficient. *Journal of Applied Meteorology*, 14:1603–1608.

[Assi et al., 2012] Assi, A. H., Sl Shamisi, M. H., and Hejase, H. A. N. (2012). Matlab tool for predicting the global solar radiation in UAE. In *International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC 2012).*

[Azadian and Radzi, 2013] Azadian, F. and Radzi, M. A. M. (2013). A general approach toward building integrated photovoltaic systems and its implementation barriers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22:527–538.

[Badescu, 2002] Badescu, V. (2002). 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces. *Renewable Energy*, 26(2):221–233.

[Badescu, 2008] Badescu, V., editor (2008). *Modeling solar radiation at the Earth's surface.* Springer Berlin Heidelberg, New York.

[Bakirci, 2015] Bakirci, K. (2015). Models for the estimation of diffuse solar radiation for typical cities in Turkey. *Energy*, In press.

[Bao et al., 2014] Bao, Y., Wang, X., Liu, X., Zhou, S., and Niu, Z. (2014). Solar radiation prediction and energy allocation for energy harvesting base stations. In *IEEE International Conference on Communications (ICC 2014)*, volume 1, pages 3487–3492.

[Batlles et al., 1998] Batlles, F. J., Barbero, J., López, G., Pérez, M., Rodrigo, F., and Rubio, M. A. (1998). *Fundamentos de la radiación solar y aspectos climatológicos de Almería, 1990-1996*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería, Almería.

[Batlles et al., 1995] Batlles, F. J., Olmo, F. J., and Alados-Arboledas, L. (1995). On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, 54(2):105–114.

[Battiti, 1992] Battiti, R. (1992). First and second-order methods for learning: Between steepest descent and Newton's method. *Neural Computation*, 4:141–166.

[Bird, 1984] Bird, R. E. (1984). A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. *Solar Energy*, 32(4):461–471.

[Bodart and De Herde, 2002] Bodart, M. and De Herde, A. (2002). Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. *Energy and Buildings*, 34(5):421–429.

[Boland et al., 2008] Boland, J., Ridley, B., and Brown, B. (2008). Models of diffuse solar radiation. *Renewable Energy*, 33(4):575–584.

[Boland et al., 2001] Boland, J., Scott, L., and Luther, M. (2001). Modelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. *Environmetrics*, 12(2):103–116.

[Bolstad, 2004] Bolstad, W. M. (2004). *Introduction to Bayesian Statistics*. John Wiley, New York.

[Broomhead and Lowe, 1988] Broomhead, D. and Lowe, D. (1988). Radial basis functions, multi-variable functional interpolation and adaptive networks. *Complex Systems*, 2:21–355.

[Brunger and Hooper, 1993] Brunger, A. P. and Hooper, F. C. (1993). Anisotropic sky radiance model based on narrow field of view measurements of shortwave radiance. *Solar Energy*, 51(1):53–64.

[Burba, 2011] Burba, G. (2011). Direct, diffuse, and total radiation sensor. Patent WO2011139279-A1 (USA).

[Casares et al., 2014] Casares, F. J., Ramírez-Faz, J., and López-Luque, R. (2014). Development of synthetic hemispheric projections suitable for assessing the sky view factor on horizontal planes. *Energy and Buildings*, 82:696–702.

[Celik and Muneer, 2013] Celik, A. N. and Muneer, T. (2013). Neural network based method for conversion of solar radiation data. *Energy Conversion and Management*, 67:117–124.

[Cess et al., 2000] Cess, R., Qian, T., and Sun, M. (2000). Consistency tests applied to the measurement of total, direct, and diffuse shortwave radiation at the surface. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D20):24881–24887.

[Chang, 2012] Chang, Y. P. (2012). Optimal tilt angle for PV modules using the neural-genetic algorithm considering mathematical model of the solar orbit and position. *Advanced Materials Research*, 512-515:250–253.

[Chang and Wang, 2010] Chang, Y.-P. and Wang, D.-A. (2010). Optimization of tilt angle for photovoltaic modules based on the neural-genetic algorithm. *Journal of Nan Kai*, 7(1):57–70.

[Chatterjee and Keyhani, 2012] Chatterjee, A. and Keyhani, A. (2012). Neural network estimation of microgrid maximum solar power. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4):1860–1866.

[Chwieduk, 2009] Chwieduk, D. A. (2009). Recommendation on modelling of solar energy incident on a building envelope. *Renewable Energy*, 34(3):736–741.

[CIE, 1994] CIE (1994). CIE 108-1994: Guide to recommended practice of daylight measurement.

[CIE, 2004] CIE (2004). Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky.

[Cigizoglu and Alp, 2006] Cigizoglu, H. K. and Alp, M. (2006). Generalized regression neural network in modelling river sediment yield. *Advances in Engineering Software*, 37(2):63–68.

[Compagnon, 2004] Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, 36(4):321–328.

[Dahlgren, 1984] Dahlgren, L. (1984). Handbook of methods of estimating solar radiation. Technical report.

[Dahmani et al., 2014] Dahmani, K., Dizene, R., Notton, G., Paoli, C., Voyant, C., and Nivet, M. L. (2014). Estimation of 5-min time-step data of tilted solar global irradiation using an artificial neural network model. *Energy*, 70:374–381.

[Davies and McKay, 1988] Davies, J. A. and McKay, D. C. (1988). Estimating solar radiation from incomplete cloud data. *Solar Energy*, 41(1):15–18.

[de Oliveira and Machado, 2001] de Oliveira, A. P. and Machado, A. J. (2001). A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at the surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:698–708.

[de Simón-Martín et al., 2014a] de Simón-Martín, M., Alonso-Tristán, C., and Díez-Mediavilla, M. (2014a). Performance indicators for sun-tracking systems: A case study in Spain. *Energy and Power Engineering*, 6(9):292–302.

[de Simón-Martín et al., 2014b] de Simón-Martín, M., Alonso-Tristán, C., and Díez-Mediavilla, M. (2014b). Sun-trackers profitability analysis in Spain. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(9):1010–1022.

[de Simón-Martín et al., 2014] de Simón-Martín, M., Díez-Mediavilla, M., Alonso-Tristán, C., and González-Peña, D. (2014). Dispositivo de medida de radiación difusa y procedimiento de utilización del mismo. Patent P201400714 (Spain).

[de Simón-Martín et al., 2010a] de Simón-Martín, M., Gómez-Gil, F. J., Ruiz-Calvo, J., Peláez-Vara, J., Martínez-Martínez, A., Martín-Fraile, J. V., Alonso-Tristán, C., and Díez-Mediavilla, M. (2010a). Seguidor solar basado en cinemática paralela de accionamiento en línea. Patent ES 2332084-B2 (Spain).

[de Simón-Martín et al., 2010b] de Simón-Martín, M., Gómez-Gil, F. J., Ruiz-Calvo, J., Peláez-Vara, J., Martínez-Martínez, A., Martín-Fraile, V., Alonso-Tristán, C., and Díez-Mediavilla, M. (2010b). Seguidor solar basado en cinemática paralela de accionamiento individual. Patent ES 2331721-B2 (Spain).

[Dennis and Schnabel, 1996] Dennis, J. and Schnabel, R. (1996). *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*. Classics in Applied Mathematics. Society for Industrial and Applied Mathematics, New York.

[Díez-Mediavilla, 2001] Díez-Mediavilla, M. (2001). *Medida y modelización de radiación solar difusa sobre plano inclinado*. PhD thesis, Universidad de Valladolid, Spain.

[Díez-Mediavilla et al., 2000] Díez-Mediavilla, M., Bilbao, J., and de Miguel, A. (2000). Estudio comparativo de modelos de irradiación difusa horaria sobre superficie inclinada. In *IX Congreso Ibérico de Energía Solar*, pages 1–10, Córdoba.

[Díez-Mediavilla et al., 2006] Díez-Mediavilla, M., Bilbao, J., and de Miguel, A. (2006). Erratum to "Measurement and comparison of diffuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain)". *Energy Conversion and Management*, 47(18–19):3504–3506.

[Díez-Mediavilla et al., 2005] Díez-Mediavilla, M., de Miguel, A., and Bilbao, J. (2005). Measurement and comparison of diffuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain). *Energy Conversion and Management*, 46(13–14):2075–2092.

[Draper and Smith, 1998] Draper, N. and Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis*. Wiley, New York.

[Drummond, 1956] Drummond, A. J. (1956). On the measurement of sky radiation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 7(3-4):413–436.

[Drummond, 1964] Drummond, A. J. (1964). Comments on "Sky radiation measurement and corrections". *Journal of Applied Meteorology*, 3(6):810–811.

[EKO, 2015] EKO (2015). EKO Instruments: http://eko-eu.com/es. Last checked on May 2015.

[Elminir et al., 2007] Elminir, H. K., Azzam, Y. A., and Younes, F. I. (2007). Prediction of hourly and daily diffuse fraction using neural network, as compared to linear regression models. *Energy*, 32(8):1513–1523.

[Erbs et al., 1982] Erbs, D. G., Klein, S. A., and Duffie, J. A. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28(4):293–302.

[EU Commission, 2002] EU Commission (2002). Directiva 2002/91/EU, del 16 de diciembre de 2002, sobre la eficiencia energética en edificios.

[EU Commission, 2010] EU Commission (2010). Directiva 2010/31/EU, del 19 de mayo de 2010, sobre la eficiencia energética en edificios.

[EU Commission, 2014] EU Commission (2014). PV potential estimation utility (PVGIS): http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php. Last checked on May 2015.

[Evseev and Kudish, 2009] Evseev, E. G. and Kudish, A. I. (2009). An assessment of a revised Olmo et al. model to predict solar global radiation on a tilted surface at Beer Sheva, Israel. *Renewable Energy*, 34(1):112–119.

[Fletcher and Reeves, 1964] Fletcher, R. and Reeves, C. M. (1964). Function minimization by conjugate gradients. *The Computer Journal*, 7(2):149–154.

[Fombellida García, 2013] Fombellida García, J. (2013). *Redes neuroborrosas: fundamentos, implementación en Matlab y aplicaciones. Master thesis.* Universidad de León, Spain.

[Franklin, 1974] Franklin, J. N. (1974). On Tikhonov's method for ill-posed problems. *Mathematics of Computation*, 28(128):889–907.

[Freitas et al., 2015] Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., and Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment: State of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:915–931.

[Gen and Cheng, 2000] Gen, M. and Cheng, R. (2000). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization.* John Wiley & Sons, New York.

[Goldberg, 1989] Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.* Addison-Wesley, Reading.

[Gov. Esp., 2006] Gov. Esp. (2006). CTE-DB HE5: Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.

[Gov. Esp., 2007] Gov. Esp. (2007). Real Decreto (RD) 661/2007 del 25 de mayo de 2007, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

[Gov. Esp., 2008] Gov. Esp. (2008). Real Decreto (RD) 1578/2008 del 27 de septiembre de 2008, de retribución de la actividad de producción de energía eléctrica mediante tecnología solar fotovoltaica para instalaciones posteriores a la fecha límite de mantenimiento de la retribución del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, para dicha tecnología.

[Gov. Esp., 2012] Gov. Esp. (2012). Real Decreto-Ley (RDL) 1/2012, de 27 de enero de 2012, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos.

[Gov. Esp., 2015] Gov. Esp. (2015?). Borrador real decreto (RD) por el que se establece la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y producción con autoconsumo.

[Gov. of Canada, 2015] Gov. of Canada (2015). World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre: http://www.woudc.org. Last checked on May 2015.

[Güçlü et al., 2014] Güçlü, Y. S., Yeleğen, M. Ö., Dabanlı, İ., and Şişman, E. (2014). Solar irradiation estimations and comparisons by ANFIS, Angström–Prescott and dependeny models. *Solar Energy*, 109:118–124.

[Gueymard, 1987] Gueymard, C. (1987). An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar Energy*, 38(5):367–386.

[Gueymard, 1988] Gueymard, C. (1988). Erratum to "An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms". *Solar Energy*, 40(2):175.

[Gueymard, 1989] Gueymard, C. (1989). An atmospheric transmittance model for the calculation of the clear sky beam, diffuse and global photosynthetically active radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45(3–4):215–229.

[Gueymard, 1993] Gueymard, C. (1993). Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. *Solar Energy*, 51(2):121–138.

[Gueymard, 2014] Gueymard, C. A. (2014). A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39:1024–1034.

[Gueymard, 2015] Gueymard, C. A. (2015). On the correct use of the gueymard diffuse radiation model for tilted surfaces. *Energy Conversion and Management*, In press.

[Gueymard and Ruiz-Arias, 2015] Gueymard, C. A. and Ruiz-Arias, J. A. (2015). Validation of direct normal irradiance predictions under arid conditions: A review of radiative models and their turbidity-dependent performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45:379–396.

[Gueymard and Thevenard, 2009] Gueymard, C. A. and Thevenard, D. (2009). Monthly average clear-sky broadband irradiance database for worldwide solar heat gain and building cooling load calculations. *Solar Energy*, (11):1998–2018.

[Gul et al., 1998] Gul, M. S., Muneer, T., and Kambezidis, H. D. (1998). Models for obtaining solar radiation from other meteorological data. *Solar Energy*, 64(1–3):99–108.

[Gupta et al., 1979] Gupta, M., Ragade, R., and Yager, R. (1979). *Advances in fuzzy set theory and applications*. North-Holland Pub. Co., New York.

[Hagan et al., 1996] Hagan, M., Demuth, H., Beale, M., and de Jesús, O. (1996). *Network Design*. PWS Publishing, Boston, 2nd edition.

[Hagan and Menhaj, 1994] Hagan, M. and Menhaj, M. (1994). Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6):989–993.

[Hamilton and Jackson, 1985] Hamilton, H. L. and Jackson, A. (1985). A shield for obtaining diffuse sky radiation from portions of the sky. *Solar Energy*, 34(1):121–123.

[Hay, 1976] Hay, J. E. (1976). A revised method for determining the direct and diffuse components of the total short-wave radiation. *Atmosphere*, 14(4):278–287.

[Hay, 1979] Hay, J. E. (1979). Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy*, 23(4):301–307.

[Hay and Davies, 1980] Hay, J. E. and Davies, J. A. (1980). Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. In *Proceedings of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, page 59, Ministry of Supply and Services, Canada.

[Hay and McKay, 1988] Hay, J. E. and McKay, D. C. (1988). Calculation of solar irradiances for inclined surfaces: verification of models which use hourly and daily data. In *IEA Task IX Final Report, Atmospheric Environment Service*, Downsview, Canada.

[Hedstrom and Freeman, 1980] Hedstrom, J. C. and Freeman, T. L. (1980). Validation of solar system simulation codes by the International Energy Agency. In *Proceedings, 2nd Systems Simulation and Economic Analysis Conference*.

[Henemann, 2008] Henemann, A. (2008). BIPV: Built-in solar energy. *Renewable Energy Focus*, 9(6, Supplement):14–19.

[Hirsch, 2010] Hirsch, J. J. (2010). DOE-2: http://www.doe2.com. Last checked on May 2015.

[Hooper and Brunger, 1980] Hooper, F. C. and Brunger, A. P. (1980). A model for the angular distribution of sky radiance. *Journal of Solar Energy Engineering*, 102(3):196–202.

[Hottel, 1976] Hottel, H. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy*, 18(2):129–134.

[Huang, 2009] Huang, Y. (2009). Advances in artificial neural networks – Methodological development and application. *Algorithms*, 2(3):973–1007.

[Hughes and Hase, 2010] Hughes, I. and Hase, T. (2010). *Measurements and their uncertainties: A practical guide to modern error analysis*. Oxford University Press, New York.

[Igawa, 2014] Igawa, N. (2014). Improving the all sky model for the luminance and radiance distributions of the sky. *Solar Energy*, 105:354–372.

[Igawa et al., 2004] Igawa, N., Koga, Y., Matsuzawa, T., and Nakamura, H. (2004). Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution. *Solar Energy*, 77(2):137–157.

[Igawa et al., 2014] Igawa, N., Nakamura, H., and Matsuura, K. (2014). Sky luminance distribution model for simulation of daylight environment. Dataset.

[Ineichen, 1983] Ineichen, P. (1983). *Quatre années de mesures d'ensoleillement à Genève*. PhD thesis, Université de Genève, Switzerland.

[Ineichen et al., 1983] Ineichen, P., Gremaud, J. M., Guisan, O., and Mermoud, A. (1983). Study of the corrective factor involved when measuring the diffuse solar radiation by use of the ring method. *Solar Energy*, 31(1):113–117.

[Iqbal and Al-Homoud, 2007] Iqbal, I. and Al-Homoud, M. S. (2007). Parametric analysis of alternative energy conservation measures in an office building in hot and humid climate. *Building and Environment*, 42(5):2166–2177.

[Iqbal, 1983] Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press, California.

[ISO, 2007] ISO (2007). *ISO/TR 9901:1990, Solar Energy – Field pyranometers – Recommended practice for use*. American National Standards Institute.

[Ivanova, 2013] Ivanova, S. M. (2013). Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part I – Vertical surfaces. *Solar Energy*, 95:376–391.

[Ivanova, 2014] Ivanova, S. M. (2014). Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part II – Horizontal surfaces. *Solar Energy*, 100:234–250.

[Jacobs, 1988] Jacobs, R. A. (1988). Increased rates of convergence through learning rate adaptation. *Neural Networks*, 1:295–307.

[Jafarzadeh et al., 2013] Jafarzadeh, S., Fadali, M., and Evrenosoglu, C. (2013). Solar power prediction using interval type-2 TSK modeling. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(2):333–339.

[Jang, 1993] Jang, J. (1993). ANFIS: Adaptative-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(3):665–685.

[Jang et al., 1997] Jang, J., Sun, C., and Mizutani, E. (1997). *Neuro-fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence*. Matlab Curriculum Series. Prentice Hall, New York.

[Janotte et al., 2010] Janotte, N., Luepfert, E., Pitz-Paal, R., Pottler, K., Eck, M., Zarza, E., and Riffelmann, K. (2010). Influence of measurement equipment on the uncertainty of performance data from test loops for concentrating solar collectors. *Transactions of the ASME*, 132.

[JCGM, 2008] JCGM (2008). *Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement. GUM 1995 with minor revisions*. Joint Committee for Guides in Metrology. Bureau International des Poids et Mesures.

[Kalogirou, 2001] Kalogirou, S. A. (2001). Artificial neural networks in renewable energy systems applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(4):373–401.

[Kamali et al., 2006] Kamali, G. A., Moradi, I., and Khalili, A. (2006). Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: A study case in Karaj (Iran). *Theoretical and Applied Climatology*, 84(4):235–241.

[Kambezidis et al., 1998] Kambezidis, H. D., Katevatis, E. M., Petrakis, M., Lykoudis, S., and Asimakopoulos, D. N. (1998). Estimation of the Linke and Unsworth-Monteith turbidity factors in the visible spectrum: Application for Athens, Greece. *Solar Energy*, 62(1):39–50.

[Kambezidis et al., 1994] Kambezidis, H. D., Psiloglou, B. E., and Gueymard, C. (1994). Measurements and models for total solar irradiance on inclined surface in Athens, Greece. *Solar Energy*, 53(2):177–185.

[Kasten, 1966] Kasten, F. (1966). A new table and approximation formula for the relative optical air mass. *Architecture, Meteorology, Geophysics and Bioklimatology*, pages 206–223.

[Kasten, 1993] Kasten, F. (1993). Discussion on the relative optical air mass. *Lighting research & technology*, 25(3):129–130.

[Kaushika et al., 2014] Kaushika, N. D., Tomar, R. K., and Kaushik, S. C. (2014). Artificial neural network model based on interrelationship of direct, diffuse and global solar radiations. *Solar Energy*, 103:327–342.

[Khalil and Shaffie, 2013] Khalil, S. A. and Shaffie, A. M. (2013). A comparative study of total, direct and diffuse solar irradiance by using different models on horizontal and inclined surfaces for Cairo, Egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27:853–863.

[Khatib et al., 2012a] Khatib, T., Azah, M., Mahmoud, M., and Sopian, K. (2012a). Assessment of artificial neural networks for hourly solar radiation prediction. *International Journal of Photoenergy*, 2012:7.

[Khatib et al., 2011] Khatib, T., Mohamed, A., Mahmoud, M., and Sopian, K. (2011). Modeling of daily solar energy on a horizontal surface for five main sites in Malaysia. *International Journal of Green Energy*, 8(8):795–819.

[Khatib et al., 2012b] Khatib, T., Mohamed, A., Mahmoud, M., and Sopian, K. (2012b). An assessment of diffuse solar energy models in terms of estimation accuracy. *Energy Procedia*, 14:2066–2074.

[King and Buckius, 1979] King, R. and Buckius, R. (1979). Direct solar transmittance for a clear sky. *Solar Energy*, 22(3):297–301.

[Kipp & Zonen, 2015] Kipp & Zonen (2015). Kipp & Zonen Products: www.kippandzonen.es. Last checked on May 2015.

[Kipp and Zonen, 2014] Kipp and Zonen (2014). CM 121 shadow ring instruction manual.

[Kittler et al., 1997] Kittler, R., Perez, R., and Darula, S. (1997). A new generation of sky standards. In *8th European lighting conference*, pages 359–373, Amsterdam.

[Klein and Theilacker, 1981] Klein, S. A. and Theilacker, J. C. (1981). An algorithm for calculating monthly-average radiation on inclined surfaces. *Journal of Solar Energy Engineering*, 103(1):29–33.

[Klir and Yuan, 1995] Klir, G. and Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applicaations*. Prentice Hall, New York.

[Klucher, 1979] Klucher, T. M. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23(2):111–114.

[Kondratyev, 1969] Kondratyev, K. Y. (1969). *Radiation in the Atmosphere*. Academic Press, New York.

[Konrad and Larsen, 1978] Konrad, A. and Larsen, B. T. (1978). *Encore-Canada: Computer Program for the Study of Energy Consumption of Residential Buildings in Canada*. National Research Council of Canada. Division of Building Research, Otawa.

[Koronakis, 1986] Koronakis, P. S. (1986). On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. *Solar Energy*, 36(3):217–225.

[Kumar et al., 2012] Kumar, R., Aggarwal, R. K., and Sharna, J. D. (2012). Solar radiation estimation using artificial neural network: A review. *Asian Journal of Contemporary Sciences*, 1:12–17.

[LeBaron et al., 1990] LeBaron, B. A., Michalsky, J. J., and Perez, R. (1990). A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. *Solar Energy*, 44(5):249–256.

[Lee, 2005] Lee, K. (2005). *First Course on Fuzzy Theory and Applications*. Advances in Soft Computing. Springer, New York.

[Li et al., 2013] Li, D. H. W., Chau, N. T. C., and Wan, K. K. W. (2013). Predicting daylight illuminance and solar irradiance on vertical surfaces based on classified standard skies. *Energy*, 53:252–258.

[Li et al., 2014] Li, D. H. W., Chau, T. C., and Wan, K. K. W. (2014). A review of the CIE general sky classification approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31:563–574.

[Li et al., 2010] Li, D. H. W., Tang, H. L., Lee, E. W. M., and Muneer, T. (2010). Classification of CIE standard skies using probabilistic neural networks. *International Journal of Climatology*, 30(2):305–315.

[Liu and Jordan, 1961] Liu, B. and Jordan, R. (1961). Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE Journal*, 3:53–59.

[Lokmanhekim, 1971] Lokmanhekim, M. (1971). *Procedure for Determining Heating and Cooling Loads for Computerized Energy Calculations*. ASHRAE, New York.

[Loutzenhiser et al., 2007] Loutzenhiser, P. G., Manz, H., Felsmann, C., Strachan, P. A., Frank, T., and Maxwell, G. M. (2007). Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy*, 81(2):254–267.

[Ma and Iqbal, 1983] Ma, C. and Iqbal, M. (1983). Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces. *Solar Energy*, 31(3):313–317.

[MAAMA, 2015] MAAMA (2015). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (España). Red SIAR: http://eportal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx. Last checked on May 2015.

[MacKay, 1991] MacKay, D. J. C. (1991). Bayesian interpolation. *Neural Computation*, 4:415–447.

[Maghrabi, 2009] Maghrabi, A. (2009). Parameterization of a simple model to estimate monthly global solar radiation based on meteorological variables, and evaluation of existing solar radiation models for Tabouk, Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 50(11):2754–2760.

[Maile et al., 2007] Maile, T., Fischer, M., and Bazjanac, V. (2007). Building energy performance simulation tools - a life-cycle and interoperable perspective. *CIFE Working Paper #WP107*, pages 1–49.

[Mamdani, 1976] Mamdani, E. (1976). Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies*, 8:669–678.

[Mamdani, 1977] Mamdani, E. (1977). Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using liguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 26(12):1182–1191.

[Mamdani and Assilian, 1975] Mamdani, E. and Assilian, S. (1975). An experiment in liguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1):1–13.

[Markou et al., 2007] Markou, M. T., Kambezidis, H. D., Bartzokas, A., Darula, S., and Kittler, R. (2007). Generation of daylight reference years for two European cities with different climate: Athens, Greece and Bratislava, Slovakia. *Atmospheric Research*, 86(3–4):315–329.

[Marquardt, 1963] Marquardt, D. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2):431–441.

[Marszal et al., 2011] Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., and Napolitano, A. (2011). Zero energy building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4):971–979.

[Martínez-Rodríguez, 2005] Martínez-Rodríguez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, XXXVIII:315–332.

[MathWorks, 2015] MathWorks (2015). MATLAB: http://www.mathworks.es/help. Last checked on May 2015.

[McCulloch and Pitts, 1943] McCulloch, W. and Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas imminent in neural nets. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115–137.

[McIntosh, 2012] McIntosh, A. (2012). *Fitting Linear Models: An Application of Conjugate Gradient Algorithms*. Springer Science & Business Media, New York.

[Mehleri et al., 2010] Mehleri, E. D., Zervas, P. L., Sarimveis, H., Palyvos, J. A., and Markatos, N. C. (2010). A new neural network model for evaluating the performance of various hourly slope irradiation models: Implementation for the region of Athens. *Renewable Energy*, 35(7):1357–1362.

[Michalsky, 1988] Michalsky, J. J. (1988). The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy*, 40(3):227–235.

[MINES Paris Tech, 2015] MINES Paris Tech (2015). SODA-Esra database: http://www.soda-is.com/eng/services/services_radiation_free_eng.php. Last checked on May 2015.

[Mishra et al., 2008] Mishra, A., Kaushika, N. D., Zhang, G., and Zhou, J. (2008). Artificial neural network model for the estimation of direct solar radiation in the Indian zone. *International Journal of Sustainable Energy*, 27(3):95–103.

[Mohandes et al., 1998] Mohandes, M., Rehman, S., and Holawani, T. O. (1998). Estimation of global solar radiation using artificial neural networks. *Renewable Energy*, 14(1-4):179–184.

[Møller, 1993] Møller, M. F. (1993). A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. *NEURAL NETWORKS*, 6(4):525–533.

[Montgomery and Peck, 1992] Montgomery, D. and Peck, E. (1992). *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley, New York.

[Moon and Spencer, 1942] Moon, P. and Spencer, D., E. (1942). *Illumination from a non-uniform sky*, volume 37. New York.

[Moreno et al., 2011] Moreno, A., Gilabert, M. A., and Martínez, B. (2011). Mapping daily global solar irradiation over Spain: A comparative study of selected approaches. *Solar Energy*, 85(9):2072–2084.

[Mubiru and Banda, 2008] Mubiru, J. and Banda, E. J. K. B. (2008). Estimation of monthly average daily global solar irradiation using artificial neural networks. *Solar Energy*, 82(2):181–187.

[Munawwar and Muneer, 2007] Munawwar, S. and Muneer, T. (2007). Statistical approach to the proposition and validation of daily diffuse irradiation models. *Applied Energy*, 84(4):455–475.

[Muneer, 1987] Muneer, T. (1987). *Solar Radiation Modelling for the United Kingdom*. PhD thesis, Council for National Academic Awards, London.

[Muneer, 1988] Muneer, T. (1988). Further refinement of an anisotropic model for inclined surface solar irradiation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 202(1):67–71.

[Muneer, 1989] Muneer, T. (1989). Algorithms for estimating hourly solar irradiation on slopes. *Building Services Engineering Research and Technology*, 10(2):81–83.

[Muneer, 1990a] Muneer, T. (1990a). Solar radiation: Further evaluation of the Muneer model. *Building Services Engineering Research and Technology*, 11(2):77–78.

[Muneer, 1990b] Muneer, T. (1990b). Solar radiation model for Europe. *Building Services Engineering Research and Technology*, 11(4):153–163.

[Muneer, 1995] Muneer, T. (1995). Solar irradiance and illuminance models for Japan I: Sloped surfaces. *Lighting Research and Technology*, 27(4):209–222.

[Muneer, 2004] Muneer, T. (2004). *Solar Radiation and Daylight Models*. ButterWorth-Heinemann, Oxford, 2nd edition.

[Muneer and Gul, 2000] Muneer, T. and Gul, M. S. (2000). Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data. *Energy Conversion and Management*, 41(5):461–482.

[Muneer and Saluja, 1986] Muneer, T. and Saluja, G. S. (1986). Correlation between hourly diffuse and global solar irradiation for the UK. *Building Services Engineering Research and Technology*, 7(1):37–43.

[Muneer et al., 2007] Muneer, T., Younes, S., and Munawwar, S. (2007). Discourses on solar radiation modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(4):551–602.

[Muneer and Zhang, 2002] Muneer, T. and Zhang, X. (2002). A new method for correcting shadow band diffuse irradiance data. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 124(1):34–43.

[Myers, 2013] Myers, D. R. (2013). *Solar Radiation. Practical Modeling for Renewable Energy Applications*. CRC Press, Boca Raton.

[Myers et al., 1989] Myers, D. R., Emery, K. A., and Stoffel, T. L. (1989). Uncertainty estimates for global solar irradiance measurements used to evaluate PV device performance. *Solar Cells*, 27(1–4):455–464.

[NASA, 2015a] NASA (2015a). AERONET- Aerosol Robotic Network: http://aeronet.gsfc.nasa.gov. Last checked on May 2015.

[NASA, 2015b] NASA (2015b). Surface Meteorology and Solar Energy: http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?. Last checked on May 2015.

[Nijegorodov et al., 1997] Nijegorodov, N., Adedoyin, J., and Devan, K. (1997). A new analytical-empirical model for the instantaneous diffuse radiation and experimental investigation of its validity. *Renewable Energy*, 11(3):341–350.

[Nkemdirim, 1972] Nkemdirim, L. C. (1972). A note on the albedo of surfaces. *Journal of Applied Meteorology*, 11:867–874.

[Noorian et al., 2008] Noorian, A. M., Moradi, I., and Kamali, G. A. (2008). Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. *Renewable Energy*, 33(6):1406–1412.

[Notton et al., 2013] Notton, G., Paoli, C., and Diaf, S. (2013). Estimation of tilted solar irradiation using artificial neural networks. *Energy Procedia*, 42:33–42.

[Notton et al., 2012] Notton, G., Paoli, C., Vasileva, S., Nivet, M. L., Canaletti, J.-L., and Cristofari, C. (2012). Estimation of hourly global solar irradiation on tilted planes from horizontal one using artificial neural networks. *Energy*, 39(1):166–179.

[NREL, 2015] NREL (2015). National Renewable Energy Laboratory-MIDC: http://www.nrel.gov/midc. Last checked on May 2015.

[Olmo et al., 1999] Olmo, F. J., Vida, J., Foyo, I., Castro-Diez, Y., and Alados-Arboledas, L. (1999). Prediction of global irradiance on inclined surfaces from horizontal global irradiance. *Energy*, 24(8):689–704.

[Orgill and Hollands, 1977] Orgill, J. F. and Hollands, K. G. T. (1977). Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, 19(4):357–359.

[Padovan and Del Col, 2010] Padovan, A. and Del Col, D. (2010). Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes. *Solar Energy*, 84(12):2068–2084.

[Papadakis et al., 2001] Papadakis, G., Tsamis, P., and Kyritsis, S. (2001). An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings. *Energy and Buildings*, 33(8):831–836.

[Paulescu et al., 2006] Paulescu, M., Fara, L., and Tulcan-Paulescu, E. (2006). Models for obtaining daily global solar irradiation from air temperature data. *Atmospheric Research*, 79(3–4):227–240.

[Paulescu and Schlett, 2003] Paulescu, M. and Schlett, Z. (2003). A simplified but accurate spectral solar irradiance model. *Theoretical and Applied Climatology*, 75(3-4):203–212.

[Perez and Darula, 1998] Perez, R. and Darula, S. (1998). A set of standard skies. Characterizing daylight conditions for computer and energy conscious design. Technical report, Institute of Construction and Architecture, Bratislava.

[Perez et al., 1990] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., and Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5):271–289.

[Perez et al., 1987] Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., and Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, 39(3):221–231.

[Perpiñán Lamigueiro, 2013] Perpiñán Lamigueiro, Ó. (2013). *Energía Solar Fotovoltaica*. Perpiñán Lamigueiro, Óscar, on-line edition.

[Perraudeau and Chauvel, 1986] Perraudeau, M. and Chauvel, P. (1986). One year's measurements of luminous climate in Nantes. In *Proceedings of the International Daylighting Conference*, Long Beach (U.S.A.).

[Powell, 1977] Powell, M. J. D. (1977). Restart procedures for the conjugate gradient method. *Mathematical Programming*, 12(1):241–254.

[Prada et al., 2015] Prada, A., Gasparella, A., Pernigotto, G., and Mahdavi, A. (2015). Combined effects of diffuse fraction and tilted surface radiation models. In *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling, ECPPM 2014*, pages 251–257.

[Rahoma, 2011] Rahoma (2011). Application of neuro-fuzzy techniques for solar radiation. *Journal of Computer Science*, 7(10):1605–1611.

[Rakovec and Zakšek, 2012] Rakovec, J. and Zakšek, K. (2012). On the proper analytical expression for the sky-view factor and the diffuse irradiation of a slope for an isotropic sky. *Renewable Energy*, 37(1):440–444.

[Rakovec and Zakšek, 2015] Rakovec, J. and Zakšek, K. (2015). Corrigendum of the paper "On the proper analytical expression for the sky-view factor and the diffuse irradiation of a slope for an isotropic sky". Technical report.

[Ramírez-Faz et al., 2015] Ramírez-Faz, J., López-Luque, R., and Casares, F. J. (2015). Development of synthetic hemispheric projections suitable for assessing the sky view factor on vertical planes. *Renewable Energy*, 74:279–286.

[Reda, 2011] Reda, I. (2011). Method to calculate uncertainties in measuring shortwave solar irradiance using thermopile and semiconductor solar radiometers. Technical Report NREL/TP-3B10-52194, National Renewable Energy Laboratory, United States.

[Redweik et al., 2013] Redweik, P., Catita, C., and Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 97:332–341.

[Rehman and Nawi, 2011] Rehman, M. and Nawi, N. (2011). Improving the accuracy of gradient descent back propagation algorithm on classification problems. *International Journal on New Computer Architectures and Their Applications*, 1(4):838–847.

[Rehman and Mohandes, 2008] Rehman, S. and Mohandes, M. (2008). Artificial neural network estimation of global solar radiation using air temperature and relative humidity. *Energy Policy*, 36(2):571–576.

[Reindl et al., 1990a] Reindl, D. T., Beckman, W. A., and Duffie, J. A. (1990a). Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 45(1):1–7.

[Reindl et al., 1990b] Reindl, D. T., Beckman, W. A., and Duffie, J. A. (1990b). Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, 45(1):9–17.

[Revfeim, 1978] Revfeim, K. J. A. (1978). A simple procedure for estimating global daily radiation on any surface. *Journal of Applied Meteorology*, 17(8):1126–1131.

[Ridley et al., 2010] Ridley, B., Boland, J., and Lauret, P. (2010). Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy*, 35(2):478–483.

[Riedmiller and Braun, 1993] Riedmiller, M. and Braun, H. (1993). A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. In *IEEE International Conference on Neural Networks*, pages 586–591 vol.1.

[Rigollier et al., 2000] Rigollier, C., Bauer, O., and Wald, L. (2000). On the clear sky model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas — with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, 68(1):33–48.

[Robinson, 1966] Robinson, N. (1966). *Solar Radiation*. Elsevier, New York.

[Robinson and Stoch, 1964] Robinson, N. and Stoch, L. (1964). Sky radiation measurement and corrections. *Journal of Applied Meteorology*, 3:179–181.

[Rosen et al., 1989] Rosen, M. A., Hooper, F. C., and Brunger, A. P. (1989). The characterization and modelling of the diffuse radiance distribution under partly cloudy skies. *Solar Energy*, 43(5):281–290.

[Rosenblatt, 1962] Rosenblatt, F. (1962). *Principles of neurodynamics: Perceptrons and the theory of brain mechanisms*. Spartan, New York.

[Ruiz et al., 2002] Ruiz, E., Soler, A., and Robledo, L. (2002). Comparison of the Olmo model with global irradiance measurements on vertical surfaces at Madrid. *Energy*, 27(10):975–986.

[Rumelhart et al., 1986] Rumelhart, D., Hinton, G., and Williams, R. (1986). *Learning internal representations by error propagation*. MIT Press, Cambridge.

[Salkind and Escalona, 1999] Salkind, N. J. and Escalona, R. L. (1999). *Métodos de Investigación*. Pearson Educación, Madrid.

[Saluja and Muneer, 1987] Saluja, G. S. and Muneer, T. (1987). An anisotropic model for inclined surface solar irradiation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 201(1):11–20.

[Saluja and Muneer, 1988] Saluja, G. S. and Muneer, T. (1988). Estimation of ground-reflected radiation for the United Kingdom. *Building Services Engineering Research and Technology*, 9(4):189–195.

[Sánchez et al., 2012] Sánchez, G., Serrano, A., Cancillo, M. L., and García, J. A. (2012). Comparison of shadow-ring correction models for diffuse solar irradiance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D9):D09206.

[Sanchís, 1999] Sanchís, S. (1999). *Fundamentos físicos para ingenieros*. Universidad Politécnica de Valencia, Spain.

[Scales, 1985] Scales, L. (1985). *Introduction to Non-Linear Optimization*. Springer-Verlag, New York.

[Schuetze, 2013] Schuetze, T. (2013). Integration of photovoltaics in buildings: Support policies addressing technical and formal aspects. *Energies*, 6(6):2982–3001.

[Scott and Boland, 2014] Scott, L. C. and Boland, J. W. (2014). Predicting the diffuse fraction of global solar radiation using regression and fuzzy logic.

[Sen, 1998] Sen, Z. (1998). Fuzzy algorithm for estimation of solar irradiation from sunshine duration. *Solar Energy*, 63(1):39–49.

[Sen, 2004] Sen, Z. (2004). Solar energy in progress and future research trends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(4):367–416.

[Sen et al., 2004] Sen, Z., Oztopal, A., and Sahin, A. (2004). Solar irradiation estimation from sunshine duration by geno-fuzzy partial approach. *Energy Sources*, 26(4):377–386.

[Sengupta et al., 2015] Sengupta, M., Habte, A., Kurtz, S., Dobos, A., Wilbert, S., Lorenz, E., Stoffel, T., Renné, D., Gueymard, C., Myers, D. R., Wilcox, S., Blanc, P., and Perez, R. (2015). Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications.

[Sfetsos and Coonick, 2000] Sfetsos, A. and Coonick, A. H. (2000). Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques. *Solar Energy*, 68(2):169–178.

[Siala and Hooper, 1989] Siala, F. M. F. and Hooper, F. C. (1989). A semi-empirical model for the directional distribution of the diffuse sky radiance. In *Renewables- a clean energy solution, Solar Energy Society of Canada*, pages 322–326, Otawa.

[Siala et al., 1987] Siala, F. M. F., Hooper, F. C., and Rosen, M. A. (1987). An investigation of the statistical nature of sky radiance: The relation between mean and standard deviation. In *10th Biennal congress of the Internationnal Solar Energy Society*, pages 3753–3759, Hamburg.

[Silberschatz et al., 2002] Silberschatz, A., Korth, H. F., and Sudarshan, S. (2002). *Database System Concepts*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, on-line, 4th edition.

[Skartveit and Asle Olseth, 1986] Skartveit, A. and Asle Olseth, J. (1986). Modelling slope irradiance at high latitudes. *Solar Energy*, 36(4):333–344.

[Skartveit and Olseth, 1987] Skartveit, A. and Olseth, J. A. (1987). A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. *Solar Energy*, 38(4):271–274.

[Soler, 1990a] Soler, A. (1990a). Dependence on latitude of the relation between the diffuse fraction of solar radiation and the ratio of global-to-extraterrestrial radiation for monthly average daily values. *Solar Energy*, 44(5):297–302.

[Soler, 1990b] Soler, A. (1990b). Statistical comparison for 77 European stations of 7 sunshine-based models. *Solar Energy*, 45(6):365–370.

[Specht, 1991] Specht, D. F. (1991). A general regression neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2(6):568–576.

[Spencer and Gaston, 1978] Spencer, D. E. and Gaston, E. A. (1978). Diffuse and specular components of reflectance: Why and how. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 7(4):240–248.

[Spencer, 1971] Spencer, J. W. (1971). Fourier Series representation of the position of the Sun. *Mail Archive*, 2.

[Stegou et al., 2007] Stegou, A., Antonopoulos, K., Angelopoulou, C., and Kotsiovelos, G. (2007). The impact of glazing on energy consumption and comfort. *Energy Conversion and Management*, 48(11):2844–2852.

[Stephenson, 1967] Stephenson, D. G. (1967). *Tables of solar altitude, azimuth, intensity and heat gain factors for latitudes from 43 to 55 degrees North.* National Research Council of Canada. Division of Building Research, Otawa.

[Steven and Unsworth, 1980] Steven, M. and Unsworth, H. (1980). The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 106(447):57–61.

[Steven and Unsworth, 1979] Steven, M. and Unsworth, M. (1979). The diffuse solar irradiance of slopes under cloudless skies (in Britain). *Quarterly Journal, Royal Meteorological Society*, 105(445):593–602.

[Steven, 1984] Steven, M. D. (1984). The anisotropy of diffuse solar radiation determined from shade-ring measurements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 110(463):261–270.

[Stoffel et al., 2010] Stoffel, T., Myers, D. R., Wilcox, S., Sengupta, M., George, R., and Turchi, C. (2010). Concentrating solar power: Best practices handbook for the collection and use of solar resource data. Technical Report NREL/TP-550-47465, National Renewable Energy Laboratory.

[Stone, 1993] Stone, R. J. (1993). Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, 51(4):289–291.

[Stone, 1994] Stone, R. J. (1994). A nonparametric statistical procedure for ranking the overall performance of solar radiation models at multiple locations. *Energy*, 19(7):765–769.

[Strzalka et al., 2012] Strzalka, A., Alam, N., Duminil, E., Coors, V., and Eicker, U. (2012). Large scale integration of photovoltaics in cities. *Applied Energy*, 93:413–421.

[Sugeno, 1977] Sugeno, M. (1977). *Fuzzy measures and fuzzy integrals: A survey.* Fuzzy Automata and Decision Processes. North-Holland, New York.

[Sugeno, 1985] Sugeno, M. (1985). *Industrial applications of fuzzy control.* Elsevier Science Pub. Co., New York.

[Sumithira and Kumar, 2012] Sumithira, T. R. and Kumar, A. N. (2012). Prediction of monthly global solar radiation using adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) technique over the State of Tamilnadu (India): A comparative study. *Applied Solar Energy*, 48(2):140–145.

[Takagi and Sugeno, 1985] Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15(1):116–132.

[Taylor, 2001] Taylor, K. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7):7183–7192.

[Temps and Coulson, 1977] Temps, R. C. and Coulson, K. L. (1977). Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, 19(2):179–184.

[Tham et al., 2009] Tham, Y., Muneer, T., and Davison, B. (2009). Evaluation of simple all-sky models to estimate solar radiation for the UK. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 4(4):258–264.

[Threlkeld, 1962] Threlkeld, J. L. (1962). Solar irradiation on surfaces on clear days. *ASHRAE Journal*, 4:43–54.

[Tian et al., 2001] Tian, Y. Q., Davies-Colley, R. J., Gong, P., and Thorrold, B. W. (2001). Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(1):67–74.

[Torres et al., 2010] Torres, J. L., de Blas, M., García, A., Gracia, A., and de Francisco, A. (2010). Sky luminance distribution in Pamplona (Spain) during the summer period. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72(5–6):382–388.

[Tregenza, 1999] Tregenza, P. R. (1999). Standard skies for maritime climates. *Lighting Research and Technology*, 31(3):97–106.

[Tulcan-Paulescu and Paulescu, 2007] Tulcan-Paulescu, E. and Paulescu, M. (2007). Fuzzy modelling of solar irradiation using air temperature data. *Theoretical and Applied Climatology*, 91(1-4):181–192.

[UNEF, 2014] UNEF (2014). La energía fotovoltacia conquista el mercado. Informe anual 2014. Technical report, Unión Española Fotovoltaica.

[University of Berkley, 2012] University of Berkley (2012). Simulation Research Group - Berkely Lab: http://gundog.lbl.gov. Last checked on May 2015.

[University of Paderborn, 2011] University of Paderborn (2011). SolarIgel: http://www.nek.uni-paderborn.de/forschung/solar-igel. Last checked on May 2015.

[UPM, 2015] UPM (2015). HELIOS-IES database: http://helios.ies-def.upm.es. Last checked on May 2015.

[US Dep. of Energy, 2015] US Dep. of Energy (2015). ARM Climate Research Facility: http://www.arm.gov. Last checked on May 2015.

[Usher and Muneer, 1989] Usher, J. R. and Muneer, T. (1989). Case studies in solar radiation modelling. *Mathematical and Computer Modelling*, 12(9):1155–1165.

[Vignola et al., 2012] Vignola, F., Michalsky, J., and Stoffel, T. (2012). *Solar and Infrared Radiation Measurements*. Energy and the Environment. CRC Press, Boca Raton.

[Voyant et al., 2014] Voyant, C., Haurant, P., Muselli, M., Paoli, C., and Nivet, M.-L. (2014). Time series modeling and large scale global solar radiation forecasting from geostationary satellites data. *Solar Energy*, 102:131–142.

[Wadi Abbas Al-Fatlawi et al., 2015] Wadi Abbas Al-Fatlawi, A., Rahim, N. A., Saidur, R., and Ward, T. A. (2015). Improving solar energy prediction in complex topography using artificial neural networks: Case study Peninsular Malaysia. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, In press.

[Wasserman, 1993] Wasserman, P. (1993). *Advanced Methods in Neural Computing*. Van Nostrand Reinhold, New York.

[Werbos, 1974] Werbos, P. (1974). *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences*. PhD thesis, Harvard University, USA.

[Willmott, 1981] Willmott, C. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2):184–194.

[Willmott, 1982a] Willmott, C. J. (1982a). On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, 28(3):205–216.

[Willmott, 1982b] Willmott, C. J. (1982b). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11):1309–1313.

[WMO, 2003a] WMO (2003a). Guidelines on climate metadata and homogenization. Technical Report WCDMP-No. 53, WMO-TD No. 1186, World Meteorological Organization, Ginebra.

[WMO, 2003b] WMO (2003b). Guidelines on climate observation networks and systems. Technical Report WCDMP-No. 52 WMO-TD No. 1185, World Meteorological Organization, Ginebra.

[WMO, 2007] WMO (2007). Directrices sobre la gestión de datos climáticos. Technical Report WCDMP-No. 60 - WMO-TD No. 1376, World Meteorological Organization, Ginebra.

[WMO, 2013] WMO (2013). *Guide to the Global Observing System*. Number 488 in WMO. WMO, Ginebra, 2013 edition.

[Wood, 2002] Wood, J. G. (2002). Solar radiation sensor. Patent US 6417500-B1 (USA).

[Wu et al., 2014] Wu, J., Chan, C. K., Zhang, Y., Xiong, B. Y., and Zhang, Q. H. (2014). Prediction of solar radiation with genetic approach combing multi-model framework. *Renewable Energy*, 66:132–139.

[Yadav and Chandel, 2014a] Yadav, A. K. and Chandel, S. S. (2014a). Solar radiation prediction using artificial neural network techniques: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33:772–781.

[Yadav et al., 2014] Yadav, A. K., Malik, H., and Chandel, S. S. (2014). Selection of most relevant input parameters using WEKA for artificial neural network based solar radiation prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31:509–519.

[Yadav and Chandel, 2014b] Yadav, P. and Chandel, S. (2014b). Comparative analysis of diffused solar radiation models for optimum tilt angle determination for Indian locations. *Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika)*, 50(1):53–59.

[Yager, 1980] Yager, R. (1980). On a general class of fuzzy connectives. *Fuzzy Sets and Systems*, 4:232–242.

[Yao et al., 2015] Yao, W., Li, Z., Zhao, Q., Lu, Y., and Lu, R. (2015). A new anisotropic diffuse radiation model. *Energy Conversion and Management*, 95:304–313.

[Yoon et al., 2014] Yoon, K., Yun, G., Jeon, J., and Kim, K. S. (2014). Evaluation of hourly solar radiation on inclined surfaces at Seoul by photographical method. *Solar Energy*, 100:203–216.

[Zadeh, 1965] Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353.

[Zadeh, 1973] Zadeh, L. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 3(1):28–44.

[Zadeh, 1989] Zadeh, L. (1989). Knowledge representation in fuzzy logic. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1:89–100.

SUMMARY

Summary and conclusions of the Thesis.

Characterisation of Solar Diffuse Irradiance on Vertical Surfaces: Summary

Miguel de Simón-Martín

University of Burgos – October, 2015

Ph.D. Thesis

Contents

1 Introduction **2**
1.1 Preamble . . . 2
1.2 Motivation . . . 4
1.3 Background . . . 6
1.4 Objectives . . . 6
1.5 Tools and methods . . . 6
1.6 Published results . . . 7
1.7 Thesis structure . . . 8

2 Summary of chapters **10**
2.1 Models of diffuse and reflected irradiance on a tilted plane . . . 10
2.2 Correction factors for solar diffuse irradiance measures . . . 11
2.3 Clearness estimators and sky classification . . . 14
2.4 The measuring programme and processing of data . . . 14
2.5 Measuring and modelling the albedo's irradiance . . . 15
2.6 Prototype MK6 for measuring the diffuse irradiance . . . 15
2.7 Correction factors for the MK6 measurements . . . 17
2.8 Sky type identification and characterisation in Burgos . . . 17
2.9 Analysis of transposition models on vertical surfaces . . . 20

3 Conclusions and main contributions **20**
3.1 Conclusions . . . 24
3.2 Thesis contributions . . . 27
3.3 Future work . . . 28

References **34**

1 Introduction

1.1 Preamble

It is clear that gaining an in-depth knowledge of the available solar resource is of the utmost importance. It can be used in very different fields, such as meteorological forecasting, biology, agriculture, energy, architecture, and so on. Moreover, it should not be forgotten that knowledge of the potential of solar radiation is necessary for diversifying energy and dimensioning heating and air-conditioning systems, as well as for the intelligent use of renewable energies. The design, dimensioning and calculation of solar-energy-based systems requires precise knowledge of the amount of global irradiance and the direct, diffuse and reflected components of it that fall on surfaces that are horizontal or inclined in any direction. The fruit of studies in this field allows the development and implementation of many different systems; for example photovoltaic technology [50], the calculation of thermal loads and cooling in buildings [7], the design of efficient solar collectors [61], and an infinite number of other technological applications that have the objective of increasing human well-being and comfort [8, 13].

Characterising solar energy is a complex task. The irradiance from the sun that reaches the outer part of the atmosphere can be considered as practically constant over time (hence the definition of the solar constant as irradiance at the extra-terrestrial level, with a value of $B_{sc} = 1\,367$ W·m^{-2}, according to the World Meteorological Organization [70]). However, the irradiance that reaches any point on the Earth's surface is affected by quasi-random phenomena such as the absorption and scattering produced by the gases of the atmosphere, aerosols or particles in suspension. For this reason, obtaining systematic and reliable measures of solar potential at the surface level is fundamentally important and not a trivial matter [2]. However, and despite the increase over the last decade in climatological stations with the capacity to measure variables related to the magnitudes of solar irradiance in developed countries, the density of these stations is still very low due to the extent of the Earth's surface. To give an example, on average, ground stations in the United States in 2008 covered approximately 1% of the territory. The world average is estimated at 5% [58]. Moreover, databases built on measures made by these stations are not always complete, especially with regard to the measuring of the components of irradiance, due to cost and the difficulties of calibrating, operating and maintaining of the equipment. This leads directly to the need to develop and validate models or theories that allow us to estimate irradiance values from the available set of data, in the simplest and most precise way possible.

Since the Maastricht Treaty in 1992, the European Union's energy and environmental target has been to promote sustainable and environmentally friendly growth in its member

countries. Having set the goal of a 12.5% contribution from renewable energies with respect to total consumption for the year 2010, at the 2004 Berlin Conference the recommendation was made that the percentage of renewable energies for the year 2020 should reach 20% of the total consumption of energy [19]. This was established through the Horizon 2020 plan [18]. Prescriptions were also made in the Kyoto Protocol on climate change [17], which many European countries, including Spain, signed up to. As is well known, the protocol created an obligation to lower emissions of greenhouse gases such as CO_2, which are produced mainly by the majority of transportation forms and by current systems for generating thermal and electrical energy. Within this framework, one of the paths to the achievement of the stated objectives is the development of new energy strategies within urban environments.

The type and characteristics of the data that are required depend on the intended application and on the user. So, for example, determining the average monthly or daily value may be sufficient for climatological studies or for estimating energy production in large installations. On the other hand, hourly or even instantaneous data are necessary for simulating the performance of solar collectors or the charging or uncharging processes of vehicles, or for thermal studies of building envelopes, among other applications.

A significant level of energy is consumed in urban environments, as a result of which the development of methods and technologies that integrate solar photovoltaic and/or thermal elements has recently become of increasing interest. Policies focused on distributed generation, net balance or the construction of *"Nearly Zero Energy Buildings"* (nZEB) have been supported by both photovoltaic and thermal solar technology through their modularity and easy adaptability to any structure. The nZEB concept has been considerably strengthened by European energy policies such as EU Directive 2002/91/EC [16], consolidated in Directive 2010/31/EU [15], which demands that from 2019 all newly constructed buildings that are occupied and property of public entities be nZEBs, and that by the end of 2020 all newly constructed buildings be of this type. This new construction trend allows buildings to be practically independent from the electricity network and other energy infrastructure, thanks mainly to the integration of sources of renewable energy in the architectural design (particularly in *"Building Integrated Photovolatic"* (BIPVs)), maximization of ventilation and natural light, a lowering and optimization of consumption, and so on [25, 48].

The integration of photovoltaic generators in buildings envelopes, giving rise to BIPV systems, offers immense potential. In Germany, for example, the integration of photovoltaic systems in buildings may allow up to 50% of demand for electricity to be covered [56]. Other studies indicate that there could be electrical energy savings of between 30% and 50% [65]. In any case, there would be a significant advance towards energy sustainability and self-sufficiency and, therefore, this development seems like it will be unstoppable in

the coming years. However, the harnessing of solar energy via building façades can be achieved in many ways, and especially through the incorporation of thermal and photovoltaic modules [52].

Paradoxically, the development of solar energy systems in recent decades, while extensive, has always been focused on large energy-production plants (popularly known as solar farms) or, in contrast, on small and isolated facilities in rural settings that need an autonomous energy supply. Both scenarios differ completely from the average situation of an urban environment [31, 47, 57]. While in the rural context energy restrictions mainly reside in the assessment of meteorological conditions, in urban environments though aditional geometric restrictions exist cast shadows on potential surfaces, and so forth. These conditions need to be evaluated and studied in order to develop effective tools that allow the use of the solar resource and an optimal design of urban solar plants. The study of global irradiance on the horizontal surface is not enough. The study of the diffuse component is also very important.

As it can be seen in figure 1, modelling diffuse irradiance on inclined and vertical surfaces requires several transformations and chains of models depending on the available model input data. In our case, although k_t, k_d and k_b models will be slightly studied (since the most common available data are global horizontal irradiance measurements), we will focus on the R_d and R_r models, which transform global horizontal and diffuse horizontal irradiances into reflected and diffuse irradiance on any given plane. We also want to remark that most of the models found in the literature have been developed to estimate irradiance on inclined planes, pointing the Equator (equatorial direction). Thus, a complete analysis on several directions is worth of interest.

1.2 Motivation

The measurement and estimation of the solar resource over different surfaces, is the key aspect of this work. Solar energy based generators can be installed on surfaces with any orientation and tilting angles, depending on the geometry of the base structure. Moreover, the solar irradiance depends on the weather, the location and the shadows projected by other buildings, dense vegetation or infrastructure of various types. Thus, it results worth of interest the study of the irradiance on surfaces not pointing the optimal horizon free directions. This fact means that, the usual estimation of the solar resource through only considering global irradiance is insufficient. In this context, it becomes essential to accurately measure and model the spatial distribution of the solar radiance [6, 51].

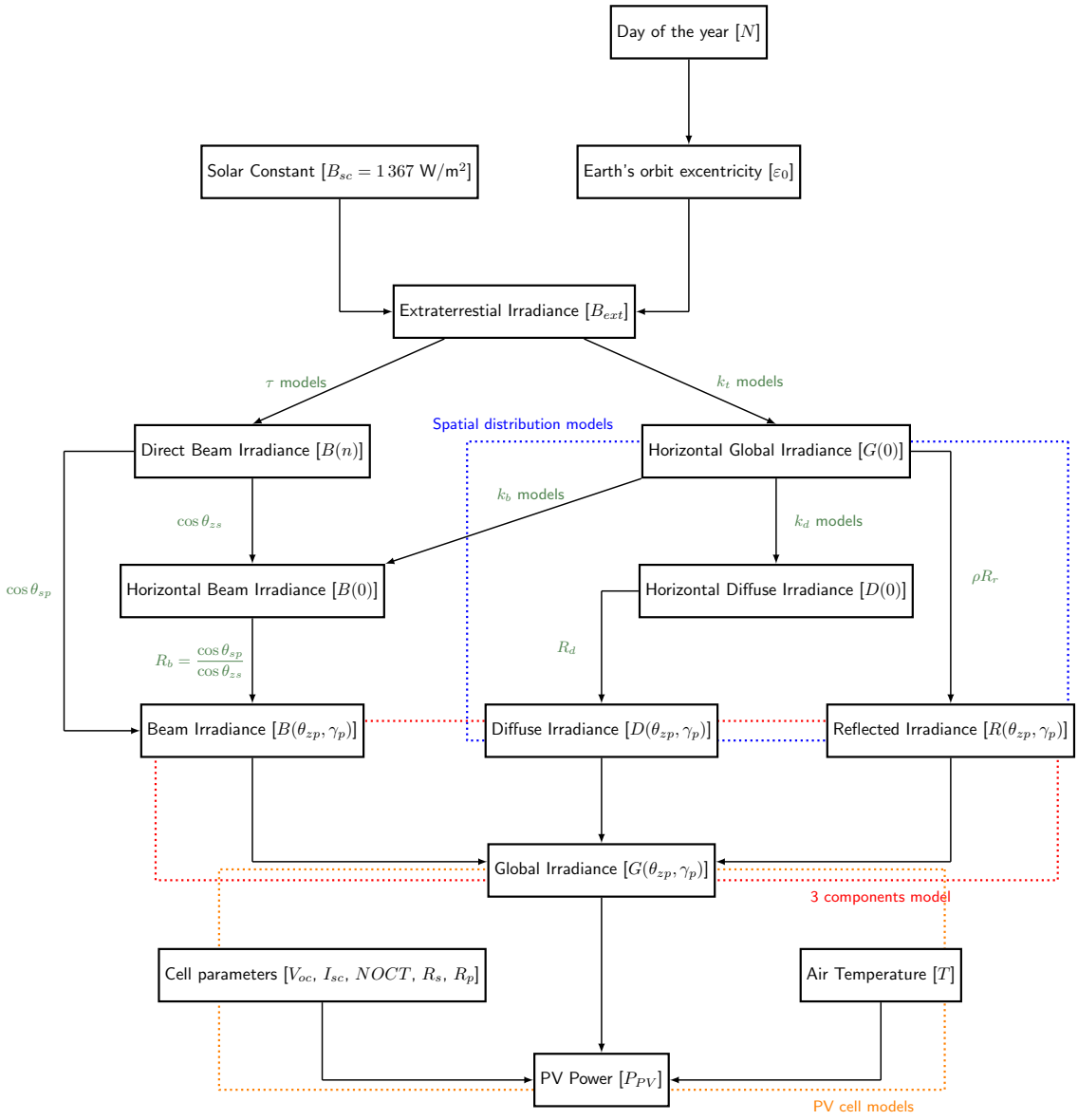


Figure 1: Modelling module of solar irradiance.

1.3 Background

This Doctoral Thesis is part of a research strand initiated by Dr. Montserrat Díez Mediavilla's Doctoral Thesis entitled *"Measures and modelling of diffuse solar radiation on inclined surfaces"*, which was completed at the Universidad de Valladolid in July 2001. This strand was continued by the Universidad de Burgos' Solar and Wind Feasibility Technologies (SWIFT) research group. This research strand aims to improve the design and performance of systems based on photovoltaic, thermal or hybrid solar technologies. It takes the view that the modelling of solar radiation in all of its components and on tilted surfaces is essential for the achievement of this objective.

Furthermore, previous research works of the author in the field of sun-tracking [9, 10] have shown that, i.e. in order to optimise the programming of sun-tracking devices specifically designed for building integration [11, 12], studies about the spatial distribution of the radiance are mandatory.

1.4 Objectives

The research project objective which includes this Doctoral Thesis is **to characterise the solar diffuse and reflected irradiance on non-horizontal surfaces**, by statiting its measurement and modelling. The following specific issues arise from this statement:

1. Analysing the State-of-the-Art of the different existing models for estimating solar irradiance on inclined planes of any orientation.
2. Measuring diffuse irradiance on several tilted and oriented planes.
3. Analysing the influence atmospheric conditions on the transposition models.
4. Evaluating the most relevant transposition models with the measurements.
5. Ranking those models by its performance according to statistical estimators.

1.5 Tools and methods

In this research work, methodologies from fundamental, empirical and technological research have been applied. According to [55], the carried out research process has been descriptive and the empirical-analytical method has been followed, based on empirical logic and experimentation.

In order to implement this Doctoral Thesis, three main software tools for the development of the calculations and the design of processes involved were used: MATLAB, phpMyAdmin and CATIA.

MATLAB, the software and high-level programming language, is an acronym for MATrix LABoratory. It has been developed by the company MathWorks since 1984, based on the C and JAVA programming languages. It is very widely and generically used in industrial and scientific environments. MATLAB provides a variety of functions and algorithms that, in the form of libraries, perform the operations most commonly requested by users, as well as more complex applications, which are also called *"toolboxes"* and allow common problems in different fields of knowledge to be solved. The version used here was R2013a.

PhpMyAdmin is a free piece of software developed in php programming language. It allows databases developed in MySQL to be administered from a Web interface. One of the main advantages of this software and MySQL is that it is possible to communicate with and consult data from MATLAB.

CATIA is based on Dassault Systèmes's 3D-EXPERIENCE platform and allows a multitude of design, engineering and system engineering applications to be developed. Through this software, it was possible to design and simulate the prototype station for measuring diffuse irradiance. The version used was CATIA V5R16.

1.6 Published results

Although all the obtained results in this Thesis have not been published yet, some of them have already shown to the scientific comunity. The most relevant of them are:

Scientific journal articles

2015 de Simón-Martín, M., Alonso-Tristán, C., González-Peña, D. and Díez-Mediavilla, M., *"New device for the simultaneous measurement of diffuse solar irradiance on several azimuth and tilting angles,"* Solar Energy, Elsevier. 2015. Vol. 119, pp. 370-382. DOI: 10.1016/j.solener.2015.06.001. (Impact Factor 2014: 3.496, Q1).

Patents and software licences

2015 de Simón-Martín, M., *"Software de optimización y simulación de estación radiométrica multidireccional,"* Spain. 2015. Under application process.

2014 de Simón-Martín, M., Díez-Mediavilla, M., Alonso-Tristán, C. and González-Peña,

D., *"Dispositivo de medida de radiación difusa y procedimiento de utilización del mismo,"* Spain. Application date: 8th September, 2014. Reference: P201400714.

Conference proceedings

2015 de Simón-Martín, Alonso-Tristán, C. and Díez-Mediavilla, M., *"Cálculo analítico e interpretación de la incertidumbre de la medida de irradiancia solar global, difusa y reflejada,"* II Jornada de doctorandos de la Universidad de Burgos. Burgos (Spain), December, 2015, Escuela de Doctorado. In press.

2015 de Simón-Martín, M., González-Peña, D., Alonso-Tristán, C. and Díez-Mediavilla, M., *"Diseño y puesta en marcha de una micro-red de estaciones radiométricas en Castilla y León,"* 9º Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica (9CNIT). Cartagena (Spain), June 3rd- 5th, 2015, Universidad Politécnica de Cartagena. Vol. 1, pp. 495-504. ISBN: 978-84-606-8931-7. DOI: 10.13140/RG.2.1.1226.4804.

2014 de Simón-Martín, M., Díez-Mediavilla, M. and Alonso-Tristán, C., *"Diffuse Solar Energy Measurement on Vertical Surfaces: Instrument Design,"* 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (PVSEC'14). Amsterdam (The Netherlands), September 22nd- 26th, 2014, WIP Renewable Energies. Vol. 1, pp. 3467-3471, ISBN: 3-936338-28-0, DOI: 10.4229/29thEUPVSEC2014-5DV.5.33.

2014 de Simón-Martín, M., González-Peña, D., Díez-Mediavilla, M. and Alonso-Tristán, C., *"Medida de radiación solar difusa sobre paramento vertical,"* I Jornada de doctorandos de la Universidad de Burgos. Burgos (Spain), December 17th, 2014, Escuela de Doctorado. Vol. 1, pp. 111-116, ISBN: 978-84-16283-05-7.

2013 de Simón-Martín, M., Díez-Mediavilla, M. and Alonso-Tristán, C., *"Modelling solar data: reasons, main methods and applications,"* International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13). Bilbao (Spain), March 20th- 22nd, 2013, European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ). ISSN: 2172-038X, ISBN: 978-84-615-6648-8. **Best Poster Award**.

1.7 Thesis structure

Structuring a work that is as interdisciplinary as this one is a difficult task. However, an approach that aims to present the concepts developed in a way that is as clear and well ordered as possible has been adopted. Accordingly, the thesis is structured around three key parts:

- Part I: Theoretical framework.
- Part II: Irradiance measurement.
- Part III: Conducted studies.

The first part provides a theoretical introduction to the topic under study, as well as reference to those work, which constitute the State-of-the-Art. Worth highlighting from this part is the review of the existing transposition models for diffuse and reflected solar irradiances. Next, the isotropic and anisotropic correction models for diffuse measures taken by shadow ring devices are presented. Here, the classical theory for horizontal or equator pointing sensors is extended to any given orientation and tilting angles for the pyranometer. Finally, the most widespread clearness estimators and sky type classification procedures are explained. Part I is then structured according to the following chapters:

Chapter 1: Models of diffuse and reflected irradiance on a tilted plane.

Chapter 2: Correction factors for solar diffuse irradiance measures.

Chapter 3: Clearness estimators and sky classification.

The second part focuses on experimental campaign designed for this research including the proposed prototype for the measuring of diffuse irradiance on multiple surfaces simultanously. First, the measuring schedule carried out and the data-management system implemented to smoothly and easily handle the enormous amount of information generated by the different measuring systems available is described. Calculated measurement uncertainties of all the irradiance sensors can be seen also in this part. Then, the measuring and modelling process of the albedo's irradiance is explained. Ground-reflectance has modelled according to 4 methods and the optimal one has been chosen to implement the transposition models. Next, a detailed description, calculation and design of an innovative station for simultaneously measuring diffuse solar irradiance on planes with different orientations and angles of inclination is provided. The device that was designed complies with the criteria of high reliability; simplicity of calibration operation and maintenance; and low cost. However, successive improvements are progressively being made to the design of the original prototype. This part also presents an analysis and calculation of the total correction factor, compromising a purely geometric factor and another that evaluates anisotropic discrepancies, which is necessary to ensure that the measurements have a high level of reliability. Part II is composed of the following chapters:

Chapter 4: The measuring programme and processing of data.

Chapter 5: Measuring and modelling the albedo's irradiance.

Chapter 6: Prototype MK6 for measuring the diffuse irradiance.

Chapter 7: Correction factors for the MK6 measurements.

The third part comprises the results of the carried out studies. In terms of the implementation and analysis of the models, it is worth highlighting the prior study and the establishment of a unified procedure for classifying the different types of sky –an aspect over which experts in this field have not reached a clear agreement– and the exhaustive validation procedure for the models, based on relevant scenarios that include different orientations and several atmospheric conditions or sky types. The models are ranked using different statistical estimators that are compared visually using Taylor Diagrams and a modified version of the Ineichen Diagrams, another innovative aspect of this work. Moreover, a new statistical estimator is proposed to be added to the classical ones, in order to overcome some of their disadvantages. The Thesis concludes with a part that contains the final conclusions, thoughts for future research and the references cited throughout the text. Part III comprises the following chapters:

Chapter 8: Sky type identification and characterisation in Burgos.

Chapter 9: Analysis of transposition models on vertical walls.

Chapter 10: Conclusions and main contributions.

At the end, 4 appendices have been also included to provide additional information regarding the main radiation definitions and Sun's geometrical relations, the existing devices for diffuse irradiance measurement, some particularities of the implemented transposition models and the fundamentals of the applied statistical techniques.

2 Summary of chapters

Down below, appart from the conclusions which will be detailed in the next section, the aspects dealt within each chapter of the Thesis are briefly indicated.

2.1 Models of diffuse and reflected irradiance on a tilted plane

There are many models for determining the value of diffuse irradiance on an inclined plane oriented in an equatorial direction. The extension of the results of models for inclined planes with an equatorial orientation to planes of different orientations is brought about by considering the angle formed by the position of the Sun and the direction vector

that characterises the studied surface. In this chapter, an exhaustive review of the existing and most widely used models is conducted. These models range from the simplest formulations in the end of the 1940s to the most modern techniques based on soft computing. No standardised nomenclature for describing the models is observed; thus some original expressions have been modified to adapt them to an homogeneous nomenclature where appropriate.

Models have been classified into four groups (see Figure 2 and Table 1) on the basis of their characteristics:

Isotropic models: these consider a homogeneous distribution of radiance in the atmosphere. Thus, they are independent of the Sun position in the sky vault.

Anisotropic superposition models: they consider the effects of anisotropy in the circumsolar region and the horizontal band. They evaluate the total diffuse irradiance as the sum or composition of a background isotropic irradiance and one or two components that encompass the anisotropies considered.

Anisotropic models of radiance gradient: these models perform a comprehensive analysis of the angular distribution of radiance, parameterising it in accordance with the zenith and azimuth angles of the differential region of the sky analysed in each case.

Non-parametric models: this group includes models that allow a mapping or adjustment between input variables or estimators and output variables or responses, but without specifying a model or equation that links them. In this case, we have focused on tools developed in recent decades based on automated learning or soft computing. These algorithms, which most of them mimic human inference processes, are powerful tools that can perform as universal aproximators of any unknown function. From the different existing techniques implemented on the basis of their appropriateness for the profile of the problem are fuzzy inference systems, artificial neural networks and neuro-fuzzy networks (combination of both techniques).

In total, 31 models for the calculation of diffuse irradiance on different planes are brought together. Moreover, as the measurements made also include reflected irradiance, 4 more models of apparent ground-reflectance are also analysed. Two of them are isotropic and another two are anisotropic.

2.2 Correction factors for solar diffuse irradiance measures

In this chapter, the correction factor required in order to use the measurements taken with shadowing ring based equipment is calculated. This factor should be applied as indicated

Table 1: Diffuse irradiance models for inclined surfaces.

Irradiance	Type	Group	Model	References	ID
Diffuse	Parametric	Isotropic	Liu & Jordan	[37]	D01
			Tian et al.	[68]	D02
			Badescu	[1]	D03
			Koronakis	[35]	D04
			Olmo	[45, 54]	D05
		Anisotropic	ASHRAE	[38]	D06
		by superposition	Díez-Mediavilla	[14]	D07
			DOE-2	[26]	D08
			Gueymard	[20]	D09
			Hay & Davies	[23, 24]	D10
			Klucher	[34]	D11
			Ma & Iqbal	[39]	D12
			Muneer	[42, 44]	D13
			Perez et al.	[49]	D14
			Reindl	[53]	D15
			Skartveit & Olseth	[46, 60]	D16
			Steven & Usworth	[62, 63]	D17
			Temps & Coulson	[67]	D18
			Willmott	[69]	D19
		Anisotropic	Brunger & Hooper	[4]	D20
		by gradient	CIE 2004	[43]	D21
			TCCD	[27]	D22
			Igawa et al.	[28, 29]	D23
			Moon & Spencer	[41]	D24
			Siala & Hooper	[59]	D25
	Non-parametric	Fuzzy inference	Mamdani	[40]	D26
			Takagi-Sugeno	[66]	D27
		Neural Networks	MLP	[22]	D28
			RBF	[3]	D29
			GRNN	[5]	D30
		Neuro-Fuzzy	ANFIS	[32]	D31
Reflected	Parametric	Isotropic	Iqbal	[30]	R01
			Gueymard	[21]	R02
		Anisotropic	Kambezidis	[33]	R03
			Semiphysical	[20]	R04

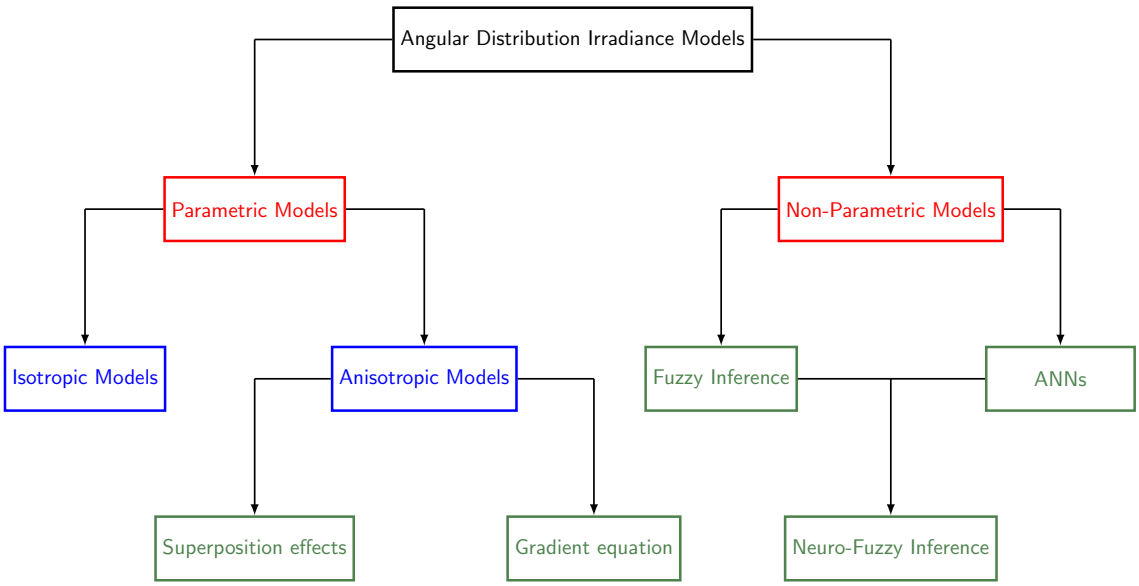


Figure 2: Angular distribution irradiance models scheme.

by equation (1) due to the measurement-taking process itself, which employs a shadow ring over the sensor, which generates an intrinsic error by hiding part of the sky observed by the sensor.

$$f_c = \frac{D_c(\theta_{zp}, \gamma_p)}{D_{uc}(\theta_{zp}, \gamma_p)}. \tag{1}$$

D_c is the measurement of the corrected diffuse irradiance and D_{uc} is the uncorrected measure. The aberration is that the ring itself, which prevents the incidence of direct irradiance on the sensor and therefore allows the measurement in this of the sum of diffuse and reflected irradiance (albedo irradiance can be eliminated if the corresponding anti-albedo shields are installed in the device), represents a quantifiable obstruction in the field of the view of the sensor.

The fraction of the sky observed, as well as the proportion of the sky hidden by the ring or other obstructions on the horizon, is analysed by the so-called *"sky-view factor"*, which is described in the first section of the chapter. Once the obstruction of the sensor's field of view has been determined, it is necessary to quantify the quantity of irradiance that the obstacle has prevented from reaching it. If we consider an isotropic distribution of the diffuse irradiance in the atmosphere, only a geometric analysis is required, which in the consulted literature has only been developed for devices placed on horizontal plane or planes inclined in an equatorial direction. It was, therefore, necessary to carry out a generalised analysis for any orientation and inclination of the sensor. The factor that determines this correction has been called the *"geometric or isotropic correction factor"*.

However, it is known that the distribution of diffuse radiance is not homogeneous or

isotropic, especially on days with clear skies. It is, therefore, necessary to make a correction that also takes into account the anisotropic effects of the distribution of radiance, such as those produced in the circumsolar region or in the vicinity of the horizon. A *"total correction factor"* is thereby determined. Various authors have determined expressions to quantify this last factor, but their models have only been verified in the case of sensors on the horizontal plane or a plane inclined in an equatorial direction. Therefore, such expressions have been studied and generalisated to any orientation and tilting angles, managing all possible cases.

2.3 Clearness estimators and sky classification

One of the key aspects in the definition and modelling of solar irradiance–especially diffuse irradiance–is the characterisation of the type of sky. The problem rests in defining, using a numerical variable or index, a concept as diffuse as *"clear sky"* or *"completely cloudy sky"* and all the possible intermediate levels that could be defined, such as *"partially clear"*, *"intermediate sky"*, *"partially cloudy"*, and so on. At present, there is no unified criterion to formulate such a definition. To solve this, some authors have defined the so-called *"clarity indexes"*, i.e. numerical variables that classify the sky types at intervals within the scale defined by the index minimum and maximum values. On the other hand, the International Commission on Illumination (CIE) offers a classification of the 15 types of sky in accordance with the spatial distribution of radiance, but it does not indicate a standardised index to determine, a priori, the sky standard.

A review of the main indexes and classifications of the associated types of sky is provided. In total, 9 different indexes are discussed; these are the most widespread in the literature. The chapter ends by describing the characteristics of the CIE Standard model to classify the sky conditions and the existing procedures to apply it.

2.4 The measuring programme and processing of data

In order to be able to evaluate the performance of the different models described, a measuring campaign from September 2014 to April 2015 was conducted. Measures include global and diffuse irradiance in different directions, global and diffuse horizontal irradiance, direct irradiance and albedo irradiance. Other meteorological measures are also available. Data collection was carried out in accordance with the standards and procedures recommended by the WMO, NREL and AEMET, thereby ensuring their quality and reliability. These data were stored in a comprehensive database, following the normal forms and applying the appropriate denormalization to optimize its fluidity and performance, in addition to other collected data from the SWIFT micro-net and AEMET. In this chapter, the process-

ing of the measures taken, applied quality filters and database design and implementation is described. Moreover, uncertainties for all solar sensors have been calculated.

2.5 Measuring and modelling the albedo's irradiance

For vertical surfaces, half of their field of view is made up by the sky and the other half by the surrounding ground. Ground-reflected irradiance is then a significant part of the irradiance incident on the surface which is not direct beam. Thus, a detailed study of the albedo's is mandatory to test the transposition models on this kind of surfaces. More than 600 albedo's measures have been carried out in April 2015 in Burgos and obtained values have been modelled by the described models in chapter 1. It has been concluded that the most accurate model is the Iqbal model, which states an isotropic constant distribution. The obtained value for the apparent ground-reflectance is:

$$\rho = 0.1519 \pm 0.0046. \tag{2}$$

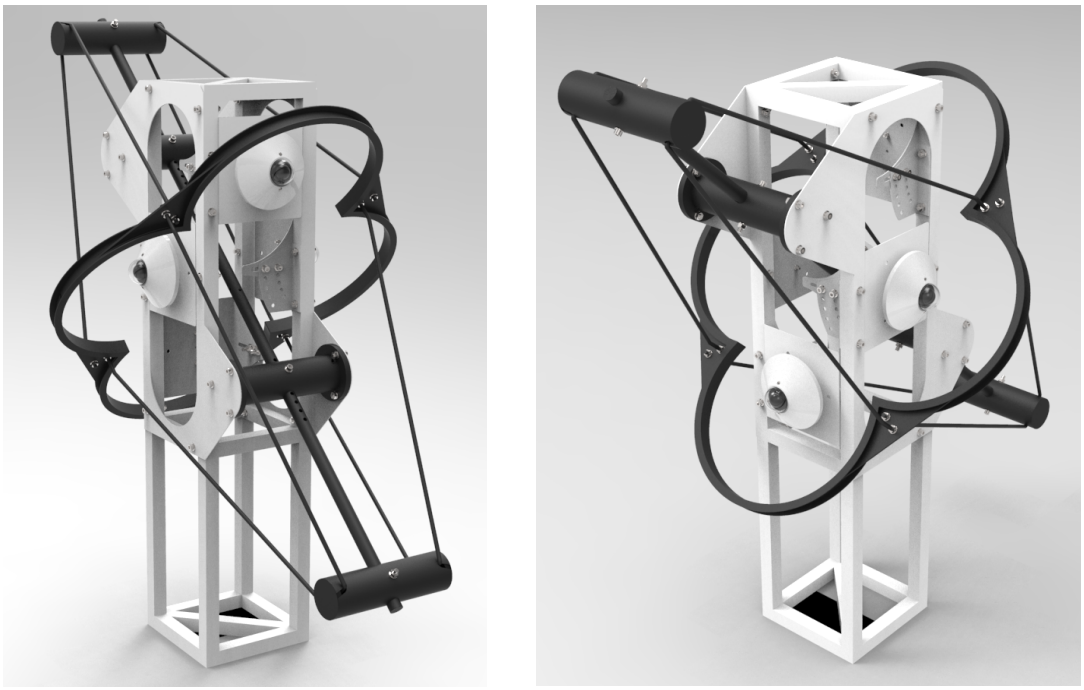
This result is close to the general approach of $\rho = 0.2$ widely observed in the literature.

2.6 Prototype MK6 for measuring the diffuse irradiance

In this chapter, a prototype of the diffuse irradiance measuring equipment, known as *"MK6"*[1], is presented. It allows the simultaneous measurement of diffuse irradiance in the four cardinal directions and on planes that form angles of inclination between 60 and 90 degrees with the horizontal. The biggest advantage and the innovation of the proposed device is that it only requires the correct positioning of a single shadow ring, wich has a multilobular shape. Its innovative design makes it easy, simple and costless to simultaneously shade multiple pyranometers with different orientations. Figures 3 show the front and rear views of the prototype. Observed sensors in this case must be pointing the cardinal directions.

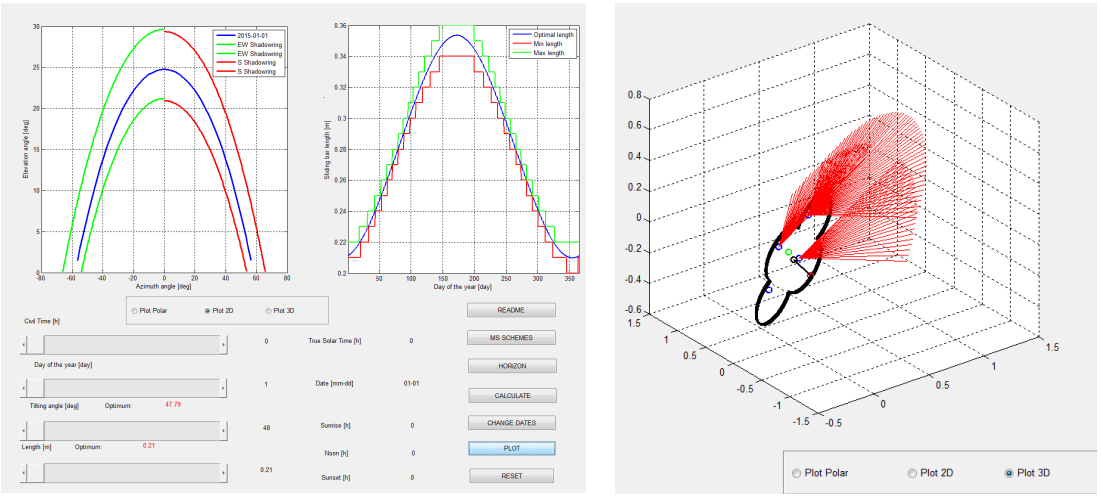
The constructive design bases and physical geometric restrictions that need to be saved for the device to fulfil its mission in conditions of normal operation are detailed first. Then the process of design, development and construction, from the first versions and prototype testing to the version finally developed and currently in operation is described. A detailed study of the geometric sensitivity of the device and its effects on the relative positioning operation of the shadow ring relative to the sensors is also performed. Moreover, the calculation procedure for the dates of change to the position of the ring over the year, so that it adapts to the variations of the angle of solar declination, without affecting the

[1] *"MK"* is an abbreviation of *"mark"*, a term regularly used in industrial terminology to refer to a series or versions of products.



(a) Front view. (b) Rear view.

Figure 3: MK6 vertical solar diffuse irradiance measurement device.



(a) Part of the main menu. (b) 3D simulation.

Figure 4: MK6 optimizing and simulation tool.

measurements and allowing a minimum thickness of the shadow band is detailed. The chapter concludes with a description of the simulation and optimisation software for the design developed in MATLAB specifically for this application (the main menu and a 3D simulation can be observed in Figure 4), as well as the assembly and installation process and the necessary calibration and maintenance criteria.

2.7 Correction factors for the MK6 measurements

Developed correction factors in chapter 2 are analysed for each cardinal direction and it is evaluated the model that provides the best performance. Table 2 shows the rank positions obtained by each model for each direction, according to the $\mu_{0.99}$ statistical estimator, and the non-parametric ranking aggregation [64] result. Thanks to the use of this proposed estimator, a statistical significance of $\alpha \geq 0.001$ can be guaranteed. Nevertheless, results for the classical estimators MBD, RMSD and R^2 can be checked in the text.

Table 2: Correction factor models ranking ($\mu_{0.99}$).

Correction model	**North**	**South**	**East**	**West**	**All**
Geometric	6	6	5	3	4
Batlles et al. A	3	4	1	2	3
Batlles et al. B	1	5	2	4	2
LeBaron et al.	2	3	3	1	1
Muneer & Zhang	4	1	6	6	5
Steven	5	2	4	5	6

Acording to the results shown in Table 2, no correction model is better than all of the others for every direction. However, by the ranking aggregation method, it can be concluded that LeBaron et al. is the best correction model for all directions. This model presents high accuracy rates because it specifies the proposed correction factors for multiple intervals of the main solar variables.

2.8 Sky type identification and characterisation in Burgos

First, in this chapter, a statistical analysis of the clearness index, the horizontal diffuse fraction and the vertical diffuse fractions in Burgos (42.351°N, −3.688°E), is performed. The analysis was performed according to the frecuency distribution, the fractional time distribution and the relative optical air mass according to Kasten's definition. These are the classical studies carried out to characterise the irradiance conditions at the location. Then, by using measures taken with the MK6 the frequencies of occurrence of the 15

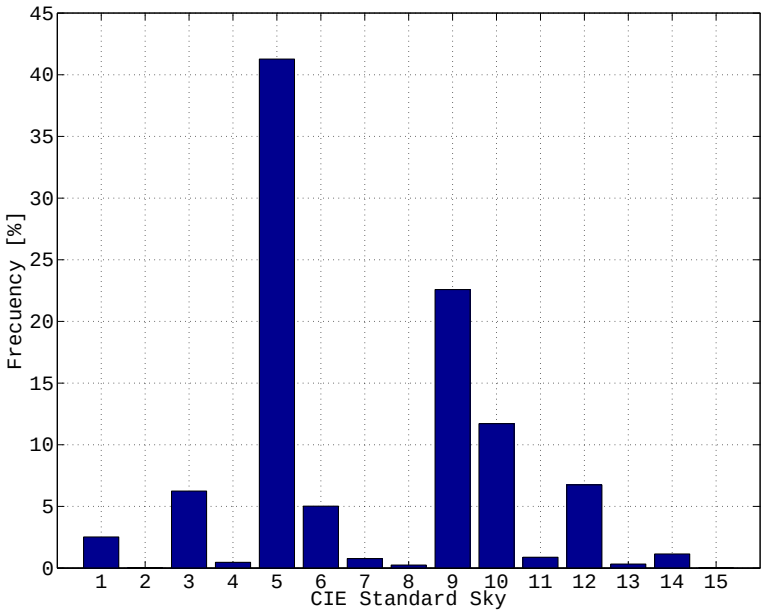
skies at the location has been obtained for the period from September 2014 to April 2015. Two methods based on those proposed in [36] have been implemented. The first one integrates the CIE2004 expression for the spatial distribution of the radiance on five planes and the Standard sky type is chosen as the one with the minimum difference with the measurements. Procedure B works with the fractions between the vertical and horizontal diffuse irradiances and the vertical facing the Sun and opposite diffuse ratios. The second considered method appears to outperform the first in terms of speed and reliability.

Figure 5 shows the CIE Standard sky frecuencies at the location by applying procedure B explained in detail in the text. Figure 5(a) shows the relative frecuencies obtained for each CIE Standard sky type for the study. Figure 5(b) shows the monthly distribution.

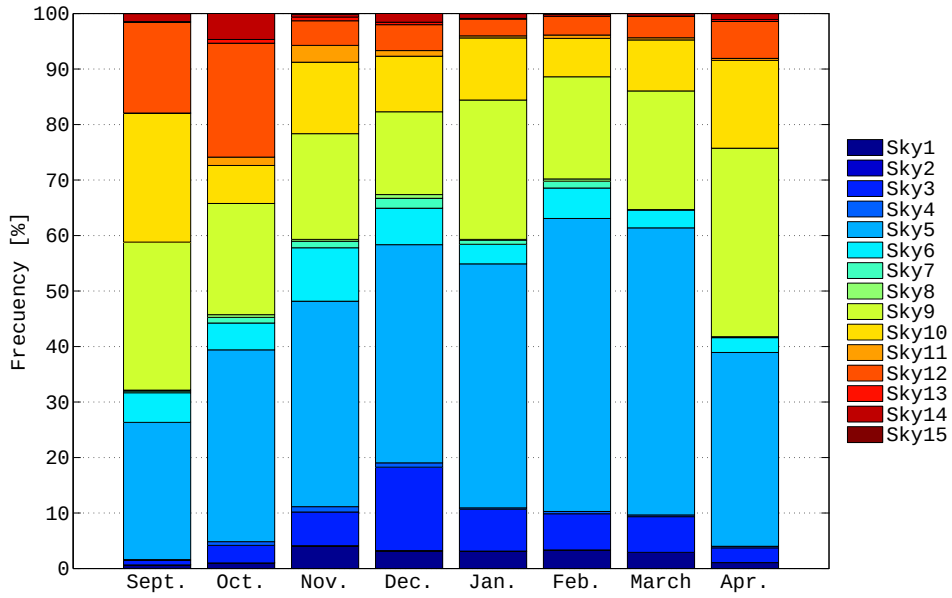
Finally, the distributions of 9 classical clearness estimators are analysed for each Standard sky type according to the CIE classification and the results obtained in the study conducted in Burgos. Table 3 shows the intervals for the median of each clearness estimator for the Standard CIE sky types grouped by overcast, intermediate and clear conditions. It can be observed that, appart from the clear function F and the sky index Si, intervals of values for most of these estimators overlap for all sky conditions, making hard to find a correlation between them. In Table 3, n is the number of datapoints used for each case.

Table 3: Clearness estimators values for the CIE Standard sky types.

Sky	**Overcast**	**Intermediate**	**Clear**
CIE	**01-05**	**06-10**	**11-15**
k_d	$[1.00, 1.10]$	$[0.71, 1.00]$	$[0.62, 0.95]$
k_b	$[0.00, 0.10]$	$[0.00, 0.28]$	$[0.05, 0.36]$
F	$[0.12, 0.28]$	$[0.33, 0.34]$	$[0.24, 0.39]$
k_t	$[0.14, 0.30]$	$[0.32, 0.50]$	$[0.34, 0.51]$
k_{tt}	$[1.75, 1.89]$	$[1.18, 1.87]$	$[1.24, 1.58]$
k_k	$[0.52, 0.55]$	$[0.54, 0.71]$	$[0.60, 0.68]$
F_k	$[-0.01, 0.00]$	$[0.00, 0.50]$	$[0.09, 0.61]$
$\ln \varepsilon_1$	$[0.00, 0.00]$	$[0.00, 0.51]$	$[0.20, 1.25]$
$\ln \varepsilon_2$	$[0.00, 0.00]$	$[0.00, 0.46]$	$[0.01, 0.50]$
Δ	$[0.12, 0.25]$	$[0.26, 0.30]$	$[0.22, 0.34]$
FP	$[0.00, 0.50]$	$[0.00, 0.80]$	$[0.65, 1.00]$
Si	$[0.35, 0.46]$	$[0.48, 1.23]$	$[0.82, 1.41]$
n	3 664	2 924	661



(a) Absolute frecuencies.



(b) Monthly frecuencies.

Figure 5: Frecuencies of occurrence for each CIE standard sky type at Burgos in the period from September 2014 to April 2015.

2.9 Analysis of transposition models on vertical surfaces

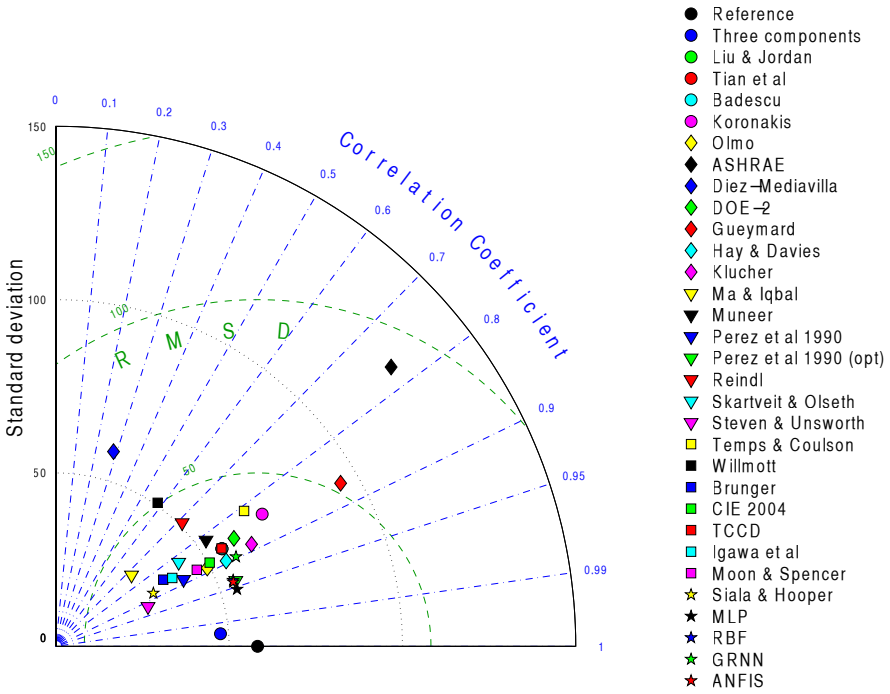
In this chapter, the models described in chapter 1 are evaluated on vertical surfaces with different orientations and under several sky conditions. To extract practical conclusions, a ranking of models based on their performance is carried out, evaluated through different statistical estimators–MBD, RMSD, R^2, t-statistic, Willmott's d and $\mu_{1-\alpha}$–and their graphical representation through Taylor and modified Ineichen Diagrams. Taylor Diagrams for each directions can be shown in Figures 6 and 7.

As it can be observed in Figures 6 and 7, all models behave similarly, but not identically, for the four orientations. In general terms, the most accurate models appear to be the non-parametric ones. From these, the Multi-Layer Perceptron (MLP) obtains the best results. From the parametric models, the one whose estimations are closest to the measures is the Perez et al. model with local optimised coefficients. Original Perez et al., Skartveit & Olseth and Igawa et al. models also seem to perform well. On the other hand, the ASHRAE and Díez-Mediavilla models perform the worst in most cases. Table 4 shows the ranking for the implemented models in all directions according to the $\mu_{0.99}$ estimator. Similar tables according to MBD, RMSD and R^2 can be checked in the full text. First number in each cell is the overall rank position of the model, and the second represents its rank in the model group (isotropic, anisotropic and non-parametric). All models marked by the "!" symbol got the same value for the statistical estimator, so they can share the same rank position. Fuzzy inference models D26 and D27 were excluded from the study because they were really unstable with the inputs. As strong relations between the potential inputs and the outputs couldn't be found, rules can not be defined well. At the end, statistical significance calculation is shown for each model group ranking.

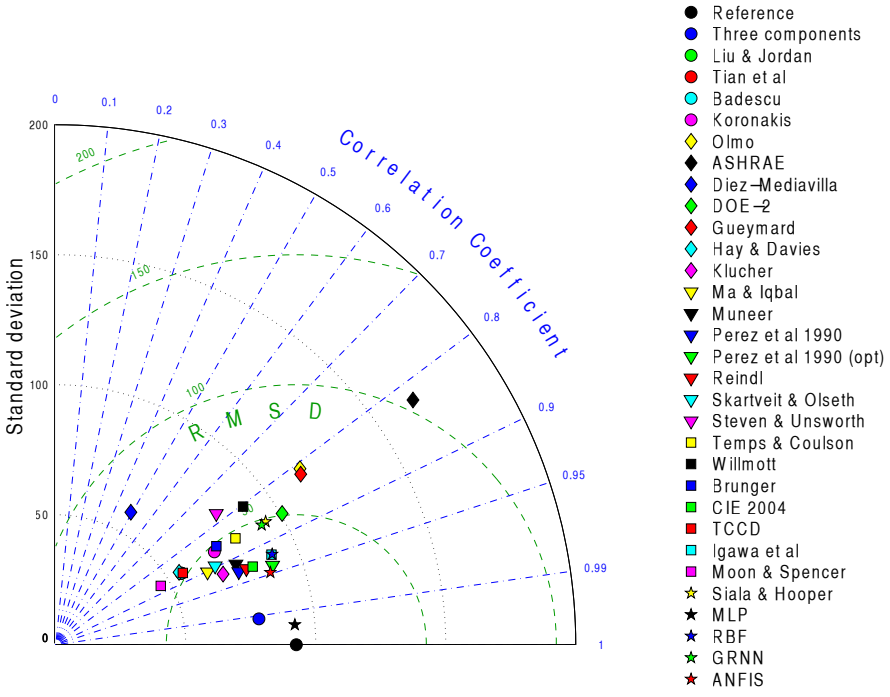
The carried out analysis for clear, intermediate and overcast skies show similar results than for all conditions. Variations in each model's performance for the sky conditions can be observed, but the conditions do not affect how the models compare. It is observed that, appart from the non-parametric models which adapt to every condition if they are adequately trained, models performance get worse with clear sky conditions rather than for overcast skies.

3 Conclusions and main contributions

This section's goal is to enumerate the major conclusions drawn from the Thesis, as well as to indicate future lines of work that remain open to further research.

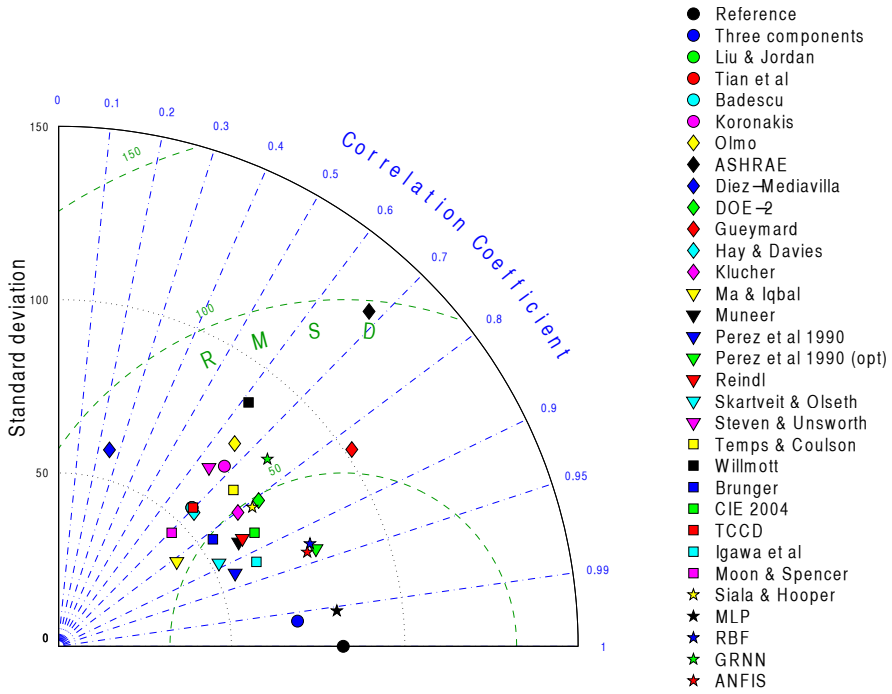


(a) Vertical surface pointing the North direction.

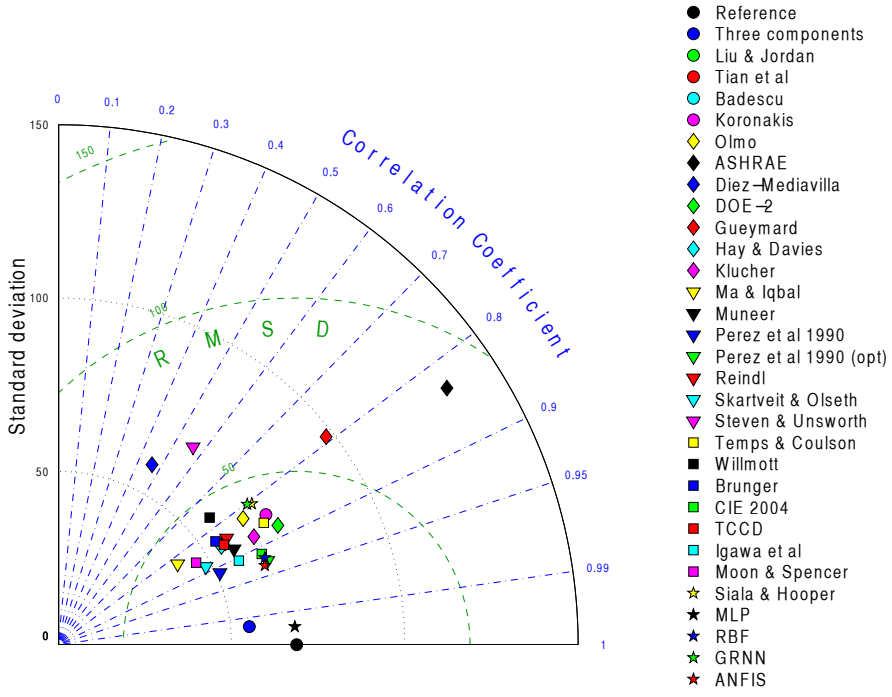


(b) Vertical surface pointing the South direction.

Figure 6: Taylor Diagrams for the evaluated transposition models for each cardinal direction (I/II).



(a) Vertical surface pointing the East direction.



(b) Vertical surface pointing the West direction.

Figure 7: Taylor Diagrams for the evaluated transposition models for each cardinal direction (II/II).

Table 4: Transpositon models ranking for all directions according to $\mu_{0.99}$.

ID	North	South	East	West	$\mathbf{R_j}$	$\lambda_\mathbf{j}$
Isotropic models						
D01	13!|02!	23!|02!	23!|03!	15!|02!	74|09	19!|02!
D02	14!|03!	24!|03!	24!|04!	16!|03!	74|09	20!|03!
D03	15!|04!	25!|04!	25!|05!	17!|04!	74|09	21!|04!
D04	10|01	10|01	10|02	07|01	37|05	08|01
D05	17|05	27|05	05|01	23|05	72|16	18|05
Anisotropic models						
D06	30|21	30|21	30|21	30|21	120|84	30|21
D07	26|17	29|20	29|20	29|20	113|77	29|20
D08	06|02	20|15	08|03	05|01	39|19	09|04
D09	08|04	05|01	09|04	06|02	28|11	06|02
D10	11|06	22|17	22|16	13|08	68|47	17|12
D11	07|03	17|12	15|09	10|05	49|29	10|06
D12	27|18	19|14	28|19	28|19	102|70	27|19
D13	16|08	15|10	17|11	18|10	66|39	15|10
D14	21|12	13|08	20|14	22|14	76|48	22|13
D14b	05|01	06|02	06|01	08|03	25|07	05|01
D15	19|10	11|06	13|07	20|12	63|35	13|07
D16	25|16	26|18	26|17	27|18	104|69	28|18
D17	29|20	16|11	19|13	25|16	89|60	25|16
D18	09|05	09|05	07|02	09|04	34|16	07|03
D19	22|13	08|04	11|05	24|15	65|37	14|08!
D20	24|15	07|03	16|10	14|09	61|37	12|09!
D21	18|09	12|07	12|06	11|06	53|28	11|05
D22	12|07	21|16	21|15	12|07	66|45	16|11
D23	23|14	14|09	18|12	21|13	76|48	23|14
D24	20|11	28|19	27|18	26|17	101|65	26|17
D25	28|19	18|13	14|08	19|11	79|51	24|15
Non-parametric models						
D26	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D27	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**	**|**
D28	04|04	01|01	01|01	01|01	07|07	01|01
D29	03|03	03|03	03|03	02|02	11|11	03|03
D30	01|01	04|04	04|04	04|04	13|13	04|04
D31	02|02	02|02	02|02	03|03	09|09	02|02
Statistical significance						
Classification	L	$E(L)$	$Var(L)$	z	α	
Isotropic	166	180	100	−1.400	0.075	
Anisotropic	12 792	10 164	118 580	7.632	0.000	
Non-param.	110	100	33.333	1.732	0.044	
All	36 470	28 830	696 725	9.153	0.000	

3.1 Conclusions

From the main considerations of the study, emphasis is given to the following general and particular conclusions:

General conclusions

1. It is fundamental in energy generation systems integrated into buildings, especially BIPVs, to study and model solar irradiance on multiple surfaces. Moreover, in urban environments, where the sky-view factor is reduced, diffuse and reflected components play a leading role as energy sources. However, the modelling of these components on horizontal planes or ones inclined to the direction of the equator has not yet been properly developed.

2. Solar diffuse and reflected irradiance transposition models can be classified into parametric and non-parametric methods. In the first group it is possible to separate isotropic models from anisotropic models. Finally, anisotropic models can also be classified as superposition anisotropic models and gradient radiance models. Non-parametric methods can be divided mainly into fuzzy inference based algorithms and artificial neural networks. Neuro-fuzzy inference models are the combination of both algorithm types.

3. Diffuse irradiance measurements taken with shadow ring devices need to be corrected by a correction factor. This factor can consider only geometrical effects (isotropic correction) or the anisotropic distribution of the sky radiance (total correction).

4. For the studied period, sky conditions were overcast most part of the time.

5. There exist slight correlations between the classical clearness indexes and the CIE Standard sky classification according to the applied procedure.

6. Non-parametric models are the best ones to model the diffuse and reflected irradiance on tilted surfaces at any given orientation.

7. From the parametric models, Perez et al. model locally optimised outstands among the others. On the other hand, Koronakis model performs significantly better than the classical Liu & Jordan and Tian et al. isotropic models.

Particular conclusions

1. For the case of the inclined measurement, the ground-reflection is needed to be taken into account in the correction factor calculation.

2. Existing isotropic and total correction models for shadow ring measurements must be modified for tilted and oriented sensors.

3. For vertical sensors, the geometrical correction factor is symmetric with time, but antisymmetric with the geometrical latitude.

4. North and South pointing to sensors have opposite distributions of the isotropic correction factor. East and West pointing to sensors have identical distributions.

5. LeBaron et al. total correction model appears to obtain the best results for an overall application. However, most of the 256 different cases that it uses to calculate the correction factor have not been registered in our measurement campaign. Most of the total correction factors proposed by the model are the mean value of the geometrical correction for the variables intervals.

6. Batlles et al. B model appears to perform the best for North measurements, while Muneer & Zhang, Batlles et al. A and LeBaron et al. models are the most accurate for the South, East and West measurements respectively.

7. The main component of the uncertainty calculation of irradiance measurements is the calibration uncertainty.

8. The expanded uncertainty of the indirect vertical diffuse and reflected irradiance measurement by the three components model is significantly greater than the direct measurement obtained by the MK6 device. With the sensors used in this Thesis, direct measurement can be 3 times more accurate than the indirect method (for $D = 200$ W·m^{-2}).

9. Although all the ground-reflectance models analysed in this Thesis for Burgos obtain close results, the best one appears to be the Iqbal model. This method just consider an isotropic distribution of the ground-reflected irradiance.

10. Obtained albedo's reflectance for the radiometric station in Burgos is 25% lower than the general adopted approach for this value.

11. For the period when the studies have been carried out (from September 2014 to April 2015), horizontal k_d mode was 0.95 and k_t mode was 0.25. k_d modes for vertical surfaces where 0.55 for all directions but the East, where it was slightly higher (0.65). Median and mode values were very close in all cases.

12. For the studied conditions, the best model to estimate the diffuse fraction k_d from the clearness index k_t was Muneer & Saluja model. Boland et al. and Reindl et al. models also obtained good results.

13. From the two methods to classify the sky conditions in Burgos by taking measurements with the MK6 device, method B has more accurate results than method A

and is faster. Method B presents much lower values for relative MBD and RMSD estimators.

14. According to method A CIE Standard sky classification, the most frecuent sky types in Burgos during the studied period where Standards 5, 9 and 14.

15. According to method B CIE Standard sky classification, the most frecuent sky types in Burgos during the studied period were Standards 5, 9 and 10. These sky types correspond with intermediate and overcast sky conditions.

16. The highest values of the MBD and RMSD estimators for both implemented methods were for the South direction. This might be due to the fact that South is the surface with the major exposure to circunsolar diffuse irradiance.

17. Only the clear function F and the sky index Si define clear intervals for the median of their values for overcast, intermediate and clear skies.

18. Multi-Layer Perceptron appears to perform the best in an overall study, followed by ANFIS and GRNN models.

19. From parametric methods, Perez et al. model with local optimized coefficients performs the best. It must be noticed that there exist remarkable differences in performance with the same model using generalized coefficients.

20. The best isotropic model according to the most of the statistical estimators in an overall evaluation and by orientations is Koronakis model.

21. From radiance gradient based models, the CIE2004 model shows the best results.

22. Particularly, for North orientation, GRNN, Koronakis and Perez et al. models perform the best. On the other hand, ASHRAE, Díez-Mediavilla and Gueymard models obtain the worst results.

23. For the South direction, MLP model is the best one by far, while ASHRAE model gets the worst results. The best parametric models in this case are the locally optimised Perez et al. and Gueymard models.

24. For the East direction, MLP performs again the best results, and ASHRAE model the worst ones. The best parametric models in this case are the locally optimised Perez et al. model and Temps & Coulson one.

25. For the West direction evaluation, the MLP model gets the best results for the statistical estimators while Gueymard and ASHRAE models perform the worst. The best isotropic and parametric models for this case are Koronakis and the locally optimised Perez et al. models respectively.

26. Appart from non-parametric models, in general, transposition models show worse results for clear skies rather for overcast conditions. However, relative performance between models varies slightly with the sky classification.

27. The gradient radiance models are the most stable in the results under different sky conditions.

3.2 Thesis contributions

All initially proposed goals have been achieved. The major contributions of this Doctoral Thesis are the following in the field studied:

1. An exhaustive review of the solar diffuse and reflected irradiance on tilted planes has been conducted. Moreover, a classification of the models according to its structure and characteristics has been described.

2. A prototype of a radiometric station that measures diffuse irradiance on different inclined planes using a single lobular shadow ring have been developed. This device allows simultaneous, simple and cost-effective readings of diffuse irradiance through multiple sensors (the prototype initially has 4 sensors but it can be extended).

3. A complex software programmed in MATLAB has been implemented; it enables dimensioning and simulation of the equipment under any geometric conditions.

4. Isotropic and anisotropic correction models for diffuse irradiance measurements obtained through shadowing devices was not developed for inclined planes oriented to non-equatorial directions, so a generalised procedure to calculate them has been implemented. This procedure includes a geometric, or isotropic, correction, and an anisotropic one. The geometric correction is based on a generalised analysis of the possible relative positions of the shadow ring and the sensor, taking into account not only the irradiance from the sky obstructed by the band of the ring, but also the reflected irradiance. The anisotropic correction was obtained after the evaluation of the optimal model from five modified correction models for horizontal diffuse sensors.

5. A database has been created that integrates radiative and meteorological measurements from two sources: the AEMET meteorological stations and those from SWIFT micro-network managed by the research group. The system manages millions of hourly and 10-min records, thereby allowing improvement to models that estimate and predict the solar resource, especially in the Castilla-León region.

6. From September 2014 to April 2015, every 10-min sky conditions in Burgos have been classified according to the CIE Standard classification. Two possible methods have been implemented and compared.

7. 9 classical clearness indexes have been studied for the obtained Standard CIE classification results in Burgos. Intervals for the median of each estimator were calculated for three sky groups: overcast, intermediate and clear.

8. 29 transposition models have been ranked and compared according to several statistical estimators. This study has been carried out for vertical surfaces pointing the cardinal directions. Moreover the sky conditions influence have been analysed.

9. A new statistical estimator, called $\mu_{1-\alpha}$, for models accuracy comparison has been presented.

10. An improved version of the Ineichen Diagrams has also been developed and implemented.

3.3 Future work

Future lines of research and work opened up by this Doctoral Thesis include:

1. Development a new version of the MK measuring equipment so that it be capable of measuring diffuse irradiance on planes with orientations that are different from the cardinal directions.

2. Optimisation the MK6 identification of sky types by comparing the obtained results with an accurate identification done by using a sky-scanner.

3. Completion the carried out study about the sky identification with at least one year measurement campaign.

4. Improvement the study of non-parametric models for the diffuse irradiance transposition, focusing on fuzzy inference systems.

5. Implementation the best transposition models in simulations and optimisation processes of solar energy plants.

References

[1] V. Badescu, "3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces," *Renewable Energy*, vol. 26, no. 2, pp. 221–233, June 2002.

[2] V. Badescu, Ed., *Modeling solar radiation at the Earth's surface.* New York: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[3] D. Broomhead and D. Lowe, "Radial basis functions, multi-variable functional interpolation and adaptive networks," *Complex Systems*, vol. 2, pp. 21–355, 1988.

[4] A. P. Brunger and F. C. Hooper, "Anisotropic sky radiance model based on narrow field of view measurements of shortwave radiance," *Solar Energy*, vol. 51, no. 1, pp. 53–64, July 1993.

[5] A. N. Celik and T. Muneer, "Neural network based method for conversion of solar radiation data," *Energy Conversion and Management*, vol. 67, pp. 117–124, Mar. 2013.

[6] D. A. Chwieduk, "Recommendation on modelling of solar energy incident on a building envelope," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 736–741, Mar. 2009.

[7] M. De Carli and M. Tonon, "Effect of modelling solar radiation on the cooling performance of radiant floors," *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 689–712, May 2011.

[8] M. de Simón-Martín, M. Díez-Mediavilla, and C. Alonso-Tristán, "Modelling solar data: reasons, main methods and applications," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13) Proceedings*, vol. 1. Bilbao (Spain): European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ), 2013.

[9] de Simón-Martín, Miguel and Alonso-Tristán, Cristina and Díez-Mediavilla, Montserrat, "Sun-trackers profitability analysis in Spain," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, no. 9, pp. 1010–1022, 01/09/14.

[10] ——, "Performance Indicators for Sun-Tracking Systems: A Case Study in Spain," *Energy and Power Engineering*, vol. 6, no. 9, pp. 292–302, Sept. 2014.

[11] de Simón-Martín, Miguel and Gómez-Gil, Francisco Javier and Ruiz-Calvo, Justo and Peláez-Vara, Jesús and Martínez-Martínez, Alberto and Martín-Fraile, Juan Vicente and Alonso-Tristán, Cristina and Díez-Mediavilla, Montserrat, "Seguidor solar basado en cinemática paralela de accionamiento en línea," Spain Patent ES 2 332 084-B2, Sept., 2010.

[12] ——, "Seguidor solar basado en cinemática paralela de accionamiento individual," Spain Patent ES 2 331 721-B2, Sept., 2010.

[13] C. Demain, M. Journée, and C. Bertrand, "Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces," *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 710–721, Feb. 2013.

[14] M. Díez-Mediavilla, "Medida y modelización de radiación solar difusa sobre plano inclinado," Ph.D. dissertation, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2001.

[15] EU Commission, "Directiva 2002/91/EU, del 16 de diciembre de 2002, sobre la eficiencia energética en edificios," pp. 13–35, Dec. 2002.

[16] ——, "Directiva 2010/31/EU, del 19 de mayo de 2010, sobre la eficiencia energética en edificios," pp. 13–35, May 2010.

[17] European Commission, "Decisión 2002/358/CE del Consejo de 25 de abril de 2002 relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo de Kioto de la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, y al cumplimiento conjunto de los compromisos contraídos con arreglo al mismo," Apr. 2002. [Online]. Available: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV:l28060

[18] ——, "Comunicación de la Comisión EUROPA 2020. Una estrategia para un crecimiento inte ligente, sostenible e integrador," Mar. 2010.

[19] ——, *Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). Featuring Country Reports 2012.* Electronic version, 2013.

[20] C. Gueymard, "An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms," *Solar Energy*, vol. 38, no. 5, pp. 367–386, 1987.

[21] ——, "Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data," *Solar Energy*, vol. 51, no. 2, pp. 121–138, 1993.

[22] M. Hagan, H. Demuth, M. Beale, and O. de Jesús, *Network Design*, 2nd ed. Boston: PWS Publishing, 1996.

[23] J. E. Hay and D. C. McKay, "Calculation of solar irradiances for inclined surfaces: Verification of models which use hourly and daily data," in *IEA Task IX Final Report, Atmospheric Environment Service*, Downsview, Canada, 1988.

[24] J. E. Hay, "A revised method for determining the direct and diffuse components of the total short-wave radiation," *Atmosphere*, vol. 14, no. 4, pp. 278–287, 1976.

[25] A. Henemann, "BIPV: Built-in solar energy," *Renewable Energy Focus*, vol. 9, no. 6, Supplement, pp. 14–19, Nov. 2008.

[26] J. J. Hirsch, "DOE-2: http://www.doe2.com. Last checked on May 2015," 2010.

[27] F. C. Hooper and A. P. Brunger, "A model for the angular distribution of sky radiance," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 102, no. 3, pp. 196–202, 1980.

[28] N. Igawa, Y. Koga, T. Matsuzawa, and H. Nakamura, "Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution," *Solar Energy*, vol. 77, no. 2, pp. 137–157, 2004.

[29] N. Igawa and H. Nakamura, "All sky model as a standard sky for the simulation of daylight environment," *Building and Environment*, vol. 36, no. 6, pp. 763–770, July 2001.

[30] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation.* California (USA): Academic Press, 1983.

[31] S. M. Ivanova, "Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part I – Vertical surfaces," *Solar Energy*, vol. 95, pp. 376–391, Sept. 2013.

[32] J. Jang, "ANFIS: Adaptative-network-based fuzzy inference system," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, 1993.

[33] H. D. Kambezidis, B. E. Psiloglou, and C. Gueymard, "Measurements and models for total solar irradiance on inclined surface in Athens, Greece," *Solar Energy*, vol. 53, no. 2, pp. 177–185, 1994.

[34] T. M. Klucher, "Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces," *Solar Energy*, vol. 23, no. 2, pp. 111–114, 1979.

[35] P. S. Koronakis, "On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area," *Solar Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 217–225, 1986.

[36] D. H. W. Li, T. Chau, and K. K. Wan, "A review of the CIE general sky classification approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 563–574, 2014.

[37] B. Liu and R. Jordan, "Daily insolation on surfaces tilted towards the equator," *ASHRAE Journal*, vol. 3, pp. 53–59., 1961.

[38] M. Lokmanhekim, *Procedure for Determining Heating and Cooling Loads for Computerized Energy Calculations.* New York: ASHRAE, 1971.

[39] C. Ma and M. Iqbal, "Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces," *Solar Energy*, vol. 31, no. 3, pp. 313–317, 1983.

[40] E. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in liguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 1975.

[41] P. Moon and E. Spencer, D., *Illumination from a non-uniform sky*, New York, 1942, vol. 37.

[42] T. Muneer, "Solar irradiance and illuminance models for Japan I: Sloped surfaces," *Lighting Research and Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 209–222, Dec. 1995.

[43] ——, *Solar Radiation and Daylight Models*, 2nd ed. Oxford: ButterWorth-Heinemann, 2004, vol. 1.

[44] ——, "Solar Radiation Modelling for the United Kingdom," Ph.D. dissertation, Council for National Academic Awards, London, 1987.

[45] F. J. Olmo, J. Vida, I. Foyo, Y. Castro-Diez, and L. Alados-Arboledas, "Prediction of global irradiance on inclined surfaces from horizontal global irradiance," *Energy*, vol. 24, no. 8, pp. 689–704, 1999.

[46] J. A. Olseth and A. Skartveit, "A probability density model for hourly total and beam irradiance on arbitrarily orientated planes," *Solar Energy*, vol. 39, no. 4, pp. 343–351, 1987.

[47] N. Ouhajjou, W. Loibl, A. Anjomshoaa, S. Fenz, and A. Tjoa, "Ontology-based urban energy planning support: Building-integrated solar PV," 2015, pp. 543–550.

[48] M. Pagliaro, R. Ciriminna, and G. Palmisano, "BIPV: merging the photovoltaic with the construction industry," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 18, no. 1, pp. 61–72, 2010.

[49] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance," *Solar Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 271–289, 1990.

[50] O. Perpiñán Lamigueiro, *Energía Solar Fotovoltaica*, on-line ed. Perpiñán Lamigueiro, Óscar, 2013. [Online]. Available: http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf

[51] A. Prada, A. Gasparella, G. Pernigotto, and A. Mahdavi, "Combined effects of diffuse fraction and tilted surface radiation models," in *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling, ECPPM 2014*, 2015, pp. 251–257.

[52] G. Quesada, D. Rousse, Y. Dutil, M. Badache, and S. Hallé, "A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 2820–2832, June 2012.

[53] D. T. Reindl, W. A. Beckman, and J. A. Duffie, "Evaluation of hourly tilted surface radiation models," *Solar Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 9–17, 1990.

[54] E. Ruiz, A. Soler, and L. Robledo, "Comparison of the Olmo model with global irradiance measurements on vertical surfaces at Madrid," *Energy*, vol. 27, no. 10, pp. 975–986, Oct. 2002.

[55] N. J. Salkind and R. L. Escalona, *Métodos de Investigación.* Pearson Education, 1999.

[56] T. Schuetze, "Integration of photovoltaics in buildings—support policies addressing technical and formal aspects," *Energies*, vol. 6, no. 6, pp. 2982–3001, June 2013.

[57] Z. Sen, "Solar energy in progress and future research trends," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, no. 4, pp. 367–416, 2004.

[58] M. Sengupta, A. Habte, S. Kurtz, A. Dobos, S. Wilbert, E. Lorenz, T. Stoffel, D. Renné, C. Gueymard, D. R. Myers, S. Wilcox, P. Blanc, and R. Perez, "Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications," on-line, 2015.

[59] F. M. F. Siala and F. C. Hooper, "A semi-empirical model for the directional distribution of the diffuse sky radiance," in *Renewables- aclean energy solution, Solar Energy Society of Canada*, Otawa, 1989, pp. 322–326.

[60] A. Skartveit and J. Asle Olseth, "Modelling slope irradiance at high latitudes," *Solar Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 333–344, 1986.

[61] C. Stanciu and D. Stanciu, "Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models," *Energy Conversion and Management*, vol. 81, pp. 133–143, May 2014.

[62] M. Steven and H. Unsworth, "The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies." *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, vol. 106, no. 447, pp. 57–61, 1980.

[63] M. Steven and M. Unsworth, "The diffuse solar irradiance of slopes under cloudless skies (in Britain)." *Quarterly Journal, Royal Meteorological Society*, vol. 105, no. 445, pp. 593–602, 1979.

[64] R. J. Stone, "A nonparametric statistical procedure for ranking the overall performance of solar radiation models at multiple locations," *Energy*, vol. 19, no. 7, pp. 765–769, July 1994. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360544294900140

[65] A. Strzalka, N. Alam, E. Duminil, V. Coors, and U. Eicker, "Large scale integration of photovoltaics in cities," *Applied Energy*, vol. 93, pp. 413–421, 2012.

[66] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 15, no. 1, pp. 116–132, 1985.

[67] R. C. Temps and K. L. Coulson, "Solar radiation incident upon slopes of different orientations," *Solar Energy*, vol. 19, no. 2, pp. 179–184, 1977.

[68] Y. Q. Tian, R. J. Davies-Colley, P. Gong, and B. W. Thorrold, "Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 109, no. 1, pp. 67–74, 2001.

[69] C. J. Willmott, "On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors," *Solar Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 205–216, 1982.

[70] World Meteorological Organization, *Guide to the Global Observing System*. WMO, 2013, vol. 1, no. 488.

SOBRE EL AUTOR

ABOUT THE AUTHOR

Breve reseña sobre el autor/ Brief outline about the author.

Sobre el autor

About the author



Miguel de Simón Martín (Burgos, 1988) es Ingeniero Técnico Industrial Mecánico por la Universidad de Burgos e Ingeniero Industrial y Máster Universitario de Investigación en Cibernética por la Universidad de León, con Premio Extraordinario en todos los casos. Además ha sido galardonado con diversos premios y reconocimientos académicos nacionales.

Desde abril de 2012 es ayudante en el Dpto. de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática de la Universidad de León, donde participa en la docencia de las asignaturas del área de Ingeniería Eléctrica.

En el año 2011 realizó una estancia en el Grupo de Álgebra Lineal y Aplicaciones (G.A.L.) de la Universidad de León, y en el año 2014 colaboró con el grupo Dynamical Systems and Mathematical Physics Research Group del Instituto Johann Bernoulli de Matemáticas y Ciencias de la Computación de la Universidad de Groningen (Países Bajos).

Sus principales áreas de interés son las Energías Renovables, modelización de sistemas físicos y los sistemas electromecánicos.

Miguel de Simón-Martín (Burgos, 1988) graduated with a B.Sc. in Mechanical Engineering from the Polytechnic School of the University of Burgos and proceeded to read for a Master's degree in Industrial Engineering at the University of León. Moreover, he graduated with a M.Sc. in Cybernetics from this late university. In all cases, he finalised his studies at the top of his class. Furthermore, he has received several academic and technological national awards.

Since 2012 he has been assistant professor at the Electric, Systems and Automatic Engineering Department from the University of León, lecturing on subjects related to energy and electrical engineering.

In 2011, he has enjoyed a research fellowship in the Linear Algebra and Applications Group from the University of León and, in 2014, he has collaborated with the the Dynamical Systems and Mathematical Physics Research Group of the Johann Bernoulli Institute for Mathematics and Computer Science from the University of Groningen (The Netherlands).

His special fields of interest include Renewable Energies, System Modelling and Electromechanics.

Puede descargar su Currículum Vítae actualizado escaneando este código QR.
You can download his updated CV by scanning the attached QR code.
Researcher ID: K-8452-2014. **ORCID:** 0000-0003-0330-3966.
Research Gate: `http://www.researchgate.net/profile/Miguel_Simon-Martin`

Caracterización de la irradiancia solar difusa sobre superficies verticales

Characterisation of Solar Diffuse Irradiance on Vertical Surfaces

Miguel de Simón Martín
desimon.martin@gmail.com

Por favor, envíeme sus sugerencias y correcciones.
Please, email me comments and corrections.

Escanee este código QR para descargar el PDF.

Scan this QR code to download the PDF.

Cómo citar esta Tesis / How to cite this Thesis:
de Simón-Martín, Miguel, *"Characterisation of Solar Diffuse Irradiance on Vertical Surfaces"*, Ph.D. Thesis, University of Burgos, Burgos (Spain), 2015.

Esta obra está bajo una licencia Reconocimiento-Compartir bajo la misma licencia 3.0 España de Creative Commons (`http://creativecommons.org/licenses/by/3.0`). Igualmente, **todo el código generado en este trabajo ha sido licenciado bajo la licencia GNU/GPL v3 o superior** (`http://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html`).

Esta Tesis Doctoral ha sido redactada íntegramente con LaTeX. Las figuras se han generado a partir de **PSTricks** y **TikZ** y han sido posteriormente editadas con **The Gimp** e **Inkscape**. Así mismo, todas las gráficas se han generado mediante **MATLAB** R2013a. Los esquemas de relaciones geométricas se han confeccionado con **GeoGebra** 4 y 5. Los Diagramas de Taylor han sido generados mediante una versión modificada de las funciones *taylordiag.m* y *allstats.m* de **Guillaume Maze** para MATLAB (`http://codes.guillaumemaze.org`). Los renderizados 3D se han realizado mediante la versión de evaluación del programa **KeyShot** 5. Diseño de cubierta por Sergio Gutiérrez y Miguel de Simón.

«Tolle lege ars longa, vita brevis»



UNIVERSIDAD
DE BURGOS