



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Modelado de la irradiancia solar sobre superficies inclinadas

Impacto de la separación directa-difusa en los modelos de transposición

Inti Anandas Piccioli Artecona

Programa de Posgrado en Ingeniería de la Energía
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Setiembre de 2022



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Modelado de la irradiancia solar sobre superficies inclinadas

Impacto de la separación directa-difusa en los modelos de transposición

Inti Anandas Piccioli Artecona

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Ingeniería de la Energía, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de la Energía.

Director:

Dr. Prof. Gonzalo Abal

Director académico:

Dr. Prof. Gonzalo Abal

Montevideo – Uruguay

Setiembre de 2022

Piccioli Artecona, Inti Anandas

Modelado de la irradiancia solar sobre superficies inclinadas / Inti Anandas Piccioli Artecona. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2022. XXI, 138 p.: il.; 29,7cm.

Director:

Gonzalo Abal

Director académico:

Gonzalo Abal

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Ingeniería de la Energía, 2022.

Referencias bibliográficas: p. 100 – 105.

1. Plano Inclinado, 2. Modelos de Transposición, 3. Desvío Azimutal, 4. Reflectividad del Suelo. I. Abal, Gonzalo, . II. Universidad de la República, Programa de Posgrado en Ingeniería de la Energía. III. Título.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Prof. Italo Bove

Dr. Prof. Rodrigo Alonso-Suárez

Dra. Prof. María José Denegri

Montevideo – Uruguay
Setiembre de 2022

Dedicado a la memoria de mi
abuela materna, Nelly Ojeda
Fernández, cuyo recuerdo vive
cada día en mí.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente en primer lugar a mi madre, Sandra Piccioli, mujer digna, invencible y carismática a quien amo y admiro, y es fuente de inspiración en todo momento. En segundo lugar quiero agradecer a Evelyn Schenck, la persona más importante con quien no comparto ADN en mi vida, socia de mil proyectos y benefactora incondicional (especialmente en momentos difíciles). Con estas dos mujeres tengo una deuda infinita que solo puedo saldar con gratitud e intentando actuar acorde a su excelencia como personas.

Esta tesis no existiría de no ser por la confianza depositada en mí por el Dr. Gonzalo Abal, con quien estoy eternamente agradecido desde el primer momento. Aprecio su paciencia sin límites y agradezco su disposición irrestricta para ayudarme en todas las instancias de la redacción de esta tesis. Para mí es un honor haber sido su estudiante y espero haber estado a la altura de semejante orientador.

Agradezco también a los Dres. Agustín Laguarda y Rodrigo Alonso-Suárez quienes me han honrado al aceptarme como su estudiante de doctorado y quienes durante el proceso de redacción de esta tesis también han sido un gran apoyo moral y académico. Es clave también agradecer al equipo del LES; en especial a Liber Dovat, Andrés Monetta y Paola Russo por su apoyo en varias etapas de la recolección de datos y por ayudarme en distintas problemáticas de índole informático.

Un punto de inflexión durante la redacción de esta tesis fue mi incorporación a la Sala β del Instituto de Física. Va mi agradecimiento a mis nuevos compañeros de sala, en especial a Javier Pereyra y Matías Osorio, quienes me ayudaron a corregir algunas malas prácticas metodológicas que estaba implementando, dándome enseñanzas más que valiosas.

Quiero agradecer también al Dr. Christian A. Gueymard, por sus interesantísimos y claros puntos de vista relativos a mi trabajo, además de mostrarse siempre interesado y atento a mis consultas.

No puedo olvidarme de agradecer a mis amigos, en especial a los ilustres habitantes de la Sala 20 del IFFI: Matías Fernández Lakatos, Carla Yelpo, Juan Diego Young, Enzo Spera y Ale Silva. Finalmente a mis amigos extra-facultad que me acompañan en todo momento, en particular a Matías Brum, Marcelo Mattos, Carlos Ezquerra y Mauricio Cerri, a quienes quiero mucho y siempre cuento con ellos. También quiero agradecer especialmente a mi amigo y mentor en lo artístico, el gran Leo Méndez.

Finalmente, agradezco al tribunal de tesis por su buena voluntad, disposición y valiosísimos aportes que han resultado en una mejora a la calidad de este manuscrito.

Y qué cosa es un rayo, podrías verlo, si contemplaras a través de una rendija la luz del sol introducida en una habitación oscura. Pues se extiende en línea recta y se apoya, en cierto modo, en el cuerpo sólido con el que tropiece, cuerpo que le separa del aire que viene a continuación. Allí se detiene sin deslizarse ni caer. Tal, en efecto, conviene que sea la difusión y expansión de la inteligencia, sin desbordarse en ningún caso, pero sí extendiéndose; conviene también que, frente a los obstáculos con que tropiece, no choque violentamente, ni con ímpetu, ni tampoco caiga, sino que se detenga y dé brillo al objeto que la recibe. Porque se privará del resplandor el objeto que la desdeñe.

Marco Aurelio - Meditaciones

RESUMEN

Los modelos que estiman la irradiancia solar global sobre un plano inclinado (GTI) a partir de medidas o estimativos de su equivalente en un plano horizontal (GHI) y sus componentes difusa (DHI) y directa (DNI) reciben el nombre de modelos de transposición. La estimación confiable de GTI es necesaria para dimensionar proyectos de generación fotovoltaica de gran porte, ya que la incertidumbre asociada se traduce directamente en riesgo económico del proyecto.

Existen diversidad de trabajos que validan modelos de transposición a partir de medidas de GHI y DHI, pero hay muy poca literatura sobre el problema de determinar GTI a partir solamente de GHI. Para ello es necesario previamente emplear un modelo de separación, que estime DHI a partir de la medida de GHI. La incertidumbre adicional asociada a la estimación de DHI deberá trasladarse a la estimación de GTI, y evaluar este impacto es uno de los objetivos de esta tesis. Para ello se validaron cinco modelos de transposición de uso corriente en la literatura con datos de cuatro estaciones sobre territorio uruguayo y una estación testigo en Estados Unidos. Una primera validación se realizó a partir de datos en tierra de GHI y DHI, mientras que la segunda se realizó a partir de datos de GHI y estimativos de DHI por medio de un modelo de separación localmente ajustado que ha sido previamente evaluado sobre territorio uruguayo. En ambos casos, se encontró que la incertidumbre asociada al estimativo de GTI es del orden de la incertidumbre de las medidas, y que el uso de un modelo de separación aumenta levemente la incertidumbre, dependiendo del modelo de transposición usado y de la calidad de las medidas.

Durante el control de calidad de los datos de partida se observó que algunas estaciones presentaban una desalineación azimutal respecto al Norte, que es su azimut nominal y, además, la dirección de máxima captación de energía. Se desarrolló y evaluó un método novedoso de detección de desalineaciones a partir de los datos de GTI, cuyo uso permite mejorar apreciablemente los indicadores de los modelos de transposición, siendo esta una de las contribuciones originales

de este trabajo.

Palabras claves:

Plano Inclinado, Modelos de Transposición, Desvío Azimutal, Reflectividad del Suelo.

ABSTRACT

The estimation of intra-day global tilted irradiance (GTI) from data or estimates of global horizontal irradiance (GHI) and its diffuse (DHI) and direct (DNI) components is typically made by means of a transposition model. A reliable estimation of GTI is required to scale large PV generation projects, since the associated uncertainty translates directly into financial risk of the project.

There is a large body of work regarding the performance of transposition models from GHI and DHI ground measurements, but the problem of estimating GTI from GHI data alone is not frequently addressed in the literature. In order to do this, one must previously use a separation model that estimates DHI from GHI. The additional uncertainty associated to the use of the separation model must therefore have an impact on the uncertainty of the transposition, and determining this impact is one of the main goals of this thesis. Five transposition models were validated in this work, with data from four sites in Uruguay and one witness high quality station in the United States. One validation was performed using GHI and DHI data, and a second validation using GHI data and DHI estimates from a separation model that was locally evaluated for Uruguay in a previous study. The use of a separation model slightly increases the uncertainty of the transposition, but it remains within the order of the uncertainty of the GTI measurements.

During quality control of the raw data, it was noticed that some of the inclined surfaces were misaligned with respect to their nominal orientation towards the equator. This problem was solved by developing and testing a new method of misalignment detection from the GTI measurements, which decreased significantly the uncertainty in the transposition. This method is one of the original contributions of this work.

Keywords:

Tilted Surfaces, Transposition models, Azimuth Misalignments, Ground

Albedo.

Lista de figuras

2.1	Movimiento aparente del Sol	10
2.2	Componentes de la irradiancia en plano horizontal e inclinado	13
2.3	Posición del Sol respecto a un plano inclinado	14
2.4	Distribución angular de la irradiancia en la bóveda celeste	16
2.5	Esquema de la distribución de la irradiancia (R. Perez et al. 1986)	19
2.6	$f_d - k_t$ horario con ajuste de modelos de separación.	27
3.1	Distribución en el territorio uruguayo de la RMCIS	29
3.2	Sistema de seguimiento solar SOLYS2	31
3.3	Piranómetro SPN1, detalles	32
3.4	Estación de medida AR (Departamento de Artigas)	33
3.5	Serie de irradiancia minutal para LE	37
3.6	Diagrama $f_d - k_t$ minutal para LE	38
3.7	Diagrama $f_d - k_t$ minutal, GO y TA	38
3.8	Serie temporal de datos minutales, AR	39
3.9	Serie temporal de GHI coloreada, AR	40
3.10	Discrepancias entre GHI1 y GHI2 en AR y TT	41
3.11	GHI y GTI en función de ω para días claros	42
3.12	Efecto del descarte del filtro de clausura	48
3.13	Serie temporal de GHI y DHI filtradas para AR, en forma de mapa de colores	49
3.14	Diagrama $f_d - k_t$ a escala diezminutal	51
4.1	Selección de minutos de cielo claro a partir de medidas de GHI.	56
4.2	Ajuste de GTI minutal para cielo claro	57
4.3	Relación funcional entre el ángulo horario ω^* y el azimut real de la superficie.	59
4.4	Estimativos de azimut real - TA	61

4.5	Estimativos de azimut real sin descarte de outliers para AR y PP	62
4.6	Resultado de la validación del método A con datos de RE y LE.	65
4.7	$\sigma = f(\gamma_{nom})$ para la validación en RE	66
4.8	Diagrama $f_d - k_t$ a escala minutal para los datos de RE . . .	67
4.9	rRMSD en función del azimut de la superficie para cuatro orientaciones elegidas de los datos de RE.	68
4.10	Estimativos de azimut real para las cuatro estaciones relevadas en función del número de día claro seleccionado (evento). . . .	71
5.1	Diagrama de flujo representando la metodología aplicada. . . .	75
5.2	rMBD y rRMSD en función de ρ_g para estaciones tipo I y II .	78
5.3	Reflectancia en función de θ_z en LE.	79
5.4	GTI modelada en función del dato de GTI, para las estaciones tipo I y II, y coloreado por densidad de puntos.	83
5.5	Histogramas de k_t y f_d a nivel diezminutal, estación LE	85
5.6	MBD según condición de cielo	86
5.7	RMSD según condición de cielo	87
5.8	Diagrama $f_d - k_t$ a escala diezminutal y horaria para la estación LE, con el resultado del descarte adicional.	88
5.9	Diagrama $f_d - k_t$ a nivel diezminutal para la estación LE, con ajuste por modelos de separación	90
5.10	Comparación de indicadores para la validación con DHI dato y DHI estimada por modelo de separación.	92
A.1	Espectro de irradiancia en TOA y a nivel terrestre	114
A.2	Distribución angular de la dispersión de Rayleigh y la dispersión de Mie	115
A.3	Representaciones de la atmósfera plana y realista	116
A.4	Componentes de GTI en condiciones de cielo claro	120
B.1	Mesa de calibración de piranómetros contra estándar secundario CMP22 de Kipp and Zonen, ubicada en la azotea del LES. . .	122
B.2	Pirheliómetro CHP1 de Kipp and Zonen y detalles	123
C.1	GTI modelada en función del dato de GTI, para las estaciones tipo III, y coloreado por densidad de puntos.	131
C.2	Comparación de indicadores en las estaciones que cuentan con medida de DNI por medio de tres validaciones distintas. . . .	136

C.3 Dispersión entre el dato de DNI y la DNI calculada por clausura [137](#)

Lista de tablas

2.1	Coeficientes para el modelo de Perez (R. Perez et al. 1990).	20
2.2	MBD y RMSD de modelos PER comparado con otros modelos (R. Perez et al. 1987).	22
2.3	rMBD y rRMSD de la validación de Yang, 2016	23
2.4	Coeficientes de modelos de separación (Ruiz-Arias et al. 2010 y Ruiz-Arias et al. 2010)	26
3.1	Ubicación de las estaciones relevadas en esta tesis	29
3.2	Incertidumbres típicas asignadas por estación	34
3.3	Filtros y parámetros utilizados	46
3.4	Filtros por componente de la irradiancia	47
3.5	Descarte del filtrado de datos minutales	47
3.6	Cantidad de datos integrados por estación y tipo de medida, a nivel diezminutal y horario.	50
4.1	Instrumentación RE y LE para métodos de detección de azimut	64
4.2	Resultados de la validación de ambos métodos para las estaciones RE y LE1/LE2.	69
4.3	Estimación de azimut real en estaciones de campo	70
4.4	Descarte de filtros por estación a nivel de datos de GTI. Todos los porcentajes se dan respecto al total de datos diurnos válidos de dicha variable.	72
4.5	Período de datos final seleccionado para cada estación	72
5.1	$\Delta RMSD$ al usar azimut real y nominal	80
5.2	Sesgos absolutos y relativos para estaciones tipo I y II	81
5.3	Dispersión absoluta y relativa, para estaciones tipo I y II	81

5.4	Validación diezminutal en las estaciones tipo I y II de los modelos de separación de Ruiz-Arias	89
5.5	Validación de modelos de tranposición con difusa estimada por separación	91
5.6	Variación porcentual en el RMSD al validar modelos de tranposición con DHI dato y DHI estimada, denominada Δ RMSD.	92
B.1	Instrumental por estación, con fecha de inicio y final de la medida, para las estaciones de la RMCIS.	126
C.1	Indicadores completos para la validación de modelos de tranposición con DHI medida	129
C.2	Validación por categorías de k_t a nivel diezminutal, para las estaciones tipo I y II.	132
C.3	Validación de los modelos de separación directa-difusa	133
C.4	Coefficientes localmente ajustados de la familia de modelos de separación Ruiz-Arias.	134
C.5	Indicadores de sesgo y dispersión del modelo de separación RA2S a partir de los datos diezminutales de LE, reportados en términos de f_d y de DHI y DNI.	134
C.6	Validación de modelos de tranposición con DHI estimada	135

Lista de siglas

Lista de siglas

BHI Irradiancia directa en plano horizontal

BSRN Baseline Surface Radiation Network

DHI Irradiancia difusa en plano horizontal

DNI Irradiancia directa en incidencia normal

GHI Irradiancia global en plano horizontal

GTI Irradiancia global en plano inclinado

LES Laboratorio de Energía Solar

NREL National Renewable Energy Laboratory

RMCIS Red de Medidas Continua de Irradiancia Solar

TOA Tope de la Atmósfera

TSI Irradiancia Solar Total

Tabla de contenidos

Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVI
Lista de siglas	XVIII
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Sobre esta tesis	4
2 Modelos de Transposición	7
2.1 Irradiancia solar incidente en superficie	8
2.1.1 Irradiancia solar incidente TOA	8
2.1.2 Movimiento aparente del Sol	9
2.1.3 Irradiancia incidente en la superficie terrestre	10
2.1.4 Irradiancia solar en planos inclinados	12
2.2 Estimación de la razón difusa: modelos de transposición	15
2.2.1 Modelo isotrópico [ISO]	15
2.2.2 Modelo de Hay y Davies [HD]	17
2.2.3 Modelo de Temps, Coulson y Klucher [TCK]	17
2.2.4 Modelo de Reindl [HDKR]	18
2.2.5 Modelo de Perez et al. [PER]	18
2.3 Desempeño de modelos en la literatura	20
2.3.1 Métricas de desempeño	20
2.3.2 Desempeño previo de los modelos seleccionados	22
2.4 Modelos de separación directa-difusa	25
3 Medidas y datos	28
3.1 Instrumentos de medida	30

3.2	Control de calidad - Datos minutales	34
3.2.1	Inspección visual de datos	35
3.2.2	Filtrado automático	42
3.3	Discusión	52
4	Estimación del azimut de las superficies	53
4.1	Descripción del método A	54
4.2	Descripción del método B	61
4.3	Validación de los métodos	64
4.3.1	Método A	64
4.3.2	Método B	66
4.4	Corrección de azimut para los datos de GTI	69
4.5	Control de calidad para datos de GTI	70
5	Desempeño de los modelos	74
5.1	Esquema de validación	74
5.2	Reflectancia	76
5.3	Validación de modelos de transposición con difusa medida	77
5.3.1	Impacto de la estimación del azimut real	77
5.3.2	Desempeño para todo cielo	80
5.3.3	Desempeño según condición de cielo	84
5.4	Validación con difusa estimada	87
5.4.1	Validación de los modelos de separación	88
5.4.2	Validación de los modelos de transposición	90
5.5	Discusión	93
6	Conclusiones	96
	Bibliografía	100
	Glosario	108
	Apéndices	109
	Apéndice A Generalidades	110
A.1	Determinación del ángulo horario	110
A.1.1	Factor orbital	110
A.1.2	Ángulo horario	111

A.2	Interacción entre la radiación y la atmósfera	112
A.2.1	Masa de aire	115
A.3	Modelos de cielo claro	117
A.4	Componentes de GTI en cielo claro	119
Apéndice B	Instrumentos de medida	121
B.1	Piranómetros	121
B.2	Pirheliómetros	123
B.3	Sistemas de seguimiento	124
B.4	Medidas de DHI en estaciones de campo - SPN1	124
B.4.1	Cálculos internos del SPN1	125
B.5	Instrumental por estación	126
B.6	Inspección visual de datos	126
Apéndice C	Resultados completos.	128
C.1	Validación con DHI medida	128
C.1.1	Desempeño por condición de cielo	132
C.2	Validación con DHI estimada	132
C.3	Validación con DNI clausura y dato	136

Capítulo 1

Introducción

En la última década las sociedades y gobiernos han tomado conciencia de la problemática asociada al uso de energías no renovables, y en particular a su estrecha relación con los efectos del cambio climático, largamente anunciados desde la comunidad científica ([Lynas et al. 2021](#)) y que son observables al día de hoy. En este sentido, la participación de las energías renovables en el mix energético ha tenido un aumento sostenido, aunque sigue siendo una carrera que se corre desde atrás. En particular, se destaca la entrada de la energía solar en el sector eléctrico, debido a la masificación de la producción de módulos PV y la notable reducción de costos de esta tecnología. Un ejemplo del empuje de la energía solar ha sido el crecimiento en la generación fotovoltaica, que pasó de 32.2 TW h en 2010 a 821 TW h en 2020, colocándola como la segunda fuente renovable de energía en términos de incremento anual ([IEA, 2021](#)). Sin embargo la participación de la energía solar en la generación eléctrica mundial sigue siendo baja: 3.1 %, mientras que la producción fotovoltaica estimada en el escenario de emisiones cero para 2050 debería ser de 6970 TW h para 2030 ([IEA, 2021](#)), por lo que el camino a recorrer aún es largo.

La energía solar es la fuente de energía con mayor potencial: anualmente inciden unos 23 000 TW-año de energía solar sobre la superficie terrestre seca ([R. Perez y Perez, 2009](#)), cantidad más que suficiente para abastecer una demanda energética creciente de forma sustentable y sin emisiones. Sin embargo, por más que tiene un enorme potencial, su captación, almacenamiento y conversión implican un gran desafío, debido en buena parte al problema de la estimación del recurso solar que presenta gran variabilidad espacio-temporal y requiere de un correcto modelado de la atmósfera y su interacción con la

radiación solar. La construcción de estos modelos se apoya en bases de datos de medidas en tierra de calidad controlada y estimativos satelitales con gran cobertura geográfica y temporal. El estudio del recurso solar es además la primera etapa en cualquier emprendimiento de energía solar (ya sea concentración o generación fotovoltaica), y la incertidumbre en la estimación del recurso se traduce directamente en riesgo financiero de dichos emprendimientos (Vignola et al. 2012).

Estimar la cantidad de radiación solar que incide en una superficie de orientación e inclinación arbitrarias a nivel terrestre es de gran interés en diversas áreas. Los modelos que toman como entrada la [irradiancia global horizontal](#) y sus componentes¹ sobre un plano horizontal, junto a variables geométricas y parámetros de entorno geográfico, devolviendo una estimación de la [irradiancia global sobre un plano inclinado](#), reciben el nombre de *modelos de transposición o de transporte*. Uno de los ejemplos más comunes y citados de la aplicación de estos modelos (Duffie y Beckman, 2013, Iqbal, 1983, Abal et al. 2020) se encuentra en el diseño de sistemas fotovoltaicos de gran escala: la radiación incidente sobre los paneles es el insumo más importante en la generación de energía, y estos deben orientarse de forma tal que su captación sea máxima en el acumulado anual. Mediante modelos de transposición es posible estimar la generación eléctrica y determinar la orientación óptima a partir de medidas o estimativos de irradiancia global horizontal.

La arquitectura y el diseño solar pasivo también hacen uso del cálculo de irradiación en planos inclinados, orientado al aprovechamiento de la luz del día y el acondicionamiento térmico de edificios, aspectos claves de la eficiencia energética. Los modelos de transposición se usan también para estimar irradiación en terrenos inclinados donde se realiza actividad agrícola, ganadera o forestal, debido al impacto que tiene la radiación solar sobre plantaciones, invernaderos o seres vivos que generalmente están expuestos largos períodos de tiempo al sol.

En esta tesis analizaremos el desempeño de cinco modelos de transposición de uso corriente en la literatura, a partir de datos disponibles en el Uruguay. En particular, evaluaremos el impacto en estos modelos de transposición del uso de modelos de separación de la radiación global horizontal en sus componentes directa y difusa.

¹Las componentes de la irradiancia global en superficies horizontales son la [irradiancia difusa horizontal](#) y la [irradiancia directa normal](#); estas serán definidas en el Capítulo 2.

1.1. Antecedentes

El modelado de la [Irradiancia global en plano inclinado \(GTI\)](#) es un tema de amplio estudio en la literatura, y existe una gran variedad de modelos de transposición que han sido validados y comparados. En este sentido, el trabajo de [Yang, 2016](#) en el que se validan 26 de estos modelos con datos de 4 estaciones es uno de los más importantes. A nivel local, la primera evaluación de modelos de transposición se encuentra en el trabajo de [Piccioli et al. 2018](#), en el que se validaron 10 modelos contra datos de la estación ubicada en el predio del [Laboratorio de Energía Solar \(LES\)](#), en el departamento de Salto. En la presente tesis se amplían y mejoran los resultados de dicho trabajo preliminar, y es la primera vez que se procesan y analizan los datos de GTI de otras cuatro estaciones de la [Red de Medidas Continua de Irradiancia Solar \(RMCIS\)](#), gestionada por el [LES](#).

Para poder estimar [GTI](#) es necesario contar con medidas o estimativos de la [Irradiancia global en plano horizontal \(GHI\)](#) y sus dos componentes: la [Irradiancia difusa en plano horizontal \(DHI\)](#) y la [Irradiancia directa en incidencia normal \(DNI\)](#), además de cálculos que determinan la posición del Sol en la bóveda celeste¹ que implican conocer la orientación del plano captador. Estas medidas son el estándar de las bases de datos de radiación solar, pero debido a que la medida de DHI y DNI requiere un seguimiento fino de la trayectoria del sol y equipamiento muy caro, lo usual es contar solamente con la medida de GHI, que es mucho más sencilla. Por lo tanto es de interés estimar DHI a partir de la medida de GHI por medio de un *modelo de separación*, existiendo gran variedad de estos modelos que han sido extensivamente estudiados y validados, incluso localmente ([Abal et al. 2017](#)). Al contar con la medida de GHI y el estimativo de DHI, la componente directa DNI se determina por una relación geométrica que vincula las tres magnitudes (Ec. (2.6)). Ahora bien, un modelo de separación se puede usar en conjunto con uno de transposición, cuando no se conocen las componentes directa y difusa de la irradiancia, con el consiguiente impacto en la incertidumbre en el modelo de transposición introducido por la separación. El problema del impacto de la separación en la transposición ha recibido muy poca atención en la literatura ([C. Gueymard, 2008](#)), y su evaluación es uno de los objetivos principales de esta tesis.

¹Y suposiciones razonables sobre la reflectividad de las superficies que rodean al captador inclinado, problema que consideraremos en detalle en la Sección 5.2.

Como se comentó previamente, durante el análisis de los datos que forman parte de este trabajo se encontró en algunos casos que el valor nominal del [azimut](#) de los equipos de medida en plano inclinado no coincidía con el real, afectando las medidas de GTI. Ante la escasez de literatura respecto al problema de los desvíos azimutales de superficies ([Barbier et al. 2019](#)), se elaboró un método novedoso de detección de azimuts a partir únicamente de la medida de GTI, cuya validación contra datos de azimut conocido en varias orientaciones (registrados en la Isla de La Réunion, Francia) resultó, hasta el momento, en un trabajo publicado en anales de un congreso internacional ([Piccioli et al. 2021](#)), y es la base para mejoras posteriores que son insumo de un manuscrito actualmente en etapa de redacción para enviar a revista internacional arbitrada.

1.2. Sobre esta tesis

En esta tesis se evaluaron cinco modelos de transposición, elegidos de acuerdo a su relevancia: uno de ellos implica la suposición más sencilla que se puede realizar sobre la irradiancia en un plano inclinado, mientras que otros dos son mejoras simples del primero. Los últimos dos modelos evaluados son de un grado mayor de complejidad, y en particular uno de ellos considera la distribución de la irradiancia en la bóveda celeste de manera geométrica, presentando el mejor desempeño en la literatura ([Yang, 2016](#)).

Por otra parte se validaron y ajustaron localmente tres modelos de separación provenientes de una misma familia de modelos ([Ruiz-Arias et al. 2010](#)), que han sido evaluados previamente a nivel local por [Abal et al. 2017](#). De estos tres se eligió uno de ellos para estudiar el impacto de la separación en la transposición, en base a su simplicidad y buen desempeño.

La correcta estimación de GTI por medio de los distintos modelos de transposición depende de conocer el azimut real de las superficies captadoras, que se estimó por medio de un método novedoso desarrollado en este trabajo, complementado por otro método basado en una variante del propuesto por [Barbier et al. 2019](#). Estos métodos se validaron contra datos de GTI de azimut conocido, y se estimó correctamente el azimut real de las superficies. Se encontró que todos los indicadores de incertidumbre disminuyeron al emplear este valor para estimar GTI, respecto a usar el azimut nominal en todas las estaciones locales evaluadas.

Las principales contribuciones de esta tesis son las siguientes:

- (a) Control de calidad de datos en tierra de GHI y sus componentes en todos los sitios, sistemático y en dos etapas: una inspección visual exhaustiva de datos minutales sin procesar, seguido de un control de calidad automático en forma de filtrado de datos basado en el trabajo de [Perez-Astudillo et al. 2018](#), con un completo reporte de los resultados del mismo.
- (b) Propuesta de un nuevo método de detección de azimut de superficies inclinadas captadoras a partir de la propia medida de GTI, validado contra datos de GTI de azimut nominal conocido. La determinación correcta del azimut es un prerequisite para evaluar la incertidumbre de los modelos de transposición.
- (c) Validación de cinco modelos de transposición con datos de cuatro estaciones en territorio Uruguayo y una en Estados Unidos (esta última, con datos de alta calidad, es usada como estación testigo). En una primera etapa se utilizan como entrada las medidas de GHI y DHI, y se analiza el impacto del valor de la reflectancia asignado al terreno circundante en el desempeño de los modelos de transposición.
- (d) Validación y ajuste local de tres modelos de separación directa-difusa previamente evaluados a nivel local, eligiéndose uno de ellos de acuerdo a consideraciones de simplicidad y buen desempeño.
- (e) Análisis del impacto sobre la transposición al utilizar como entrada la medida de GHI y el estimativo de DHI obtenido por el modelo de separación. Se comparan los indicadores de incertidumbre obtenidos por ambas validaciones y se cuantifica su variación.

Esta tesis se organiza de la siguiente manera. En el [Capítulo 2](#) se tratan los conceptos básicos necesarios para modelar la irradiancia solar en la superficie terrestre (con más detalles al respecto en el [Apéndice A](#)), y se presentan los modelos de transposición y de separación a evaluar. El [Capítulo 3](#) describe las medidas realizadas (complementado con detalles de instrumentación en el [Apéndice B](#)) y las bases de datos empleadas en esta tesis, con especial énfasis en el control de calidad de los mismos, y las diversas problemáticas encontradas

en las medidas. El Capítulo 4 está dedicado en su totalidad a presentar dos métodos empleados para estimar el azimut de las superficies captadoras (uno de ellos novedoso), y su validación. En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos y se discuten los mismos. Finalmente en el Capítulo 6 se resumen las conclusiones de esta tesis y las perspectivas para futuros trabajos.

Capítulo 2

Modelos de Transposición

Un modelo que toma como entrada las componentes de la [irradiancia solar](#) sobre un plano horizontal en la superficie terrestre, y estima la irradiancia solar global sobre una superficie inclinada con respecto al plano horizontal, se denomina genéricamente *modelo de transposición* o *modelo de transporte*. En este capítulo se consideran algunos modelos de transposición en uso corriente y analizamos su desempeño tal como se reporta en la literatura.

Como veremos, el problema del transporte de irradiancia a planos inclinados reside fundamentalmente en el tratamiento de la componente difusa de la radiación, resultado de su interacción con la atmósfera en forma de complejos fenómenos de dispersión ([Liou, 2002](#)). Su distribución angular es anisotrópica y además fuertemente dependiente de la nubosidad local, por lo que los modelos de transposición pueden mostrar desempeños diferentes en las distintas regiones del globo. En Uruguay, donde la nubosidad parcial es frecuente, solo existe un trabajo publicado sobre dichos modelos ([Piccioli et al. 2018](#)) limitado a un solo sitio de observación, localizado en Salto.

En la Sección [2.1](#) se tratarán algunos conceptos básicos necesarios para describir la irradiancia solar que llega a la superficie terrestre. En la Sección [2.2](#) se detallan los distintos modelos de transposición que se evaluarán en esta tesis, para posteriormente en la Sección [2.3](#) analizar sus desempeños reportados en la literatura. Finalmente en la Sección [2.4](#) se consideran los modelos de separación, que permiten estimar las componentes difusa y directa de la radiación solar a partir de la irradiancia global en un plano horizontal. Algunos detalles sobre el movimiento aparente del Sol, la interacción entre la radiación y la atmósfera y la descripción de un modelo de cielo claro se presentan en el

Apéndice A.

2.1. Irradiancia solar incidente en superficie

La cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre es el resultado de una serie de fenómenos físicos que comienzan dentro del Sol (Duffie y Beckman, 2013, Iqbal, 1983), determinan su espectro de radiación y la energía incidente fuera de la atmósfera. El conocimiento de la posición del Sol en la bóveda celeste permite proyectar la irradiancia en una superficie de orientación arbitraria. Finalmente, la interacción de la radiación con la atmósfera determina la irradiancia incidente a nivel de la superficie terrestre.

2.1.1. Irradiancia solar incidente TOA

El límite vertical a partir del cual los efectos de la atmósfera se vuelven despreciables recibe el nombre de **Tope de la Atmósfera (TOA)**, debido a su sigla en inglés. La irradiancia solar en TOA incidente en un plano normal a la dirección Tierra-Sol, y a una distancia igual al radio medio de la órbita terrestre ($r_o = 1\text{UA} = 149.6 \times 10^6 \text{ km}$), recibe el nombre de **Irradiancia Solar Total (TSI)**, por su sigla en inglés. Esta magnitud presenta variaciones temporales del entorno de 0.2% debidas principalmente a la actividad solar, con ciclos marcados cuyo período ronda los 11 años (Abal et al. 2020). El promedio de largo plazo de esta irradiancia se conoce como **constante solar**, G_{sc} , cuyo valor recomendado por el World Radiation Center¹ (Kopp y Lean, 2011) y que usaremos en esta tesis es:

$$G_{sc} = 1361 \pm 1 \text{ W/m}^2. \quad (2.1)$$

Cuando la tierra se encuentra a distancia r del Sol, la irradiancia en incidencia normal en TOA se denomina G_o y, debido a que la potencia de emisión es la misma integrada en esferas concéntricas de cualquier radio, podemos escribir

$$G_o = G_{sc} \left(\frac{r_o}{r} \right)^2 \equiv G_{sc} F_n \quad (2.2)$$

donde $F_n = \left(\frac{r_o}{r} \right)^2$ recibe el nombre de **factor orbital**. Este factor de corrección

¹<https://www.pmodwrc.ch/en/research-development/solar-physics/tsi-composite/>

es debido a la excentricidad de la órbita terrestre y presenta una variación estacional del 3% respecto a la unidad (Spencer, 1971), y está dado por la Ec. (A.1) del Apéndice A.

La irradiancia en TOA (también llamada extraterrestre) sobre un plano horizontal, G_{oh} , se determina proyectando G_o sobre la normal a dicho plano. Por lo tanto se puede expresar como

$$G_{oh} = G_o \cos \theta_z = G_{sc} F_n \cos \theta_z, \quad (2.3)$$

donde θ_z es el ángulo cenital del Sol, y se calcula según la Ec. (2.4) a partir de las coordenadas geográficas y el instante de tiempo correspondiente.

Los detalles del cálculo de θ_z y otras magnitudes asociadas al movimiento del Sol a través de la bóveda celeste se presentan a continuación.

2.1.2. Movimiento aparente del Sol

Para un observador en la Tierra, la trayectoria que el Sol describe a través de la bóveda celeste queda determinada por medio de dos ángulos, como se muestra en la Figura 2.1 (a la izquierda). A saber:

- El ángulo cenital θ_z , formado por la línea Tierra-Sol y el cenit (o normal) local del observador. Su complementario se conoce como altura solar, α . Ambos ángulos varían entre 0° y 90° , con sentido opuesto.
- El azimut solar γ_s , formado por la proyección de la línea Tierra-Sol en la horizontal del observador, y la dirección Norte-Sur. Se considera negativo a la mañana y positivo a la tarde, variando en el rango $(-180^\circ, 180^\circ)$ y valiendo 0° cuando el Sol se encuentra en su punto más alto.

Estos ángulos se calculan a partir de información temporal y espacial del observador por medio de las siguientes relaciones trigonométricas (Abal et al. 2020, Iqbal, 1983):

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega, \quad (2.4)$$

y

$$\gamma_s = \text{signo}(\omega) \left| \arccos \left(\frac{\sin \delta - \cos \theta_z \sin \phi}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right|, \quad (2.5)$$

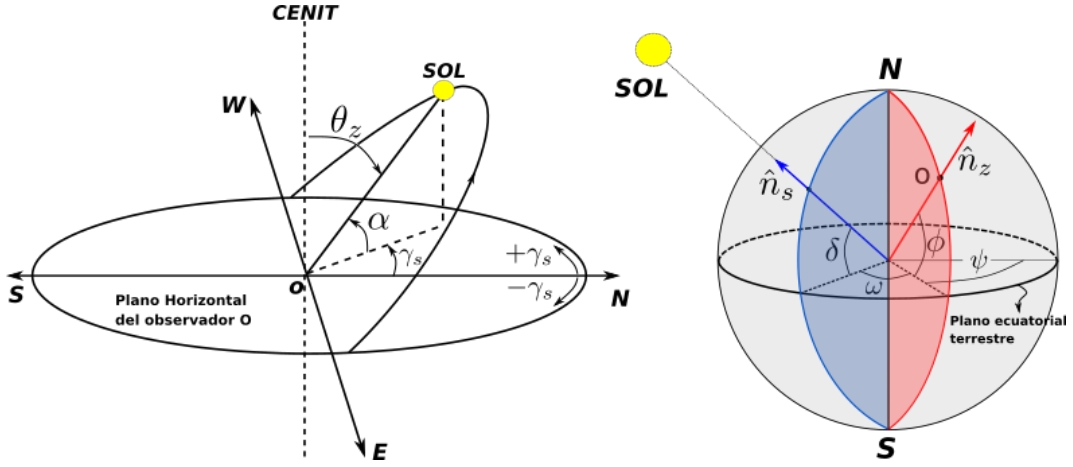


Figura 2.1: Izq: Movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste, descrito por los ángulos θ_z y γ_s , para un observador en el HS. Der: Sistema de coordenadas solidario a la Tierra para ubicar al observador O, y definir los ángulos involucrados en los cálculos de la posición aparente del Sol. Figuras adaptadas de [Iqbal, 1983](#) y [Alonso-Suárez, 2017](#).

donde ϕ es la latitud del observador, δ es la [declinación solar](#) y ω es el [ángulo horario](#). Estos tres ángulos se muestran en la Figura 2.1 (derecha), junto a un sistema de coordenadas solidario al observador en O. Nótese que el ángulo formado por los versores \hat{n}_z y \hat{n}_s es el cenital θ_z .

La declinación δ es el ángulo formado por el plano ecuatorial y la línea Tierra-Sol, y se expresa en función del ordinal-día del año en la Ec. (A.2) del Apéndice A, dado que su variación intra-día es despreciable a efectos prácticos. El ángulo horario ω está formado por el meridiano local del observador y el de la línea Tierra-Sol (marcados en rojo y azul respectivamente en la Figura 2.1). Este ángulo se determina a partir de la hora local, la latitud ϕ y la longitud ψ del observador, y su cálculo se presenta en la sección del Apéndice A.1.2.

2.1.3. Irradiancia incidente en la superficie terrestre

Se define la [irradiancia global horizontal \(GHI\)](#)¹, y se denota por G_h , a la irradiancia solar de todo origen hemisférico que incide sobre un plano horizontal a nivel de la superficie terrestre. Ésta es resultado de la interacción de la irradiancia TOA (de carácter direccional) con la atmósfera, donde se producen fenómenos de dispersión y absorción que resultan en una atenuación del haz directo y una irradiancia difusa proveniente de todo el cielo.

¹por su sigla en inglés, Global Horizontal Irradiance

GHI es la suma de una componente directa llamada **Irradiancia directa en plano horizontal (BHI)**¹, y una componente difusa llamada **irradiancia difusa horizontal (DHI)**², que se denota por G_{dh} . BHI es la proyección sobre la normal al plano horizontal de la **irradiancia directa normal (DNI)**³ que se denota por G_{bn} . La DNI son fotones que viajan en línea recta desde el Sol y no fueron dispersados por la atmósfera, mientras que la DHI se compone de fotones dispersados por la atmósfera que llegan de todas las direcciones de la bóveda celeste. DNI y BHI se relacionan por medio del ángulo cenital θ_z , cumpliéndose que $G_{bh} = G_{bn} \cos \theta_z$. Por lo tanto las componentes directa y difusa de la irradiancia se relacionan con la global según

$$G_h = G_{bn} \cos \theta_z + G_{dh}. \quad (2.6)$$

La **irradiancia global horizontal**, **irradiancia difusa horizontal** e **irradiancia directa normal**, forman un conjunto redundante de medidas de irradiancia, y son los principales insumos en las aplicaciones solares. La Ec. (2.6) recibe el nombre de *ecuación de clausura*, al imponer un vínculo entre las tres magnitudes. Si se cuenta con las tres medidas simultáneas, esta relación se puede usar como control de calidad exigiendo que la misma se satisfaga con cierto nivel de tolerancia. También permite calcular una componente cuando se tienen datos o estimaciones de GHI y la otra componente. Usualmente se emplea para determinar **DNI** a partir **GHI** y **DHI**, ya que la medida de DNI suele ser escasa como se verá en el Capítulo 3. Especial cuidado debe tenerse al estimar DNI usando la Ec. (2.6) cuando el sol se encuentra cerca del horizonte, ya que al dividir entre $\cos \theta_z$ se amplifica el error en la estimación al acercarse θ_z a 90° .

Si dividimos la ecuación de clausura por la irradiancia horizontal en **TOA**, G_{oh} , se obtiene la forma adimensionada de la Ec. (2.6)

$$\frac{G_h}{G_{oh}} = \frac{G_{bh}}{G_{oh}} + \frac{G_{dh}}{G_{oh}} \implies k_t = \tau_b + k_d \quad (2.7)$$

donde

$$k_t = \frac{G_h}{G_{oh}}, \quad \tau_b = \frac{G_{bh}}{G_{oh}} = \frac{G_{bn}}{G_o}, \quad k_d = \frac{G_{dh}}{G_{oh}}. \quad (2.8)$$

Aquí k_t se conoce como **índice de claridad**, τ_b es la **transmitancia directa** y k_d

¹Por su sigla en inglés, Beam Horizontal Irradiance

²Por su sigla en inglés, Diffuse Horizontal Irradiance

³Por su sigla en inglés, Direct Normal Irradiance

se denomina **irradiancia difusa normalizada**. La otra variable adimensionada de importancia es la **fracción difusa**, definida como la razón entre la irradiancia difusa y global, ambas en plano horizontal:

$$f_d = \frac{G_{dh}}{G_h}. \quad (2.9)$$

Obsérvese que combinando las Ecs. (2.8) y (2.9) se obtiene $k_d = f_d \times k_t$, por lo que sustituyendo en la Ec. (2.7) se obtiene una segunda forma adimensionada de la ecuación de clausura

$$\tau_b = (1 - f_d)k_t. \quad (2.10)$$

Es práctica corriente normalizar los conjuntos de datos de irradiancia de forma tal de trabajar con f_d , k_t y τ_b , debido a que estas variables representan límites físicos posibles a la irradiancia, tanto por sí mismas como dados por relaciones entre sí. Como veremos en el Capítulo 3, estas variables son fundamentales en el control de calidad de medidas en plano horizontal.

2.1.4. Irradiancia solar en planos inclinados

La **irradiancia global sobre un plano inclinado (GTI)**¹ se denota por G_i y puede descomponerse en sus componentes directa, difusa y reflejada por el suelo² según

$$G_i = G_{bi} + G_{di} + G_{ri}. \quad (2.11)$$

Aquí G_{bi} es la proyección de DNI sobre la normal a la superficie inclinada, G_{di} es la componente difusa proveniente de la parte visible de la bóveda celeste, y G_{ri} es la irradiancia difusa reflejada por las superficies circundantes que llega a la superficie objetivo. En la Figura 2.2 se esquematizan las distintas componentes de GHI y GTI.

El tratamiento de la componente directa G_{bi} es geométrico: basta con proyectar la DNI sobre la normal al plano inclinado, con quien forma el **ángulo de incidencia** θ . Este ángulo se relaciona de forma trigonométrica con los demás

¹Por su sigla en inglés, Global Tilted Irradiance

²Y otras superficies reflejantes cercanas. En este trabajo, por generalidad, supondremos que el suelo es la única superficie reflejante relevante y se lo modela como un reflector difuso ideal, como se verá mas adelante.

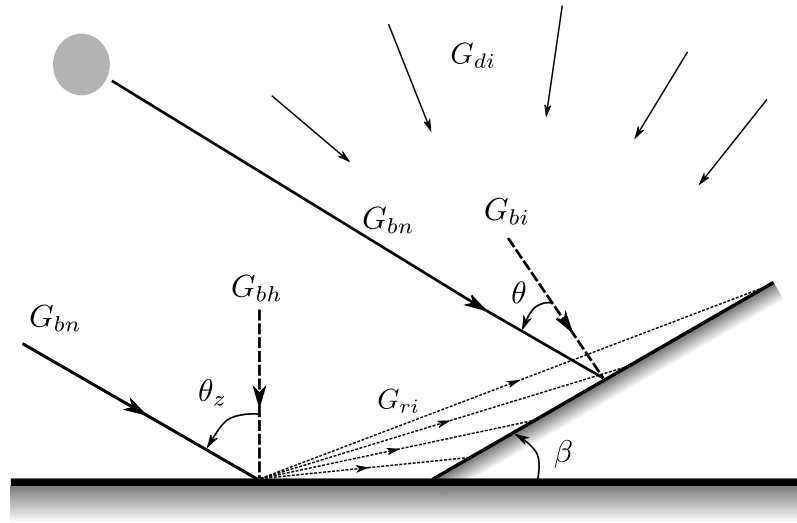


Figura 2.2: Esquema de las componentes de la irradiancia incidente en superficies horizontales e inclinadas. Figura de elaboración propia.

ángulos definidos, según la siguiente expresión adaptada de [Iqbal, 1983](#) para el Hemisferio Sur:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta \\ & + (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Aquí β es la inclinación de la superficie respecto a la horizontal, γ es el **azimut** de la superficie, ϕ es la latitud del observador, δ es la **declinación solar** y ω es el **ángulo horario** (estos dos últimos ángulos se definieron en la Sección 2.1.2).

La Figura 2.3 muestra la posición relativa del Sol respecto a una superficie inclinada de orientación arbitraria, cuyo azimut es γ . En este ejemplo, el plano inclinado se encuentra orientado hacia el cuadrante Noroeste por lo que $\gamma > 0$, mientras que el Sol se encuentra en el cuadrante Noreste, es de mañana y $\gamma_s < 0$.

Proyectando entonces DNI sobre la normal a la superficie obtenemos la componente directa en el plano inclinado

$$G_{bi} = G_{bn} \cos \theta = G_{bh} \times \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}, \quad (2.13)$$

donde la segunda igualdad resulta de la relación entre BHI y DNI. El cociente

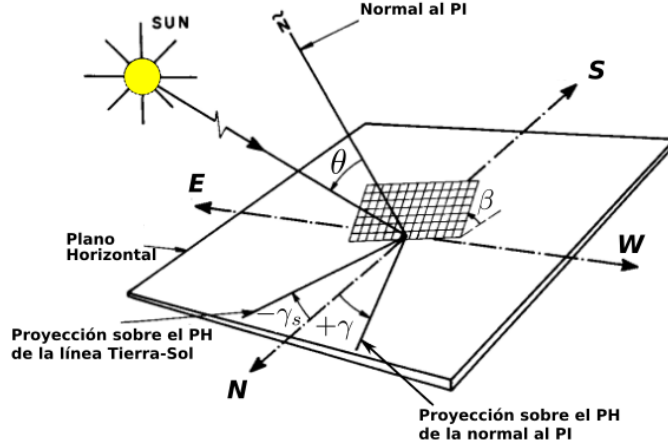


Figura 2.3: Posición relativa del Sol respecto a un plano inclinado con azimut positivo, en horas de la mañana. Adaptada de [Iqbal, 1983](#).

$$r_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.14)$$

recibe el nombre de [razón directa](#), y depende solo de la posición del Sol y la orientación del plano inclinado.

La estimación de la componente difusa reflejada por superficies circundantes, G_{ri} , puede llegar a ser un problema complejo si no se establecen algunas hipótesis simplificadoras. En este trabajo supondremos que la única superficie reflectora relevante es el suelo, modelado como un reflector difuso isotrópico plano de [reflectancia](#) ρ_g constante. En estas condiciones se demuestra que G_{ri} está dada dada por

$$G_{ri} = G_h \rho_g F_{c-g} = G_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right), \quad (2.15)$$

donde F_{c-g} representa el factor de vista con el que el captador ve el suelo (subíndices c y g respectivamente); o sea, la fracción de la irradiancia reflejada por el suelo que llega efectivamente al captador ([Abal et al. 2020](#), [Iqbal, 1983](#)). Valores típicos de ρ_g para superficies uniformes cubiertas de pasto o cemento se encuentran en el entorno de 0.15 a 0.30 ([Iturbide et al. 2020](#), [Iqbal, 1983](#)).

Por último, la componente difusa de la irradiancia en un plano inclinado, G_{di} , es la más compleja de simplificar sin dejar de lado efectos relevantes y modelables de la anisotropía de la bóveda celeste, y sus distintas formas de estimación son el foco de los modelos de transposición o transporte. Para ello

se define la *razón difusa inclinada*, r_d , como el cociente entre la radiación difusa sobre el plano inclinado y su equivalente en plano horizontal, DHI:

$$r_d = \frac{G_{di}}{G_{dh}}. \quad (2.16)$$

Combinando finalmente las Ecs. (2.13), (2.15) y (2.16) en la Ec. (2.11) que da la forma general de G_i , resulta

$$G_i = G_{bn} \cos \theta + G_{dh} r_d + G_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right). \quad (2.17)$$

Por lo tanto GTI puede calcularse a partir de GHI, DHI y DNI, el ángulo de incidencia (que depende de la etiqueta temporal, la ubicación del sitio y la orientación de la superficie, de acuerdo a la Ec. (2.12)), medidas de reflectividad del suelo o una suposición razonable sobre el terreno circundante, y un modelo de transposición que aporte una expresión para r_d .

2.2. Estimación de la razón difusa: modelos de transposición

El problema de la estimación de la razón difusa, r_d , implica modelar la distribución de la irradiancia difusa en la bóveda celeste por medio de un modelo de transposición. En esta Sección se presentan los cinco modelos que evaluaremos en esta tesis: una suposición isotrópica que sirve de referencia y que da lugar al modelo más simple, dos modelos sencillos y de amplio uso en la literatura que mejoran al primero, una corrección empírica del modelo base, y por último un modelo más sofisticado que resulta ser el más preciso en variedad de climas de acuerdo a la literatura.

2.2.1. Modelo isotrópico [ISO]

La suposición más sencilla que puede hacerse sobre la distribución angular de la radiación difusa en la bóveda celeste, es que la misma proviene de todas las direcciones con la misma intensidad. Esta suposición se conoce como hipótesis isotrópica o modelo isotrópico, y sus primeras menciones en la literatura se encuentran en los trabajos de [Kondratyev y Manolova, 1960](#) y [Liu y Jordan, 1961](#).

Bajo la hipótesis isotrópica la razón difusa inclinada r_d coincide con el factor de vista entre el cielo y el plano inclinado, que puede determinarse a partir del factor de vista entre este y el suelo, (ver Ec. (2.15)), aplicando la propiedad de que la suma de todos los factores de vista entre una superficie y los emisores que la rodean da uno. Por lo tanto

$$r_d^{iso} = F_{c-sky} = 1 - F_{c-g} = \frac{1 + \cos \beta}{2}. \quad (2.18)$$

Esta aproximación es buena en condiciones de cielo totalmente cubierto, donde la intensidad de la radiación difusa tiende a ser uniforme en la bóveda celeste. Sin embargo en condiciones de cielo claro no tiene en cuenta las dos regiones de mayor irradiancia que se observan en el cielo sin nubes: la región circumsolar (alrededor del disco solar), y una franja cercana al horizonte conocida como “brillo del horizonte” (Temps y Coulson, 1977, Hay y McKay, 1985). Estas se pueden reconocer en la Figura 2.4, que ilustra la anisotropía existente en la irradiancia difusa para diferentes condiciones de cielo.

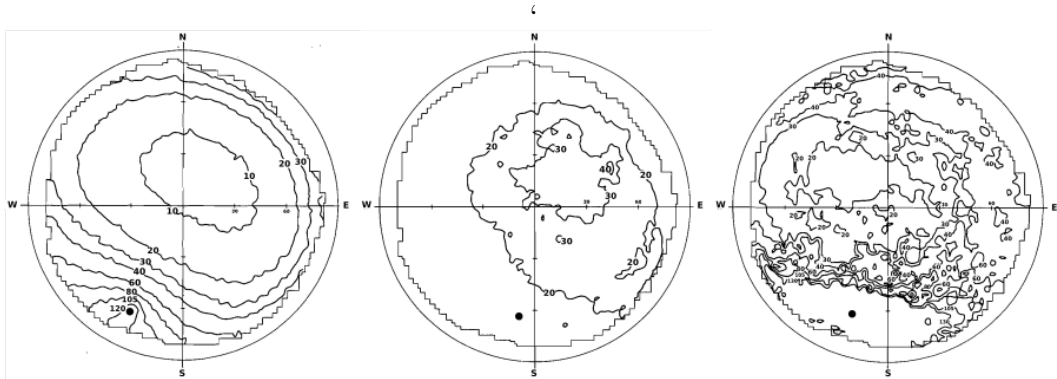


Figura 2.4: Distribución angular de la radiancia (medida en $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) de la bóveda celeste para condiciones de cielo claro, totalmente nublado y parcialmente nublado, respectivamente. La posición del Sol se representa por \bullet . Diagrama tomado de McArthur y Hay, 1981.

Al no considerar las anisotropías, especialmente la de la región circumsolar, el modelo ISO tiende a subestimar GTI cuando el Sol se encuentra en la región vista por el captador¹, salvo en condiciones muy nubladas. Sin embargo, sirve como base a superar por modelos más sofisticados que incorporan efectos anisotrópicos, y ha sido ampliamente utilizado debido a su sencillez. Además

¹En el contexto de captación de energía, son de interés las superficies orientadas al ecuador, capaces de recibir irradiancia directa.

todos los demás modelos de transposición que consideraremos a continuación se reducen al ISO en condiciones de nubosidad total.

2.2.2. Modelo de Hay y Davies [HD]

Propuesto por [Hay y Davies, 1980](#), este modelo supone que G_{di} proviene de dos fuentes: la región circumsolar (considerada como una fuente puntual) y radiación difusa supuesta isotrópica del resto de la bóveda celeste. En este sentido, representa una primera mejora al modelo ISO. La contribución circumsolar queda determinada por un índice de anisotropía apropiado, en este caso la [transmitancia directa](#), τ_b , definida en la Ec. (2.8).

En condiciones de cielo totalmente cubierto, la radiación directa es prácticamente cero y la contribución circumsolar es nula. En condiciones de cielo claro $\tau_b \approx 0.85$ y la contribución circumsolar es máxima. En condiciones intermedias, τ_b determina la proporción de irradiancia circumsolar; esta parte de la irradiancia difusa proviene de la dirección del Sol y por lo tanto se trata como si fuese directa. La fracción complementaria, $1 - \tau_b$, se asume difusa distribuida isotrópicamente. Por lo tanto, la razón difusa inclinada r_d se expresa como

$$r_d^{hd} = (1 - \tau_b) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \tau_b r_b. \quad (2.19)$$

Observar que para $\tau_b = 0$, se recupera el modelo isotrópico.

Este modelo es simple, no requiere información adicional al modelo isotrópico y reduce significativamente la subestimación asociada al mismo ([Yang, 2016](#)). Por ello es de uso frecuente y recomendado ([Duffie y Beckman, 2013](#)), y como veremos, ha servido de sustento para modificaciones y mejoras posteriores por parte de otros modelos.

2.2.3. Modelo de Temps, Coulson y Klucher [TCK]

Este modelo propuesto por [Klucher, 1979](#) se basa en las medidas radiométricas directas en condiciones de cielo claro realizadas por [Temps y Coulson, 1977](#) en California. Éstas demostraron la existencia de las regiones circumsolar y brillo del horizonte, donde la irradiancia es mayor respecto al resto de la bóveda celeste.

Esta anisotropía es modelada introduciendo factores de corrección empíricos a la razón difusa isotrópica de la forma:

$$r_d^{tck} = r_d^{iso} (1 + F \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z) [1 + F \sin^3(\beta/2)], \quad (2.20)$$

donde los factores $(1 + \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z)$ y $[1 + \sin^3(\beta/2)]$ que modelan la región circumsolar y el brillo del horizonte respectivamente, son introducidos por [Temps y Coulson, 1977](#). El factor de modulación $F = 1 - f_d^2$, donde f_d es la [fracción difusa](#), es introducido por Klucher de forma tal de ponderar las condiciones de cielo claro y nubosidad total. F vale cero en condiciones de cielo totalmente nublado (y entonces el modelo se reduce al isotrópico), y se acerca a la unidad en condiciones de cielo claro ya que f_d tiene valores mínimos del orden de 0.15. Bajo estas condiciones el modelo se aproxima al propuesto por Temps y Coulson (que se obtiene con $F = 1$ en la Ec. (2.20)).

2.2.4. Modelo de Reindl [HDKR]

Este modelo, propuesto por [Reindl et al. 1990](#), está basado en los modelos de Hay-Davies y Klucher, por lo que es conocido en la literatura como HDKR ([Duffie y Beckman, 2013](#)). Estima la porción de radiación circumsolar difusa por medio de τ_b (transmitancia directa) tratándola como directa al igual que Hay y Davies, y la contribución del brillo del horizonte utilizando el factor de corrección propuesto por [Temps y Coulson, 1977](#), modulado para toda condición de cielo por [Klucher, 1979](#). Es por lo tanto un modelo que resulta de combinar los modelos [HD] y [TCK].

La razón difusa inclinada para este modelo se expresa entonces como

$$r_d^{hdkr} = (1 - \tau_b)r_d^{iso} \left[1 + f' \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + \tau_b r_b, \quad (2.21)$$

donde $f' = \sqrt{1 - f_d^2}$ es el factor de modulación para la corrección del brillo del horizonte; éste se acerca a cero en condiciones de cielo cubierto (donde no hay brillo del horizonte) y aumenta a medida que la nubosidad decrece.

2.2.5. Modelo de Perez et al. [PER]

Se trata de una familia de modelos ([R. Perez et al. 1986](#), [R. Perez et al. 1987](#) y [R. Perez et al. 1990](#)), que se ha modificado y refinado hasta su versión más aceptada ([R. Perez et al. 1990](#)), que es la que se emplea en esta tesis. La idea original propone una partición geométrica del hemisferio celeste en tres

regiones mostradas en la Figura 2.5:

- Un fondo isotrópico de radiancia L .
- Una región circumsolar de radiancia $F_1 \times L$. En R. Perez et al. 1986 se le asigna un medio-ángulo $\alpha = 15^\circ$; luego en R. Perez et al. 1987 se asume que proviene de una fuente puntual centrada en el Sol, simplificando el modelo.
- Una banda alrededor del horizonte que subtiende un ángulo $\xi = 6.5^\circ$, que luego en R. Perez et al. 1987 se simplifica a una región infinitesimal en $\theta_z = 90^\circ$. Su radiancia es $F_2 \times L$.

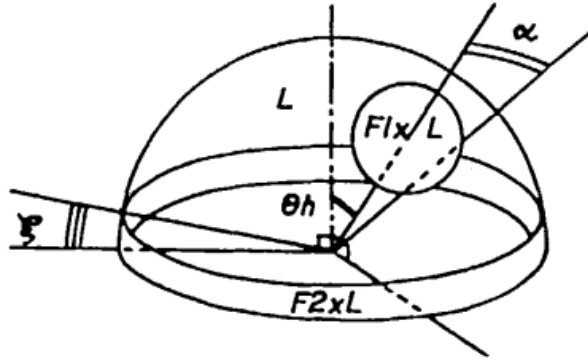


Figura 2.5: Distribución esquemática de la irradiancia en la bóveda celeste, tomado de R. Perez et al. 1986.

Con las simplificaciones al modelo mencionadas, la razón difusa inclinada se parametriza como

$$r_d^{per} = (1 - F_1)r_d^{iso} + F_1 \left(\frac{a}{c} \right) + F_2 \sin \beta, \quad (2.22)$$

donde $a = \text{máx}(0, \cos \theta)$, $c = \text{máx}(\cos 85^\circ, \cos \theta_z)$, y los factores F_1 y F_2 dependen del estado del cielo según

$$F_1 = \text{máx}(0, F_{11}(\varepsilon) + k_d F_{12}(\varepsilon) + \theta_z F_{13}(\varepsilon)); \quad (2.23)$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + k_d F_{22}(\varepsilon) + \theta_z F_{23}(\varepsilon); \quad (2.24)$$

$$\varepsilon = \frac{(G_{dh} + G_{bn})/G_{dh} + 1.041 \times \theta_z^3}{1 + 1.041 \times \theta_z^3}; \quad (2.25)$$

donde θ_z está en radianes y k_d es la [irradiancia difusa normalizada](#) definida en la Ec. (2.8). Los coeficientes F_{ij} se determinan a partir de ε , al que nos referiremos como parámetro de claridad de Perez. Este parámetro se expresa originalmente como $\varepsilon = (G_{dh} + G_{bn})/G_{dh}$ (R. Perez et al. 1987), y luego se lo modifica de acuerdo a la Ec. (2.25) para reducir la dependencia con θ_z (R. Perez et al. 1990). Los F_{ij} resultan de optimizar por mínimos cuadrados la GTI estimada contra datos de diferentes inclinaciones, orientaciones y sitios. En particular, el conjunto de parámetros que empleamos (Tabla 2.1) es el validado en R. Perez et al. 1990 contra datos de 13 sitios.

ε	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
[1, 1.065)	0.008	0.588	0.062	0.060	0.072	0.022
[1.065, 1.23)	0.130	0.683	0.151	0.019	0.066	0.029
[1.23, 1.5)	0.330	0.487	0.221	0.055	0.064	0.026
[1.5, 1.95)	0.568	0.187	0.295	0.109	0.152	0.014
[1.95, 2.8)	0.873	0.392	0.362	0.226	0.462	0.001
[2.8, 4.5)	1.133	1.237	0.412	0.288	0.823	0.056
[4.5, 6.2)	1.060	1.600	0.359	0.264	1.127	0.131
[6.2, $+\infty$)	0.678	0.327	0.250	0.156	1.377	0.251

Tabla 2.1: Coeficientes para el modelo de Perez en función del parámetro de claridad de Perez ε , tomado de R. Perez et al. 1990.

Los modelos [ISO], [HD], [TCK] y [HDKR] forman una jearquía natural de modelos progresivamente más refinados, que incluyen la estructura y simplicidad del primero. Por otra parte, [PER] es un modelo no analítico que realiza una partición geométrica del cielo considerando la anisotropía de la irradiancia difusa, por lo que presenta un nivel de complejidad y sofisticación mayor a los precedentes, con varios parámetros establecidos empíricamente.

2.3. Desempeño de modelos en la literatura

Antes de discutir el desempeño reportado de los modelos seleccionados, es necesario definir los indicadores a utilizar. Se selecciona el conjunto más básico de indicadores a efectos de poder comparar entre diferentes autores. Estos indicadores se utilizarán además en el resto de este trabajo.

2.3.1. Métricas de desempeño

Los indicadores o métricas de desempeño más comúnmente utilizados para comparar estimativos de modelos contra datos son el desvío promedio o sesgo,

conocido por sus siglas en inglés como MBD (Mean Bias Deviation), y el desvío cuadrático medio o dispersión, RMSD (Root Mean Square Deviation). Se definen como sigue: si contamos con N medidas y_i y sus correspondientes estimativos \hat{y}_i entonces

$$\text{MBD} = \frac{1}{N} \sum_1^N (\hat{y}_i - y_i); \quad (2.26)$$

$$\text{RMSD} = \left(\frac{1}{N} \sum_1^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \right)^{1/2}, \quad (2.27)$$

por lo que estos indicadores, en el contexto de medidas de irradiancia tienen unidades de W/m^2 . El MBD está definido de modo que un valor positivo indica una sobre estimación y un valor negativo una subestimación del modelo respecto a las medidas. Es usual también emplear sus formas normalizadas rRMSD y rMBD, expresadas en porcentajes relativos a la media de las medidas, $\langle y_i \rangle$; es decir:

$$\text{rMBD} = \frac{100}{\langle y_i \rangle} \times \text{MBD}; \quad \text{rRMSD} = \frac{100}{\langle y_i \rangle} \times \text{RMSD}. \quad (2.28)$$

Un indicador que permite comparar las funciones de distribución de un conjunto de datos con el conjunto de los correspondientes estimativos, es el Índice de Kolmogorov-Smirnov ([Espinari et al. 2009](#), [C. A. Gueymard, 2014](#), [Abal et al. 2017](#)), definido como

$$\text{KSI} = \int_{X_{\min}}^{X_{\max}} D(x) dx, \quad (2.29)$$

donde $D(x)$ es la diferencia absoluta entre las funciones de distribución acumuladas (CDF) de ambos conjuntos, cuyo rango está entre X_{\min} y X_{\max} . El índice KSI tiene las mismas dimensiones que la de los conjuntos comparados, y su versión normalizada, rKSI, puede calcularse dividiendo entre la media de las medidas, como se hizo con los otros indicadores¹. Este índice evalúa la similitud estadística de los datos y los estimativos, y es válido para cualquier tipo de CDF ([C. A. Gueymard, 2014](#)).

¹Esta no es la forma estándar de calcular el rKSI; se hace así por motivos prácticos, de modo que quede comparable al rMBD y rRMSD.

2.3.2. Desempeño previo de los modelos seleccionados

Muchos de los primeros trabajos de comparación y validación de modelos utilizan totales diarios y de mayor escala (Liu y Jordan, 1963, Hay y McKay, 1985, Yang, 2016), al estar enfocados al desempeño de colectores de placa plana y otras aplicaciones térmicas, además de la limitación en la cadencia de las medidas de radiación en las décadas del 60 y 70. Con la penetración de la energía fotovoltaica, se hace indispensable contar con comparativos a nivel horario y sub horario, las escalas temporales que se manejan en esta tesis. Actualmente, es común medir irradiancia a escala minutal para luego generar las medidas integradas a escala horaria y sub-horaria.

En el trabajo de R. Perez et al. 1987 se compara el desempeño de varias de las versiones de su modelo (distintos anchos para la banda del horizonte, y ángulos subtendidos por la radiación circumsolar) a nivel horario contra el modelo ISO y dos modelos anisotrópicos, HD y TCK. Para esto cuenta con datos de estaciones en Francia y USA, compuestos por medidas de GTI de diferentes orientaciones e inclinaciones, junto a medidas de GHI y DNI. A los efectos de comparar con los resultados de esta tesis, nos interesan los correspondientes a una orientación Sur e inclinaciones de 43° y 90° (pared vertical), para el modelo PER definido en la Sección 2.2.5 y datos provenientes de Estados Unidos. Los resultados reportados en términos del MBD y RMSD se muestran en la Tabla 2.2.

Modelos	$\beta = 43^\circ, \gamma = 180^\circ$		$\beta = 90^\circ, \gamma = 180^\circ$	
	MBD	RMSD	MBD	RMSD
ISO	-20.1	32.1	-10.1	28.8
HD	-9.0	20.6	-2.7	21.1
TCK	-3.4	14.2	7.7	22.1
PER	-1.0	11.1	5.0	17.2
\bar{G}_h	375.1		220.7	
\bar{G}_{dh}	152.8		86.7	

Tabla 2.2: Indicadores absolutos en W/m^2 del modelo PER, comparados con otros tres modelos de transposición. Resultados en base a dos años de datos horarios de Albany, Nueva York (R. Perez et al. 1987). Se reporta también la media de GHI y DHI en W/m^2 .

Se observa claramente la subestimación del modelo ISO en forma de sesgos muy negativos a 43° , que mejora con los modelos HD y TCK, encontrándose que PER es el modelo con menor sesgo para dicha inclinación. Esto redundando en

una menor incertidumbre en términos del RMSD y un ranking de modelos que se correlaciona con la evolución y sofisticación de los mismos. Esta tendencia se distorsiona en el caso de la superficie vertical, donde los sesgos de todos los modelos aumentan de forma tal que TCK y PER pasan a sobreestimar la irradiancia. Este aumento del sesgo favorece al modelo ISO que disminuye su incertidumbre mientras todos los demás modelos la aumentan. Esto puede estar relacionado al impacto mayor de la componente reflejada G_{ri} de la irradiancia que incide sobre una pared vertical respecto a una a 43° , donde la incidencia de las superficies circundantes es mayor aumentando la incertidumbre.

En [Yang, 2016](#) se encuentra una recopilación de veintiséis modelos de transposición con datos de cuatro estaciones localizadas en USA, Austria y Singapur, que miden GTI para distintas inclinaciones y azimuts. La cadencia de estos datos es 15-minutal y el desempeño de los modelos se evalúa usando las métricas rRMSD y rMBD. De este análisis se extrajeron los indicadores de estaciones con orientaciones similares a las empleadas en esta tesis, en particular las de superficies que miran al ecuador. Estos resultados son un punto de referencia importante, y se muestran en la [Tabla 2.3](#).

	Eugene (30; 180)	Golden (40; 180)	Oldenburg (45; 180)
Modelos	rMBD(%)		
ISO	-2.2	-3.9	-5.6
HD	-0.2	-0.9	-1.0
TCK	1.1	-0.2	0.7
HDKR	-0.1	-0.7	-0.4
PER	1.4	0.5	1.9
	rRMSD(%)		
ISO	5.5	7.6	11.9
HD	4.1	5.2	6.7
TCK	4.4	4.4	6.7
HDKR	4.0	5.0	6.5
PER	3.9	4.1	6.1

Tabla 2.3: Indicadores rMBD y rRMSD porcentuales respecto a la media de GTI, tal como se reportan en el trabajo de [Yang, 2016](#). Lamentablemente, la media de GTI no se incluye en dicho trabajo. La orientación en grados (β, γ) se muestra junto al nombre de la estación.

Existen sin embargo algunas diferencias metodológicas entre el trabajo de [Yang, 2016](#) y la presente tesis, como ser el hecho de que en el primer caso la GHI se calcula a partir de los datos de DHI y DNI por medio de la relación de clausura (Ec. (2.6)), y que en la estaciones de Eugene y Golden se cuenta

además con la medida de reflectancia ρ_g ¹. La dispersión de los modelos anisotrópicos es en general baja; de acuerdo a la Tabla 2.3 se reportan entre 4% y 7% de la media de GTI. Esto anticipa una dificultad a la hora de resolver entre estos modelos, cuando la incertidumbre asociada a las medidas de GTI es similar a estos indicadores.

Ambos trabajos apuntan a una subestimación de la irradiancia por parte del modelo ISO, y una mejora importante en los sesgos y dispersiones al emplear modelos de transposición anisotrópicos. El desempeño de los modelos anisotrópicos en términos del rRMSD se degrada a medida que aumenta la inclinación, con valores de incertidumbre relativamente altos en paredes verticales (Tabla 2.2). El modelo PER muestra un rRMSD levemente menor que los demás modelos, pero el buen desempeño de otros modelos más sencillos como HD o HDKR los hacen apropiados y recomendables para la mayoría de las aplicaciones solares (Duffie y Beckman, 2013).

2.3.2.1. Reflectancia

El primer antecedente de estimación de la reflectancia es de Liu y Jordan, 1963, quienes lo asumen constante e igual a 0.2 para toda superficie que se encuentre libre de nieve, sin considerar dependencia estacional alguna ni consideraciones locales. Es importante tener en cuenta que el término reflejado puede llegar a contribuir a GTI con hasta 100 W/m² en paredes verticales (Ineichen et al. 1990). A nivel local existen trabajos que demuestran la variabilidad estacional de la reflectancia, en el caso de superficies verticales rodeadas de pasto y asumiendo un modelo de transposición isotrópico (Vitale et al. 2019). Sin embargo, estas condiciones no son aplicables a las medidas de GTI en LE, dado que las mismas no están rodeadas de pasto ni a 90°.

Existen variedad de modelos que intentan vincular la reflectancia con el nivel de irradiancia, el ángulo cenital y otras variables², aunque no se encuentran mejoras en la estimación de GTI respecto a suponer un valor constante efectivo, medido localmente (Ineichen et al. 1990).

¹Es importante aclarar que se corroboró una omisión en el reporte de los resultados de los rMBD porcentuales en el trabajo de Yang. En este, los sesgos fueron calculados al revés de la definición usual dada en la Ec. (2.26), por lo que deben cambiarse de signo para que mantengan coherencia con nuestra definición.

²La mayoría utiliza como base algún modelo de transposición para determinar ρ_g . Como nuestro objetivo es validar dichos modelos, no resulta conveniente modelar la reflectancia en este trabajo.

2.4. Modelos de separación directa-difusa

Se conocen con el nombre de *Modelos de Separación* a aquellos que estiman la **fracción difusa** f_d a partir de GHI y parámetros geométricos o atmosféricos (Yang, 2022). Al estimar f_d se obtiene DHI utilizando la Ec. (2.9), y luego se puede despejar DNI de la relación de clausura dada por la Ec. (2.6). De esta manera, estamos “separando” la irradiancia global en sus componentes difusa y directa. Está claro que el uso de modelos de separación implica un costo en términos de incertidumbre asociada a las componentes DHI y DNI.

Estos modelos tienen una gran importancia práctica, ya que la medida de GHI es de fácil implementación (basta con instalar un piranómetro fijo y nivelado horizontalmente) mientras que la medida de DHI requiere mecanismos con partes móviles (seguidores de dos ejes o bandas rotantes) o enmascaramientos complejos, de forma tal de bloquear la DNI y obtener solamente la irradiancia difusa¹. Este instrumental es bastante más caro y requiere mayor mantenimiento respecto a un piranómetro estacionario midiendo GHI. Por lo tanto, la mayor parte de las bases de datos y estimativos por satélite se concentran mayormente en esta medida.

Por otra parte, dado que la estimación de GTI por medio de la Ec. (2.17) implica tener medidas o estimativos de GHI y sus dos componentes, es importante poder evaluar el impacto en el desempeño de los diferentes modelos de transposición al utilizar una estimación de DHI por medio de un modelo de separación. Este es uno de los objetivos principales de esta tesis.

Existe una gran cantidad de modelos de separación, y un volumen importante de literatura encargado de validarlos. Uno de los trabajos más importantes en este sentido es el de C. A. Gueymard y Ruiz-Arias, 2016, donde se evalúan 140 modelos de separación (todos los conocidos hasta ese momento), a escala minutal con datos de 54 estaciones que abarcan la mayoría de los climas del planeta. Los modelos, en su mayoría desarrollados a nivel horario, son evaluados a nivel minutal y con sus coeficientes originales.

Los modelos de separación son empíricos y surgen de ajustar funciones apropiadas a datos simultáneos de GHI y DHI. En particular, en esta tesis, se trabajará con la familia de modelos propuesta por Ruiz-Arias et al. 2010 cuya expresión general es una función doble exponencial (o función Gompertz) de

¹En la sección siguiente se discutirán en detalle los diferentes instrumentos utilizados para medir DHI y DNI.

la forma

$$f_d(k_t, m) = a_0 - a_1 \exp \left[- \exp(a_2 + a_3 k_t + a_4 k_t^2 + a_5 m + a_6 m^2) \right], \quad (2.30)$$

donde m es la [masa de aire](#), definida en el Apéndice A, y k_t el [índice de claridad](#). Denominamos este modelo como RA2 (por tener dos predictores: m y k_t), siguiendo la nomenclatura de [Abal et al. 2017](#).

Al fijar $a_4 = a_5 = a_6 = 0$ en la Ec. (2.30) se elimina la dependencia con la masa de aire, obteniéndose el modelo RA1 con un predictor. Finalmente, un modelo con dos predictores simplificado se obtiene al fijar $a_4 = a_6 = 0$ en la forma general; este modelo recibe el nombre de RA2s.

Esta familia de modelos fue validada ([Ruiz-Arias et al. 2010](#)) contra datos de 21 estaciones en España, Alemania y Estados Unidos. Estos modelos, entre otros, fueron validados a nivel horario en [Abal et al. 2017](#) con coeficientes localmente ajustados usando datos para nuestra región. Mostraron rRMSD del orden del 18-20 % de la media de la fracción difusa medida, estando los modelos bivariados, RA2 y RA2s, entre los de mejor desempeño.

Modelos	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
	Coef. originales, Ruiz-Arias (2010)						
RA1	0.95	1.04	2.30	-4.70	X	X	X
RA2S	0.98	1.02	2.88	-5.59	X	-0.11	X
RA2	0.94	1.54	2.81	-5.76	2.28	-0.13	0.013
	Coef. "global", Abal et al (2017)						
RA1	0.97	1.01	3.07	-6.17	X	X	X
RA2S	0.97	1.11	3.38	-5.84	X	-0.13	X
RA2	0.98	1.24	3.47	-5.71	0.32	-0.25	0.02

Tabla 2.4: Conjunto de coeficientes para las tres versiones del modelo de separación de Ruiz-Arias, obtenidos en [Ruiz-Arias et al. 2010](#) (el trabajo original) y la validación local de [Abal et al. 2017](#).

En la Tabla 2.4 se muestran los coeficientes obtenidos del ajuste para la familia de modelos RA tanto en el trabajo original de Ruiz-Arias como en la validación local de [Abal et al. 2017](#). Como complemento, en la Figura 2.6 se muestra el ajuste obtenido para el modelo RA1 en la validación de [Ruiz-Arias et al. 2010](#) y para el RA2 en la validación local.

En la Sección 5.4.1 realizamos un nuevo ajuste local y validación de estos modelos, ya que el conjunto de datos usado en este trabajo es diferente al de

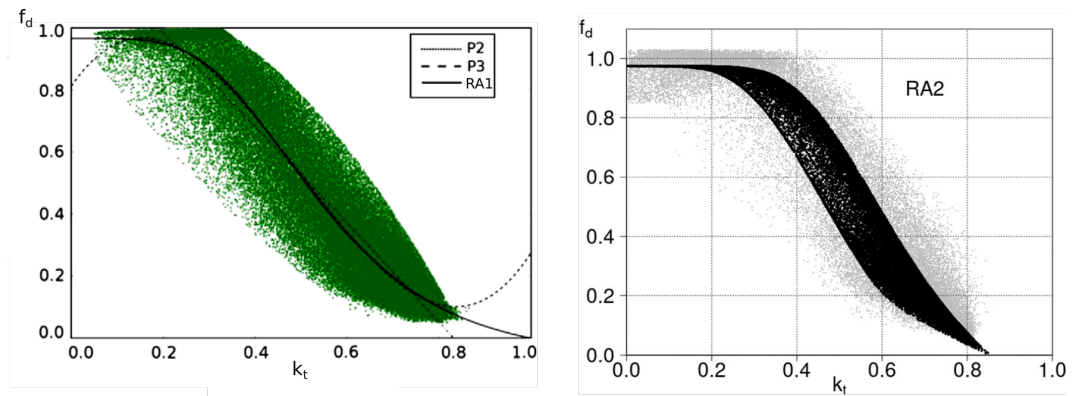


Figura 2.6: Diagramas $f_d - k_t$ con ajuste horario de modelos de separación, Izq: RA1 con un predictor, adaptado de [Ruiz-Arias et al. 2010](#) y Der: RA2 con dos predictores, extraído de [Abal et al. 2017](#).

[Abal et al. 2017](#). De estas validaciones resulta que el mejor modelo en términos de simplicidad y desempeño es el RA2s, y será el utilizado como modelo de separación en esta tesis.

Capítulo 3

Medidas y datos

La base de datos principal que sirve de insumo para este trabajo proviene de la [RMCIS](#), administrada por el [LES](#). La misma está compuesta por ocho estaciones ubicadas en distintos puntos del país, realizando medidas de forma continua e ininterrumpida desde 2010 hasta el presente. En [Abal et al. 2015](#) y [Alonso-Suárez, 2017](#) se detallan hitos y evolución de la [RMCIS](#).

De las estaciones que forman parte de la RMCIS se seleccionaron las cuatro que cuentan, al menos, con medidas de [GHI](#), [DHI](#), y [GTI](#) simultáneas: la estación principal (LE) ubicada en el LES en Salto, la estación de Artigas (AR) ubicada en el aeropuerto de Artigas, la estación ubicada en el predio del INIA - La Magnolia en Tacuarembó (TA) y la estación TT/PP, ubicada en la estación experimental del INIA Palo a Pique en el departamento de Treinta y Tres¹. La ubicación de las estaciones de la RMCIS en el territorio Uruguayo se muestra en la Figura 3.1, y más detalles sobre emplazamiento y tipo de medida se muestran en la Tabla 3.1.

Como complemento a esta base de datos, se utilizaron datos del [National Renewable Energy Laboratory \(NREL\)](#) de la estación ubicada en Golden, Colorado, en Estados Unidos ([Andreas y Stoffel, 1981](#)). Estos datos son de primera calidad, cuentan con medida de GHI y sus dos componentes, además de medida de reflectancia ρ_g , y son el estándar de referencia para las medidas de irradiancia en tierra de USA².

¹Esta estación fue re-localizada en el 2016, de la estación experimental Paso de la Laguna a la estación experimental Palo a Pique, a unos pocos kilómetros de distancia. Salvo por la diferencia en las coordenadas geográficas, se tratará el conjunto de medidas TT y PP como un único conjunto, representativo de la región Este

²Estos datos son de libre acceso y fueron extraídos de <https://midcdmz.nrel.gov/apps/sitehome.pl?site=BMS>

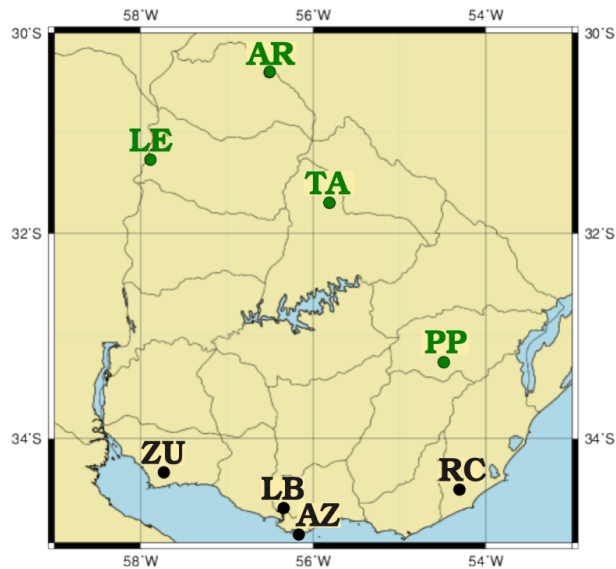


Figura 3.1: Distribución en el territorio uruguayo de la RMCIS. En verde las cuatro estaciones con medidas de GTI y DHI consideradas en este trabajo.

En la Sección 3.1 se describe brevemente el instrumental empleado para las distintas medidas de la irradiancia, relegando detalles de funcionamiento al Apéndice B y haciendo foco en la calidad de los datos, así como la asignación de incertidumbres típicas para cada estación. En la Sección 3.2 se detalla el esquema de control de calidad de los datos de irradiancia en plano horizontal y su filtrado a escala minutal. El resultado de este filtrado da lugar a los

Sitio	Código	(ϕ, ψ) (°)	asnm (m)	GHI1	GHI2	DHI	DNI	Mide ρ_g	(β, γ) (°)	Período
Salto	LE1	(-31.27, -30.40)	42	•	•	•	•		(30, 0)	1/Ene/2015 14/Mar/2018
Salto	LE2	(-31.27, -30.40)	42	•	•	•	•		(45, 0)	15/Mar/2018 1/Feb/2021
Artigas	AR	(-30.40, -56.25)	136	•	•	•			(30, 0)	9/Feb/2017 20/Set/2018
Tacuarembó	TA	(-31.74, -55.98)	142	•	•	•			(45, 0)	5/Ago/2015 16/Oct/2018
Treinta y Tres	TT	(-33.28, -54.17)	26	•	•	•			(45, 0)	28/Feb/2014 26/Set/2016
Palo a Pique	PP	(-33.26, -54.49)	59	•	•	•			(45, 0)	26/Set/2016 23/Nov/2018
Golden, CO	GO	(39.74, 105.18)	1829	•	•	•	•	•	(40, 180)	1/Ene/2020 1/Ene/2022

Tabla 3.1: Ubicación de las estaciones, orientación de la medida de plano inclinado y tipo y período de interés de las medidas. GHI1 representa la medida principal de GHI, mientras que GHI2 es la medida secundaria (o redundante).

datos integrados a escalas temporales mayores (10-minutal y horaria), que son nuestro principal insumo para la evaluación de los modelos de transposición. El capítulo finaliza con la Sección 3.3, dedicada a la discusión de los resultados del filtrado y la integración, clasificando las estaciones de acuerdo a la calidad y confiabilidad de sus datos.

3.1. Instrumentos de medida

La medida de **irradiancia global horizontal** (GHI) se realiza por medio de un piranómetro de clase A o B, con respuesta espectral plana (ISO, 2018). Este es un radiómetro con campo de vista hemisférico con un elemento termosensible que mide la diferencia de temperatura entre el sensor y el cuerpo del instrumento con una termopila. En todas las estaciones evaluadas en este trabajo, la medida principal de GHI se realiza con piranómetros Kipp and Zonen (K&Z), de la serie CMP¹. Se usan CMP6, CMP10 o CMP11 en las diferentes estaciones, según la disponibilidad de equipos, mientras que en GO (Golden, CO) los datos de GHI provienen de una medida tomada con un CMP22. En GO se mide además la reflectancia del suelo por medio de dos piranómetros, uno de ellos colocado de forma invertida (mirando al suelo desde una altura de 1.6 m), por lo que se calcula ρ_g como el cociente entre esta GHI “invertida” y la GHI usual².

En la estación LE (ubicada en la azotea del LES), la medida de **irradiancia difusa horizontal** (DHI) se realiza también con un piranómetro K&Z CMP10 o CMP11 montado sobre un sistema de seguimiento solar fino, con una pequeña esfera adosada que bloquea en todo momento el disco solar, obstruyendo el haz de directa y parte de la radiación circumsolar³.

Montado sobre este sistema de seguimiento se encuentra además un pirheliómetro, instrumento que mide la **irradiancia directa normal** (DNI). Se trata de un tubo colimador cuyo campo de vista abarca un ángulo sólido de 5° de apertura, que permite el paso de la irradiancia directa y una pequeña parte de la circumsolar, cuando se encuentra correctamente alineado con la direc-

¹Ver <https://www.kippzonen.com/ProductGroup/3/Pyranometers>. Consultada el 2/7/22.

²Debido a que no contamos con medida de reflectancia en las estaciones locales, en el Capítulo 5 se estudiará el impacto de variar ρ_g en la evaluación de los modelos de transposición.

³La esfera se dimensiona de modo de bloquear un ángulo sólido de semiángulo igual a 5°. Este ángulo coincide con la apertura del pirheliómetro CHP1 que mide DNI.

ción del Sol. En las estaciones LE y GO se mide DNI con pirheliómetros K&Z modelo CHP1.

La Figura 3.2 muestra al conjunto formado por el piranómetro que mide GHI, el piranómetro con esfera de sombreadamiento que mide DHI, y el pirheliómetro. Estos se encuentran montados sobre un tracker SOLYS2, también fabricado por la empresa Kipp & Zonen. Las medidas de GHI y DHI de LE y GO, de alta calidad, son ventiladas. Es decir, el piranómetro se monta dentro de un dispositivo que hace circular aire seco y tibio por el instrumento. Este flujo estabiliza la temperatura del mismo y mantiene la cúpula libre de polvo y gotas de agua, mejorando la calidad de la medida.



Figura 3.2: Sistema de seguimiento solar SOLYS2 montado en la azotea del LES, con el detalle del pirheliómetro CHP1 y el piranómetro CMP10 montado dentro de un ventilador/calentador, que mantiene la limpieza de la cúpula y estabiliza la temperatura del instrumento.

En las estaciones AR, TA y TT/PP se mide DHI y GHI2 (medida redundante de GHI) con un único instrumento sin partes móviles, el piranómetro SPN1 de la empresa Delta-T Devices¹, consistente en un arreglo hexagonal de siete termopilas que detectan la radiación, cubiertas por una máscara hemisférica como se ve en la Figura 3.3. Un cálculo interno realizado a partir de estas siete medidas simultáneas, junto con un diseño adecuado de la máscara que cubre los sensores, permite determinar las componentes directa y difusa, de

¹<https://delta-t.co.uk/product/spn1/>

acuerdo a un algoritmo que se explica en el Apéndice B junto con más detalles del funcionamiento de este sensor.

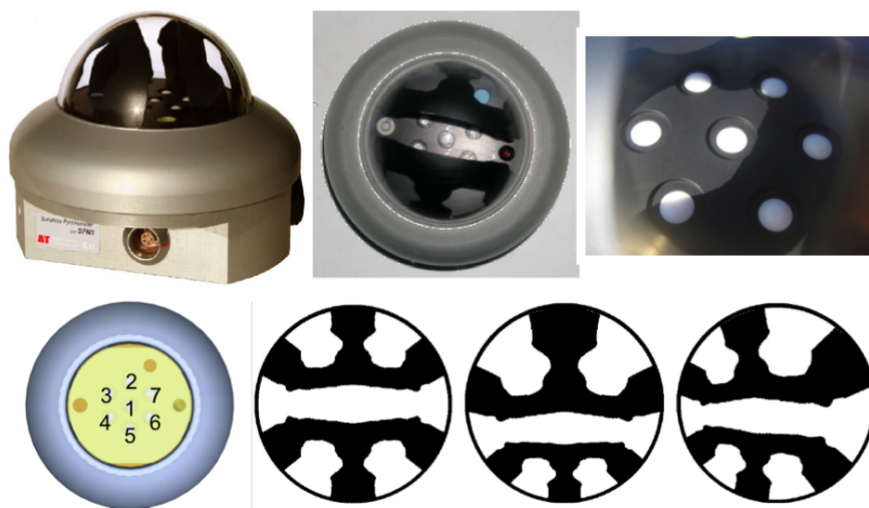


Figura 3.3: Arriba: diferentes vistas del SPN1, a la derecha detalle de un patrón de sombreado en un instante dado. Abajo: arreglo de termopilas en el SPN1 y vista equiangular del cielo desde el punto de vista del sensor 1 (izquierda), el 2 y 5 (medio) y los sensores 3,4,6 y 7 (derecha).

Por último, la medida de [irradiancia global sobre un plano inclinado](#) (GTI) en la estación LE se realiza con un piranómetro CMP6 de K&Z, mientras que en las restantes estaciones se mide GTI con un radiómetro de silicio LI-200R de la empresa Li-Cor. Estos radiómetros de silicio tienen una respuesta espectral más limitada que sus contrapartes de la serie CMP y se degradan más rápidamente (necesitando calibraciones periódicas), pero al mismo tiempo son más económicos y tienen un menor tiempo de respuesta, por lo que su elección responde a un compromiso entre la incertidumbre, el mantenimiento y su costo. Tanto el SPN1 como el LI-200R se muestran en la Figura 3.4 formando parte de la estación AR, siendo esta configuración la típica de las estaciones AR, TA y TT/PP.

Todos los piranómetros de la RMCIS son retirados para ser calibrados bi-anualmente de acuerdo a la norma ISO 9847:1992(E) (ISO, 1992), comparando contra un piranómetro K&Z CMP22 clase A espectralmente plano (incertidumbre menor al 2 % diaria). Éste último actúa como patrón nacional, y se calibra contra el World Radiometric Reference (WRR) en el World Radiation Center (WRC) en Davos cada 5 años.

Un resumen del instrumental por estación, con su inicio y fin de medida,



Figura 3.4: Estación AR, con su CMP6 midiendo GHI1, el SPN1 midiendo GHI2 y DHI, y el LI200R midiendo GTI a 30°.

se encuentra en la Tabla [B.1](#).

No todas las estaciones reciben el mismo nivel de mantenimiento y visitas. La estación LE se encuentra en el predio del Laboratorio de Energía Solar, tiene un instrumental de mayor calidad, y además cuenta con mantenimiento frecuente por lo que genera datos de menor incertidumbre a priori. Las estaciones de campo (AR, TA y TT/PP) se encuentran emplazadas en lugares apartados, recibiendo visitas esporádicas de mantenimiento o cuando se detectan fallas en el registro de sus medidas.

Incertidumbre instrumental

En virtud de estas diferencias mencionadas, es importante determinar una incertidumbre real para las medidas de cada estación, a partir de la información de incertidumbre del instrumental suministrada por los fabricantes, las condiciones de medida, la calibración y el nivel de mantenimiento y frecuencia de visitas a las estaciones. En la Tabla [3.2](#) se presentan las incertidumbres típicas para cada instrumento en las distintas estaciones de la RMCIS de este trabajo, así como su clasificación según la norma ISO 9060:2008 ([ISO, 2018](#)). Para la estación GO no tenemos información concreta más allá de la del ins-

Medida	instrumento	Fabricante	Clasificación ISO9060:2008	mantenimiento	incertidumbre típica (%)	estaciones
GHI	CMP10/11	KZ	Clase A - EP	semanal	3	LE
DHI	CMP10/11	KZ	Clase A - EP	semanal	5	LE
DNI	CHP1	KZ	Clase A - EP	semanal	2	LE
GHI	CMP10/11	KZ	Clase A - EP	esporádico	5	TA, TT/PP
GHI	CMP6	KZ	Clase B - EP	esporádico	6	AR
GHI2	SPN1	DeltaT	Clase B	esporádico	5	AR,TA,TT/PP
DHI	SPN1	DeltaT	Clase C	esporádico	10	AR,TA,TT/PP
GTI	Li-200R	Li-Cor	Clase B - RR	esporádico	6	AR,TA,TT/PP
GTI	CMP6	KZ	Clase B - EP	semanal	6	LE

Tabla 3.2: Incertidumbres típicas asignadas por estación, según especificaciones y calidad del instrumental, nivel de mantenimiento de la estación y tipo de medida. EP = espectralmente plano, RR = de respuesta rápida.

trumental utilizado, pero es de suponer que su nivel de mantenimiento es alto por lo que sus incertidumbres típicas son iguales o menores a las de LE.

3.2. Control de calidad - Datos minutales

Partiendo de los datos minutales considerados en la Tabla 3.1, se realiza un exhaustivo proceso de inspección visual y filtrado, involucrando tanto a las medidas de GHI, DHI y DNI, como sobre las medidas de GTI. De esta forma se busca generar un conjunto de datos integrados a escala 10-minutal y horaria de calidad y estacionalmente representativo. Esta metodología implica los siguientes pasos, para cada estación:

- Inspección visual preliminar de datos a escala minutal, por medio de diversas gráficas.
- Implementación de un conjunto de filtros sobre las medidas minutales de GHI, DHI y DNI. Como resultado se obtiene un archivo espejo de los datos, con una etiqueta 0 o 1 que determina si el dato minutal pasó cada uno de los filtros (máscaras booleanas).
- Estimación del desvío de azimut de las superficies inclinadas respecto al Norte ($\gamma = 0$).
- Aplicación de otro conjunto de filtros de plano inclinado, relativos a la medida de GTI minutal. Este filtrado implica la estimación previa del azimut real de la superficie inclinada.

- Nueva inspección visual de datos minutales filtrados en busca de posibles datos anómalos que hayan pasado los filtros.
- Integración de los datos minutales filtrados, a escala 10-minutal y horaria.
- Determinación del período final de datos para la validación de los modelos. Este período debe ser tal que respete la proporción de minutos diurnos que pasan el control de calidad en cada estación del año. Llamaremos a este conjunto estacionalmente representativo o balanceado.

Debido a su complejidad y al hecho de tratarse de un aporte original de este trabajo, el paso que implica la estimación del azimut de las superficies inclinadas (y el consiguiente filtrado de los datos de GTI) será explicado en el capítulo siguiente. En el resto de esta Sección se detallará el procedimiento de filtrado de datos minutales en plano horizontal, su reporte de descarte e integración a escala diezminutal y horaria.

3.2.1. Inspección visual de datos

La visualización de los datos minutales previa al filtrado es esencial para determinar períodos de faltantes, posibles errores en la medida y dar un diagnóstico preliminar de la calidad de los datos con los que se trabaja. En este sentido, se realizaron cuatro pruebas gráficas en cada estación:

- Serie temporal de las medidas de GHI, DHI, DNI y GTI junto a un histograma de frecuencias de cada medida. Estas gráficas revelan períodos con faltantes, outliers y posibles offsets negativos.
- Mapa de colores de estas series en función de la hora del día, coloreados por el valor de irradiancia. Pueden mostrar problemas de sombreado de sensores y etiquetas temporales erróneas.
- Gráfico de la [fracción difusa](#), f_d en función del [índice de claridad](#) k_t , más conocido como *diagrama $f_d - k_t$* . Estas dos cantidades adimensionadas imponen límites físicos y el diagrama tiene una forma típica bien definida cuando los datos son de buena calidad.
- Serie temporal de GTI en función del [ángulo horario](#), ω , para días seleccionados con condiciones de cielo claro. Esto permite detectar a primera vista posibles desvíos en el azimut de la superficie respecto al valor nominal.

- En las estaciones de campo (AR, TA y TT/PP), dispersión de la medida de GHI1 realizada con el piranómetro CMP6 contra la GHI2 realizada por el SPN1.

Debido a la cantidad de gráficos que se procesaron, solo mostraremos los más relevantes de cada estación. En la web http://les.edu.uy/tesis/datos/insp_visual/ se puede acceder a la totalidad de las gráficas que formaron parte de esta inspección visual, junto a los detalles de cómo está organizado este repositorio de imágenes.

LE

En la Figura 3.5 se muestra la serie temporal de las medidas de irradiancia de LE, con sus respectivos histogramas. Se observan algunos períodos de medidas faltantes, especialmente en DHI y DNI a mitad del 2015 y en GTI en buena parte del 2017. Además hay un período entre setiembre de 2018 y agosto de 2019 donde la DNI toma valores negativos grandes. Una inspección más en detalle de la serie de DNI constató que esto sucede en general a horas cercanas a la salida y puesta del sol, así como en condiciones de nubosidad alta donde la DNI es baja. De acuerdo al histograma que acompaña a la serie temporal de DNI, hay muchos datos negativos, y se desconoce si la totalidad de la medida se encuentra afectada por este problema.

En la Figura 3.6a se muestra el diagrama $f_d - k_t$ a escala minutil, distinguiendo según $\theta_z < 75^\circ$ (Sol alto) y $\theta_z > 75^\circ$ (Sol bajo). Esta gráfica revela que los datos en condiciones de Sol bajo son poco confiables, y que se encuentran afectados por lo que se conoce como “efecto coseno”. Esta es una típica fuente de error en la medida de los piranómetros¹, por lo que es usual emplear un filtro sobre los datos que descarte aquellos cuyo ángulo cenital es mayor a cierto valor umbral, usualmente de 75° u 80° .

En la misma gráfica se reconocen también cuatro zonas de puntos que por más que no están afectados por el efecto coseno, muestran un comportamiento anómalo. Las regiones (a) y (c) donde f_d se aleja de 1 en condiciones de cielo muy nublado (k_t bajo); aquí la medida de GHI debería ser casi igual a DHI, pero el error experimental genera discrepancias entre ambas. La región (b), con f_d cercana a 1 y k_t alto, relacionado con desalineaciones del seguidor solar,

¹Reflexiones internas múltiples del haz que incide en el interior del piranómetro de forma muy sesgada, cuando el sol se encuentra cerca del horizonte.

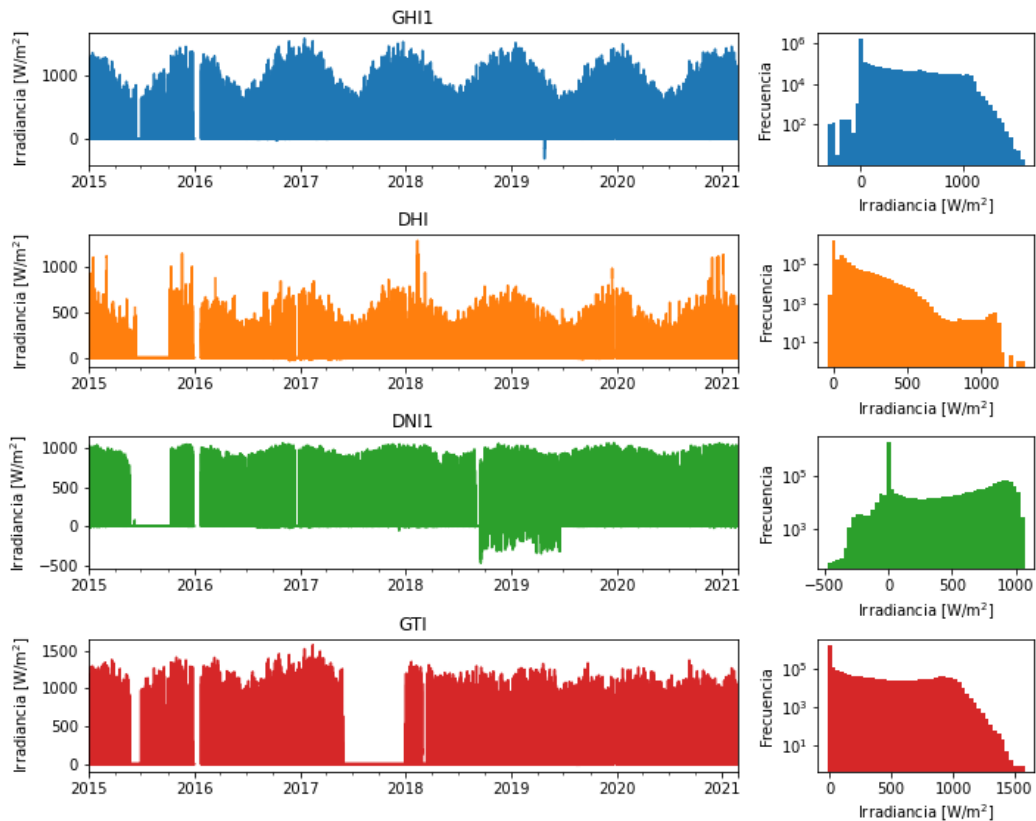


Figura 3.5: Series de irradiancia minutal para LE, acompañado de un histograma de frecuencias.

donde el piranómetro que mide DHI queda parcial o totalmente expuesto a la irradiancia directa registrando una lectura casi igual a la de GHI. Y finalmente la región (d), que muestra un conjunto de puntos con f_d baja para un rango de k_t amplio. Esto corresponde a un eclipse total ocurrido el 14 de Diciembre de 2020, entre las 12:00 y las 13:30 afectando la medida de LE. Se reportó otro eclipse el 26 de Febrero de 2017 entre las 09:30 y las 12:30 que afectó la medida de algunas estaciones (en LE se encontraba nublado en ese momento por lo que no aparece en el diagrama $f_d - k_t$). Estos datos deben descartarse manualmente ya que pasan el conjunto de filtros que aplicaremos más adelante.

Como complemento, en la Figura 3.6b se muestra el mismo diagrama para datos de Sol alto y coloreado por año. Se observa que la medida en 2020 es mejor que en otros años, presentando menos densidad de puntos en la región (c).

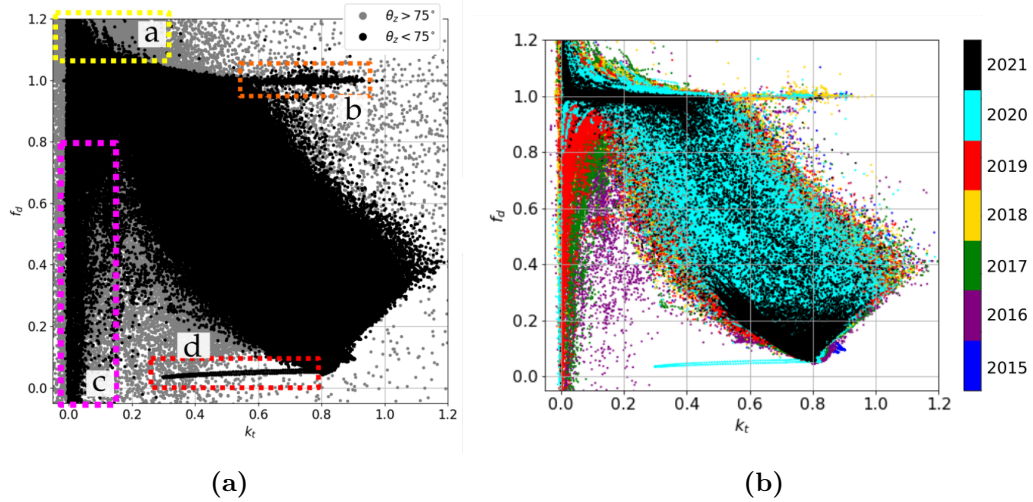


Figura 3.6: Diagrama f_d-k_t minutal para LE. (a) Distinguiendo según el valor del ángulo cenital θ_z y se detallan cuatro regiones de puntos con comportamiento anómalo. (b) Coloreado por año para datos con $\theta_z < 75^\circ$

GO

Esta estación cuenta con medidas altamente confiables, lo que se refleja en el diagrama $f_d - k_t$ de la Figura 3.7 a la izquierda. Se observan pocas discrepancias entre la medida de GHI y DHI en la región de $k_t < 0.1$, donde se espera que la fracción difusa sea cercana a la unidad. La diferencia con lo visto en la Figura 3.6 es notoria y se lo muestra junto al diagrama $f_d - k_t$ en TA debido a su interesante similitud.

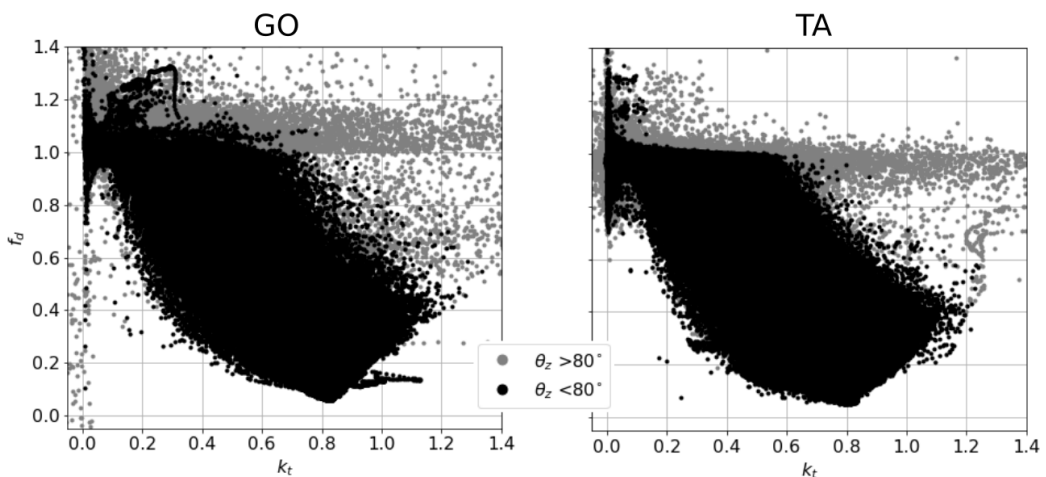


Figura 3.7: (Izq.) Diagrama $f_d - k_t$ a partir de los datos a escala minutal de la estación GO (Golden, Colorado), de NREL. (Der) Ídem para TA.

TA

El conjunto de datos en plano horizontal de TA, de acuerdo tanto a su serie temporal como a su diagrama $f_d - k_t$ mostrado en la Figura 3.7 (derecha), no presenta ninguna problemática evidente, hecho destacable teniendo en cuenta que la medida de DHI se realiza con un SPN1 de mayor incertidumbre que el CMP22 usado en GO. Sin embargo, de acuerdo a lo presentado en la Figura 3.11d se observa, a partir de la medida de GTI, un claro desvío del azimut de la superficie inclinada respecto al Norte, problema que se repite en todas las estaciones de campo.

AR

De acuerdo a la serie temporal de la Figura 3.8, se ve claramente que la totalidad de las medidas de GHI2 y DHI realizadas por el SPN1 están afectadas por un offset negativo diurno, mientras que la medida de GHI1 realizada con un CMP6 no. A finales de setiembre de 2018 la estación cambió su instrumental, DHI pasó a medirse con un SOLYS2 (y se dejó de medir GTI), y el problema no aparece más.

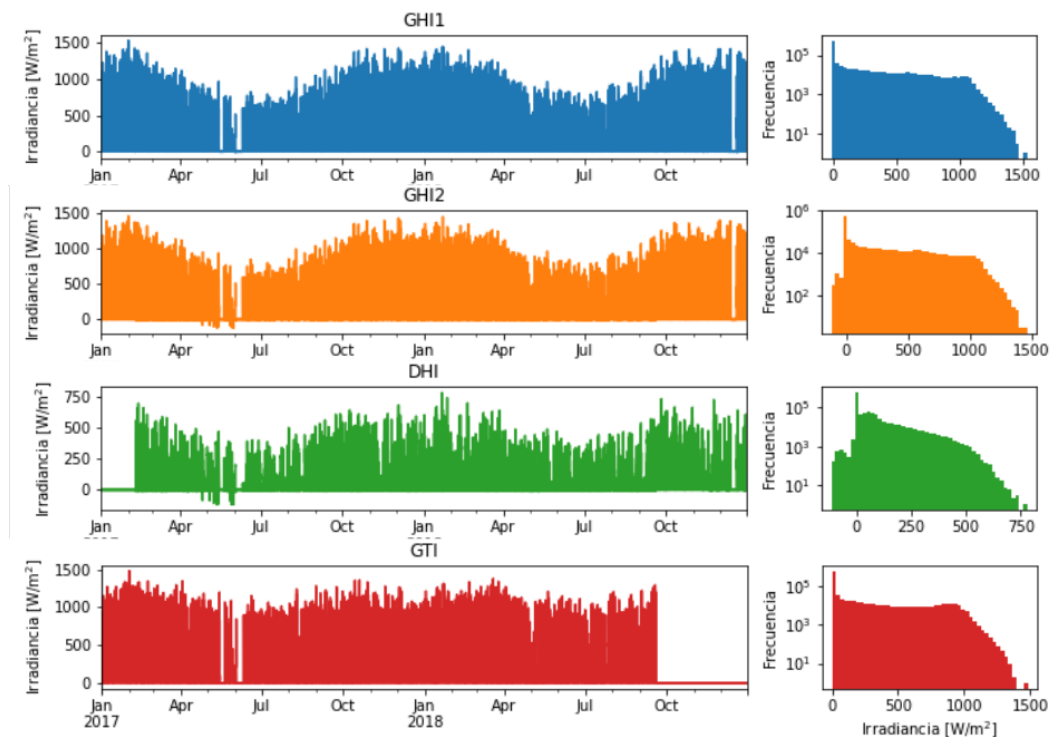


Figura 3.8: Serie temporal de datos crudos minutas para AR.

Complementariamente, en la Figura 3.9 se observa del mapa de colores de irradiancia para la medida principal de GHI. De la misma se destaca la existencia de un obstáculo fijo cerca del horizonte, que afecta la medida entre octubre de 2017 y marzo de 2018 aproximadamente, en horas de la mañana.

En las estaciones que miden GHI y DHI simultáneas con SPN1, la medida de GHI de este instrumento (conocida como GHI2, o medida redundante) se utiliza junto a la de DHI para calcular exclusivamente la fracción difusa. La medida de GHI principal, proveniente de piranómetros CMP6, se usa para todos los demás cálculos. Por lo tanto importa relevar la discrepancia que pudiera existir entre ambas medidas de GHI, graficando la dispersión como GHI2 en función de GHI1. En las Figuras 3.10a y 3.10b se las grafica para las estaciones AR y TT, observándose en particular para el caso de AR un conjunto de puntos de alta discrepancia entre ambas medidas asociado a la sombra que muestra la Figura 3.9, que actúa sobre ambos piranómetros en distintos momentos haciendo que midan diferente.

Con el objetivo de asegurar cierta coherencia entre las dos medidas de GHI se propone descartar toda medida cuya diferencia relativa entre GHI1 y GHI2 supere el 20%. Este filtro tiene un mayor impacto en los valores bajos de GHI asociados a condiciones de nubosidad muy alta, o sol muy bajo. El efecto de aplicar este filtro se observa en los diagramas $f_d - k_t$ de las Figuras 3.10c y 3.10d, descartando para el caso de AR puntos que se encuentran en la zona de f_d baja y k_t intermedia.

Finalmente la estación presenta, de acuerdo a la Figura 3.11b, un leve desvío azimutal hacia el Oeste, que será estimado más adelante.

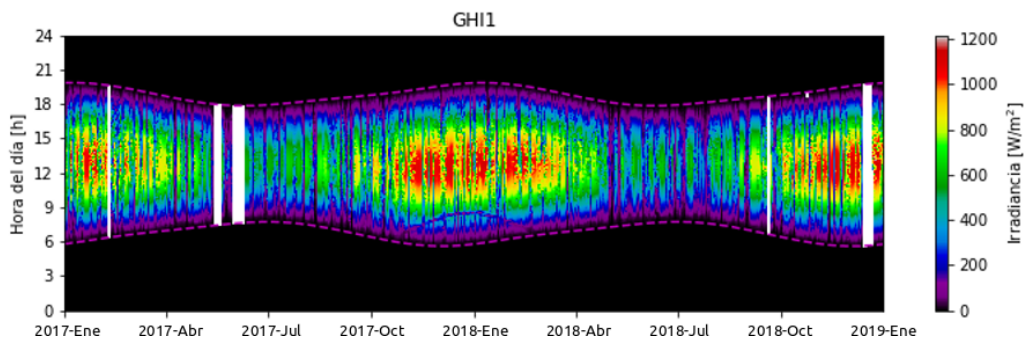


Figura 3.9: Serie temporal de GHI1 (medida principal de GHI) coloreado por irradiancia y en función de la hora del día, para AR.

TT/PP

Esta estación presenta un muy marcado desvío al Oeste de acuerdo a la Figura 3.11c, confirmado por las entradas en la bitácora de la estación. En cuanto a su diagrama $f_d - k_t$ se observa un comportamiento anómalo similar al de AR en la región de k_t bajo. La serie temporal de TT no muestra problemas de datos negativos, pero sí faltantes importantes: no hay medidas entre diciembre de 2014 y abril de 2015, así como medida de DHI entre marzo y julio de 2016. PP no muestra problemas a primera vista en su serie temporal de medidas, y

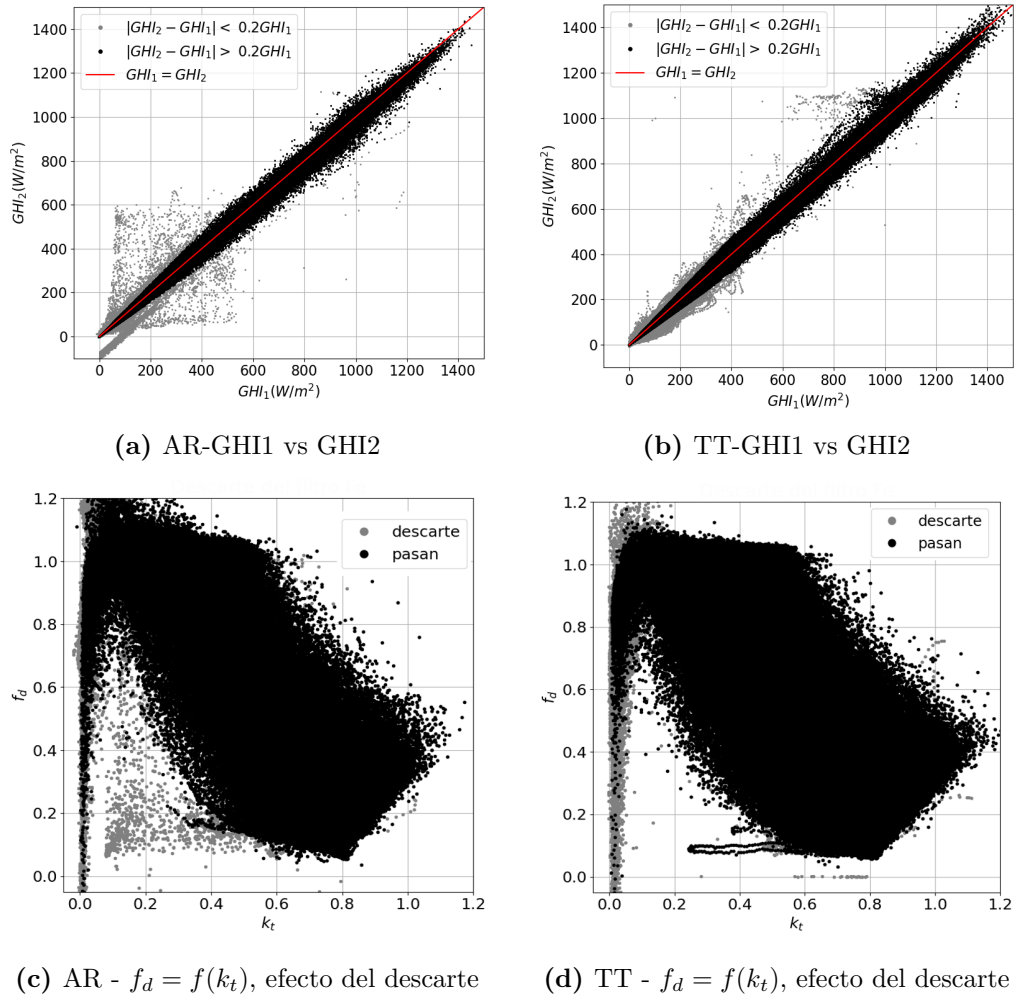


Figura 3.10: (a) y (b) discrepancia entre GHI1 (medida con piranómetro de la serie CMP) y GHI2 (medida con SPN1) para AR y TT. En gris se muestran los puntos cuya diferencia relativa entre ambas GHI es mayor al 20%; este criterio se empleará como filtro de control de calidad. (c) y (d) efecto de este filtro sobre el diagrama $f_d - k_t$ para datos con Sol alto ($\theta_z > 80^\circ$). En TT se observa un eclipse en forma de puntos con f_d bajo y k_t entre 0.25 y 0.5.

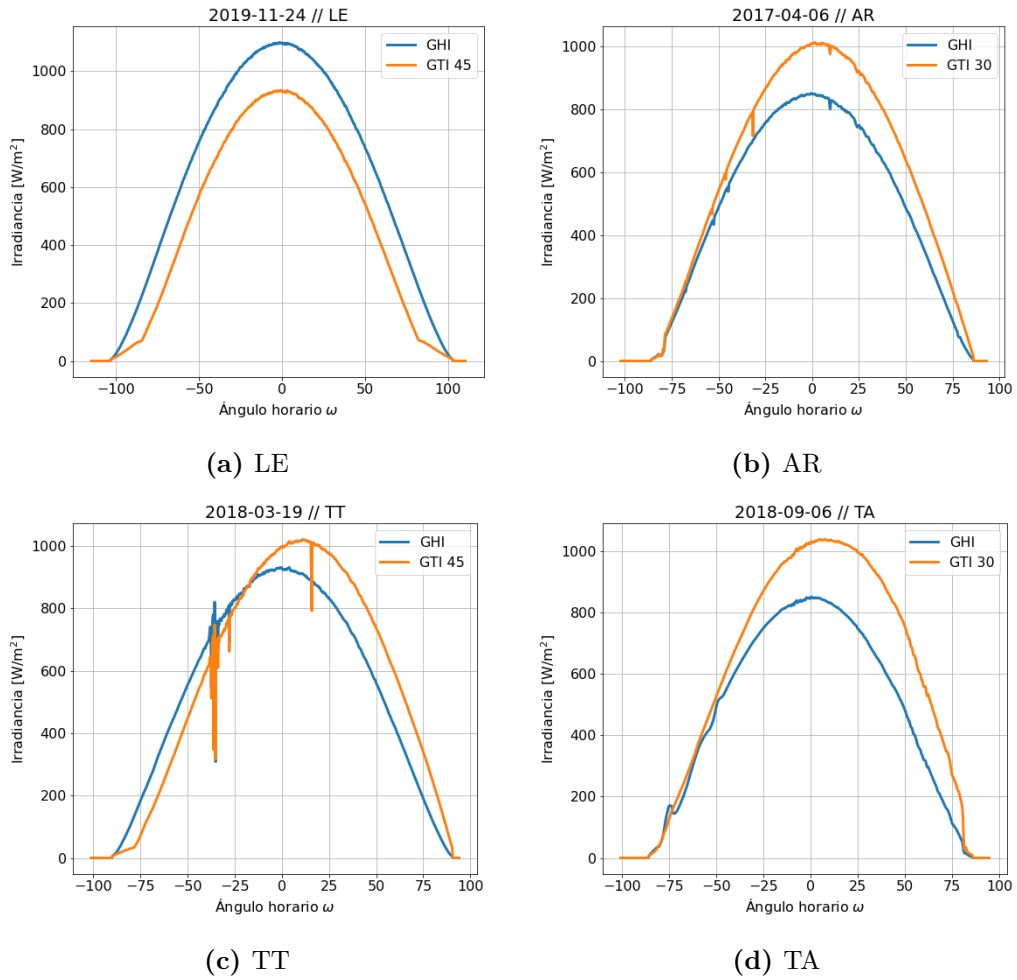


Figura 3.11: GHI y GTI en función del ángulo horario para las cuatro estaciones, a nivel minutal y para días claros seleccionados, evidenciando el desvío azimutal en TA, TT y AR.

su diagrama $f_d - k_t$ presenta la misma problemática que TT y AR.

3.2.2. Filtrado automático

Se sigue un esquema de filtrado basado en el trabajo de [Perez-Astudillo et al. 2018](#), que extiende la conocida recomendación de la [Baseline Surface Radiation Network \(BSRN\)](#)¹ ([Long y Dutton, 2010](#)) empleando un conjunto de 19 filtros a nivel de medidas en plano horizontal (es decir, sobre GHI, DHI y DNI), a escala minutal. Hemos omitido algunos filtros por considerarlos

¹Proyecto bajo la órbita del World Climate Research Programme (WCRP) cuyo objetivo es detectar cambios notables en la irradiancia en superficie terrestre, posiblemente relacionados al cambio climático. <https://bsrn.awi.de/>.

redundantes, y se adaptaron otros. Además se agregaron controles de calidad para los datos de GTI no mencionados en la referencia, así como también se agregó el filtro de discrepancia entre la medida de GHI1 y GHI2 para las estaciones que miden difusa con SPN1.

Estos filtros involucran una o más de las tres medidas relevantes (GHI, DHI y DNI), y actúan por separado o relacionándolas, estableciendo límites físicos para estas magnitudes. Los filtros que actúan sobre la medida de GTI son independientes de los aplicados a las tres componentes, pero implican conocer el desvío azimutal del plano inclinado y por lo tanto se explicarán en el Capítulo 4.

La condición a satisfacer de cada filtro y su justificación se detalla a continuación. Esta información se presenta de forma resumida en la Tabla 3.3, mostrándolos en forma de lista, con su condición de aceptación resumida y los parámetros por estación que se utilizaron.

Filtros de plano horizontal

- F_0 : $\theta_z < \theta_{z_u}$. Asegura que el Sol se encuentra a cierta altura sobre el horizonte, evitando el efecto coseno que aumenta la incertidumbre de la medida de los piranómetros. Además descarta datos afectados por obstáculos en el horizonte (árboles, edificios, etc). El valor umbral empleado en todas las estaciones es 80° .
- F_1, F_2, F_3 : $G_h, G_{dh}, G_{bn} > G_{min}$. Es posible que las medidas de irradiancia puedan tomar valores negativos, debido a offsets térmicos de los instrumentos. El mínimo admisible para estas medidas dado por BSRN es $G_{min} = -4 \text{ W/m}^2$, aunque si de la inspección visual se desprende, usaremos un valor más estricto de 0 W/m^2 .
- F_4, F_5 : $G_h < G_o \times a \times (\cos \theta_z)^b + c$. Valores máximos de GHI y DHI permitidos por BSRN. Los parámetros a, b y c se determinan por inspección visual al graficar GHI y DHI contra $\cos \theta_z$.
- F_6 : $G_{bn} < G_o$. La directa no puede superar su valor en el tope de la atmósfera.
- F_7 : $G_{bn} < G_{bn,cs}$. Se establece un máximo para DNI en condiciones de cielo claro, $G_{bn,cs}$, estimado por el modelo ESRA de cielo claro ([Rigollier](#)

et al. 2000, ver detalles en el Apéndice A.3). Este modelo requiere estimativos de turbidez de Linke, TL, parámetro adimensionado para el que se generaron ciclos mensuales en territorio uruguayo (Laguarda y Abal, 2016). Estos ciclos, TL_c , oscilan típicamente entre 2.5 y 4.5 y son los que se usan para las estaciones de la RMCIS. Para GO se usaron los ciclos de TL que se encuentran en la biblioteca pvlb de Python (Holmgren et al. 2018) y fueron calculados por Remund et al. 2003. A TL_c se le resta un offset TL_0 , de forma tal que $G_{bn,cs}$ aumenta y tenemos una condición más relajada sobre el límite superior de DNI. TL_0 es un parámetro ajustable.

- F_8, F_9 : $|G_h/G_c - 1| < \delta$. La concordancia entre la medida de GHI y la GHI calculada por clausura (Ec. (2.6))

$$G_c = G_{bn} \cos \theta_z + G_{dh},$$

debe estar dentro de un entorno de δ . Este valor, de acuerdo a la recomendación BSRN, es 0.08 para $\theta_z < 75^\circ$ y 0.15 para $\theta_z > 75^\circ$.

- F_{10}, F_{11} : $f_d < f_{d,max}$. Teóricamente f_d no puede superar el valor 1. Sin embargo, eventos de sobreirradiancia, efectos lente y reflexiones múltiples en condiciones de alta nubosidad pueden hacer que a nivel minutil se supere este valor. BSRN recomienda una tolerancia $f_{d,max}$ de 1.05 si $\theta_z \leq 75^\circ$, y 1.10 si $\theta_z > 75^\circ$.
- F_{12} : $|G_b \cos \theta_z - (G_h - G_{dh})| < 50 \text{ W/m}^2$. Discrepancia en términos absolutos entre la proyección de la DNI sobre el plano horizontal (G_{bh}), y la diferencia entre GHI y DHI.
- F_{13} : $G_{dh} < 850 \text{ W/m}^2$.
- F_{14} : $k_t > 0.05$ o $f_d > 0.9$. Región prohibida en el diagrama f_d contra k_t (ver Figura 3.6a), asociada a valores muy bajos de radiación con diferencias relativas entre GHI y DHI grandes. Los parámetros de tolerancia se regulan tal que el descarte sea lo menos invasivo posible.
- F_{15} : $k_t < 0.60$ o $f_d < 0.98$. Región en el mismo diagrama, asociada a posibles desalineaciones del seguidor explicadas anteriormente. Se cumplen las mismas recomendaciones enunciadas para el filtro F_{14} . Este filtro

remueve parcialmente las desalineaciones, ya que no entra en la nube de puntos del diagrama $f_d - k_t$.

- F_{16} : $G_c/G_{h,cs} < 0.80$ o $G_{dh}/G_c < 0.80$. Se trata de un filtro cuyo propósito es la detección de desalineaciones en la región que ataca el F_{15} , pero con base física. Aquí $G_{h,cs}$ es la GHI de cielo claro, calculada de forma análoga a la $G_{bn,cs}$ del filtro F_7 .
- F_{17} : $k'_t < k'_{t,max}$. Aquí k'_t es un índice de claridad modificado, propuesto por (R. Perez et al. 1990) según

$$k'_t = k_t / (1.031 \times \exp(-1.4 / (0.9 + 9.4/m)) + 0.1),$$

donde k_t es el índice de claridad usual, y m la [masa de aire](#). Tiene menor dependencia con el ángulo cenital y la masa de aire. Se eligió un valor para $k'_{t,max} = 1.2$ lo suficientemente laxo para permitir episodios de sobreirradiancia (efecto lente) típicos a nivel minutal.

- F_{18} : $(G_h - G_{dh}) / \cos \theta_z < G_{bn,cs}$. La DNI calculada por clausura a partir de los datos de GHI y DHI no debe superar el valor de cielo claro mencionado anteriormente.
- F_{19} : $|G_{h_1} - G_{h_2}| < \delta |G_{h_1}|$. Solo aplica para las estaciones de campo, que miden irradiancia global y difusa con SPN1. Establece un umbral de tolerancia a la diferencia relativa entre la medida de GHI del SPN1 (G_{h_2}) y la medida principal de GHI (G_{h_1} , medida con piranómetros de la serie CMP). Se propone un valor para δ de 0.20.
- F_e : Filtro de detección de datos espurios que hayan podido pasar el conjunto de filtros, basado en la inspección visual y el descarte manual de los mismos. En particular se observaron dos instancias de eclipses solares, que no logran ser detectadas por el conjunto de filtros.

En la Tabla [3.4](#) se detallan los filtros que aplican a cada componente. Esto es importante dado que se generarán integrados a escala 10-minutal y horaria de cada variable por separado, para quienes solo se aplica el conjunto de filtros que se detallan en dicha tabla.

Filtro	Condición de descarte	LE	AR	TA	TT/PP
F_0	$\theta_z > \theta_{z,u}$	$\theta_{z,u} = 80^\circ$	$\theta_{z,u} = 80^\circ$	$\theta_{z,u} = 80^\circ$	$\theta_{z,u} = 80^\circ$
F_1	$G_h < G_{h,min}$	$G_{h,min} = 0W/m^2$	$G_{h,min} = 0W/m^2$	$G_{h,min} = 0W/m^2$	$G_{h,min} = 0W/m^2$
F_2	$G_{dh} < G_{dh,min}$	$G_{dh,min} = 0W/m^2$	$G_{dh,min} = 0W/m^2$	$G_{dh,min} = 0W/m^2$	$G_{dh,min} = 0W/m^2$
F_3	$G_{bn} < G_{bn,min}$	$G_{bn,min} = 0W/m^2$	NA	NA	NA
F_4	$G_h > G_o a_1 (\cos \theta_z)^{b_1} + c_1$	$a_1 = 1.15, b_1 = 1.2, c_1 = 30$	$a_1 = 1.15, b_1 = 1.2, c_1 = 30$	$a_1 = 1.15, b_1 = 1.2, c_1 = 30$	$a_1 = 1.15, b_1 = 1.2, c_1 = 30$
F_5	$G_{dh} > G_o a_2 (\cos \theta_z)^{b_2} + c_2$	$a_2 = 0.75, b_2 = 1.2, c_2 = 30$	$a_2 = 0.75, b_2 = 1.2, c_2 = 30$	$a_2 = 0.75, b_2 = 1.2, c_2 = 30$	$a_2 = 0.75, b_2 = 1.2, c_2 = 30$
F_6	$G_{bn} > G_o$	A	NA	NA	NA
F_7	$G_{bn} > G_{bn,cs}$ (Modelo ESRA, $T_L = T_{L_{cic}} - T_{L_0}$)	$T_{L_0} = 1.5$	NA	NA	NA
F_8	$ G_h/G_c - 1 > \delta$, si $\theta_z \leq 75^\circ$	$\delta = 0.08$	NA	NA	NA
F_9	$ G_h/G_c - 1 > \delta$, si $\theta_z > 75^\circ$	$\delta = 0.15$	NA	NA	NA
F_{10}	$f_d > 1.05$, si $\theta_z \leq 75^\circ$	A	A	A	A
F_{11}	$f_d > 1.10$, si $\theta_z > 75^\circ$	A	A	A	A
F_{12}	$ G_{bn} \cos \theta_z - (G_h - G_{dh}) > 50W/m^2$	A	NA	NA	NA
F_{13}	$G_{dh} > G_{dh,max}$	$G_{dh,max} = 850W/m^2$	$G_{dh,max} = 850W/m^2$	$G_{dh,max} = 850W/m^2$	$G_{dh,max} = 850W/m^2$
F_{14}	$k_t < k_t^*$ y $f_d < f_d^*$	$k_t^* = 0.05; f_d^* = 0.9$	$k_t^* = 0.05; f_d^* = 0.9$	$k_t^* = 0.05; f_d^* = 0.9$	$k_t^* = 0.05; f_d^* = 0.9$
F_{15}	$k_t > k_t^*$ y $f_d > f_d^*$	$k_t^* = 0.60; f_d^* = 0.98$	$k_t^* = 0.60; f_d^* = 0.98$	$k_t^* = 0.60; f_d^* = 0.98$	$k_t^* = 0.60; f_d^* = 0.98$
F_{16}	$G_c/G_{h,cs} > 0.80$ y $G_{dh}/G_c > 0.80$	A	NA	NA	NA
F_{17}	$k'_t > k'_{t,max}$	$k'_{t,max} = 1.2$	$k'_{t,max} = 1.2$	$k'_{t,max} = 1.2$	$k'_{t,max} = 1.2$
F_{18}	$(G_h - G_{dh})/\cos \theta_z > G_{bn,cs}$	A	A	A	A
F_{19}	$ G_{h,1} - G_{h,2} > \delta G_{h,1}$	NA	$\delta = 0.2$	$\delta = 0.2$	$\delta = 0.2$
F_e	Inspección visual - datos espurios	A	A	A	A

Tabla 3.3: Detalle de los parámetros por estación empleados para cada filtro, junto con su condición de descarte resumida. NA = no aplica. A = aplica pero no hay parámetros que detallar.

La implementación del proceso de filtrado implica generar un archivo espejo al de los datos (es decir, con la misma etiqueta temporal) y una columna por cada filtro. El valor de cada entrada será entonces 1/True si la condición de aceptación del filtro se cumple, y 0/False si no.

Componente	Filtros que aplican
G_h	0, 1, 4, 10, 11, 14, 15, 17, 18, 19, e
G_{dh}	0, 2, 5, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 18, e
G_{bn}	0, 3, 6, 7, 8, 9, 12, 16, e

Tabla 3.4: Relación entre las componentes de la irradiancia y el filtro que aplica en cada una de ellas. “e” representa el filtro extra que surge de la inspección visual, y se asume que afecta la medida de las tres componentes.

Resultados del filtrado

Un reporte detallado del filtrado por estación se presenta en la Tabla 3.5. Allí se muestra el número de datos válidos (diurnos y no NaN) minutales

#válidos	LE		GO		AR		TA		TT		PP	
	desc	%desc	desc	%desc	desc	%desc	desc	%desc	desc	%desc	desc	%desc
	1434694		528737		476701		711171		463592		552956	
F0	197960	13.8	82810	15.7	56648	11.9	97083	13.7	67640	14.6	78037	14.1
F1	22027	1.5	224	0.0	19201	4.0	1393	0.2	1014	0.2	10387	1.9
F2	27763	1.9	148	0.0	21206	4.4	0.0	0.0	1217	0.3	12569	2.3
F3	370056	25.8	9526	1.8	-	-	-	-	-	-	-	-
F4	291	0.0	974	0.2	259	0.1	920	0.1	891	0.2	1066	0.2
F5	3391	0.2	237	0.0	7	0.0	63	0.0	79	0.0	41	0.0
F6	0	0.0	0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
F7	0	0.0	3453	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-
F8	132704	9.2	3546	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-
F9	96353	6.7	5322	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
F10	12222	0.9	1949	0.4	7223	1.5	696	0.1	318	0.1	3139	0.6
F11	24746	1.7	6392	1.2	12437	2.6	898	0.1	978	0.2	9408	1.7
F12	62282	4.3	2028	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
F13	1819	0.1	2	0.0	1	0.0	10	0.0	0	0.0	11	0.0
F14	32079	2.2	358	0.1	11044	2.3	2296	0.3	3636	0.8	8715	1.6
F15	4645	0.3	3010	0.6	1174	0.2	1402	0.2	396	0.1	679	0.1
F16	5310	0.4	3317	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
F17	6459	0.5	7783	1.5	3306	0.7	10574	1.5	8901	1.9	6910	1.2
F18	3957	0.3	4918	0.9	6437	1.4	1338	0.2	1738	0.4	4933	0.9
F19	-	-	-	-	9834	2.1	6663	0.9	4896	1.1	11233	2.0
Fe	1518	0.1	0	0.0	497	0.1	175	0.0	0	0.0	175	0.0
total PH	539068	37.6	97786	18.5	77529	16.3	104266	14.7	72704	15.7	94512	17.1

Tabla 3.5: Descarte de filtros por estación, a nivel de plano horizontal (filtros que involucran GHI, DHI y DNI). Todos los porcentajes se dan respecto al total de datos diurnos válidos.

procesados en cada estación, así como la cantidad de datos descartados por cada uno de los filtros y sus porcentajes (respecto al número de datos válidos). Los filtros que involucran DNI no son aplicados en las estaciones AR, TA y TT/PP por no contar con dicha medida. En la última fila se presenta el descarte total del conjunto de filtros y su respectivo porcentaje.

De este reporte se pueden extraer algunas conclusiones. En LE hay un importante descarte de DNI negativas correspondiente al filtro F3 con un 25.8% de datos descartados, correspondientes en su mayoría a un período que abarca de Setiembre del 2018 a Junio del 2020. El otro filtro que descarta una cantidad importante de datos (9.2% de los datos válidos) es el F8, que compara la medida de GHI con la GHI calculada por clausura a partir de DHI y DNI. Su impacto sobre el diagrama $f_d - k_t$ en LE se muestra en la Figura 3.12, revelando que descarta datos con k_t baja y f_d alejada de 1, siendo este un resultado deseable. Sin embargo, esto también revela que la medida de LE es menos confiable que la de GO, donde este filtro descarta apenas un 0.7% de datos.

Respecto a las estaciones de campo (AR, TA y TT/PP) es importante observar que AR es la que presenta, en general, el mayor porcentaje de descarte de datos por filtro respecto a las otras dos. En especial presenta altos porcen-

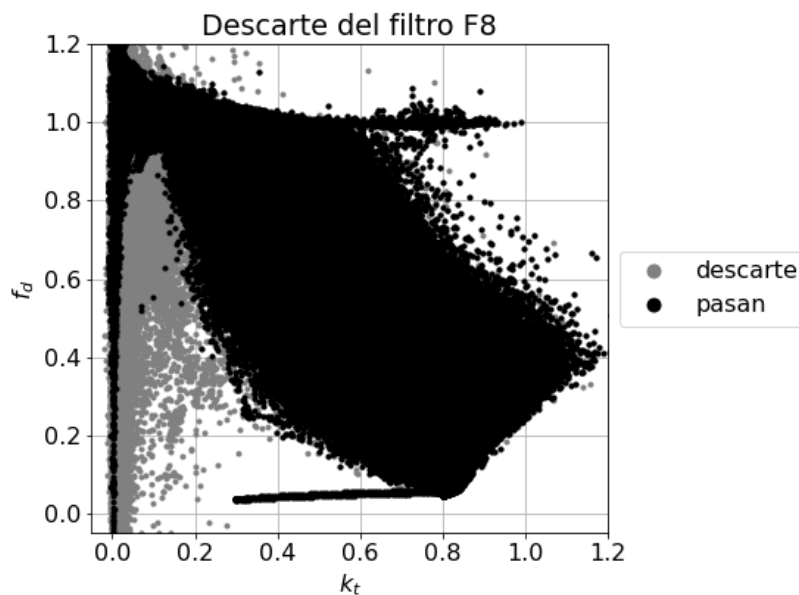


Figura 3.12: Efecto del descarte del filtro F8 (relación de clausura) sobre el diagrama f_d vs k_t para la estación LE.

tajes de GHI y DHI negativas medidas con el SPN1, descartándose un 4% de ambas componentes de acuerdo a los filtros F1 y F2. Por otra parte es notable el menor nivel de descarte por filtro en las estaciones TA y TT, comparado a AR y PP. La única excepción en el caso de AR es el filtro F17, que tiene un bajo nivel de descarte en dicha estación, pero es un filtro que actúa solamente a GHI, dando soporte a la sospecha de que la problemática principal en la medida del SPN1 recae en el dato de DHI.

En la Figura 3.13 se muestra la serie temporal como mapa de colores en dos dimensiones equivalente al de la Figura 3.9 para AR, pero con los datos que no pasaron el conjunto de filtros de GHI y DHI (ver Tabla 3.4) convertidos a NaN en color blanco. Esta gráfica revela que el sombreado detectado en las mañanas del período Noviembre 2017 - Marzo 2018 es efectivamente descartado por el conjunto de los filtros, como se deseaba.

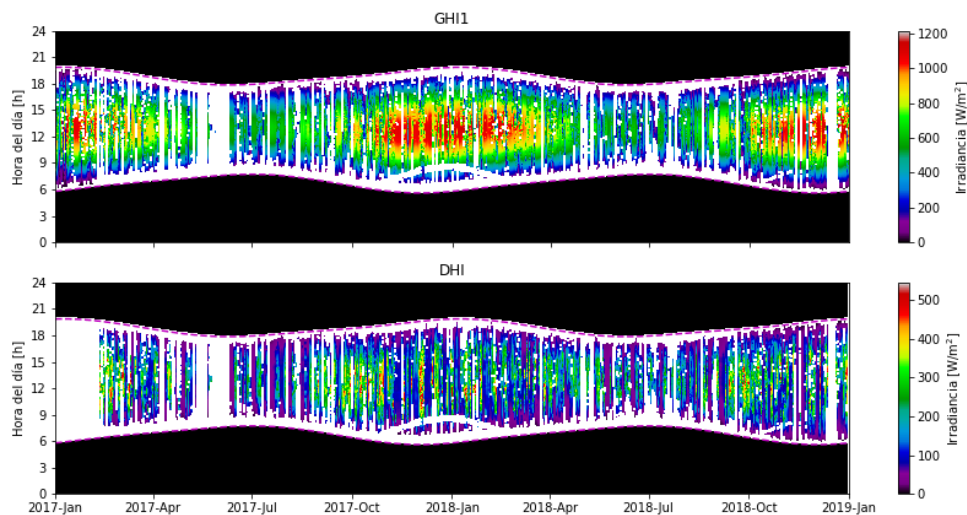


Figura 3.13: Serie temporal de GHI y DHI filtradas para AR, en forma de mapa de colores. Los datos que no pasan el conjunto de filtros asociados a su variable se muestran en color blanco.

Integración 10-minutal y horaria

El procesamiento basal de datos termina con la generación de integrados a intervalos de diez minutos y una hora, a partir de los datos minutales y el conjunto de filtros por componente de la irradiancia. Para determinar el integrado a ambas escalas se toma un intervalo cerrado a izquierda de datos minutales y se promedia, solo si la totalidad de los datos del intervalo pasaron el

Estación	GHI1		GHI2		DHI		DNI		datos diurnos	
	10-min	Horario	10-min	Horario	10-min	Horario	10-min	Horario	10-min	Horario
LE	112997	18237	–	–	106401	17171	87646	14028	161601	26901
GO	43631	7020	–	–	43678	7021	43121	6947	52857	8821
TA	67662	9197	67662	9197	59643	8849	–	–	83664	13926
AR	30019	4034	30019	4034	30754	4256	–	–	41122	6823
TT	46878	6628	42359	5953	38373	5687	–	–	70893	11886
PP	43593	6127	43593	6127	44910	6634	–	–	55806	9343

Tabla 3.6: Cantidad de datos integrados por estación y tipo de medida, a nivel diezminutal y horario.

conjunto de filtros de su variable; de lo contrario el dato diez-minutal u horario será NaN¹. Por ejemplo, el dato diezminutal de DHI correspondiente a la hora 10:20:00 es el promedio de los diez datos minutales de DHI comprendidos entre las 10:20:00 y 10:29:00, si la totalidad de ellos pasaron todos los filtros para su variable, detallados en la Tabla 3.4. En la Tabla 3.6 se reportan los números de integrados por variable.

Los cálculos solares a estas escalas se realizaron para la etiqueta temporal del punto medio del intervalo a integrar, en especial el del coseno del ángulo cenital θ_z , debido a que a primer orden el promedio de $\cos \theta_z$ para un intervalo es igual a su valor en el punto medio del mismo (Abal et al. 2020).

En la Figura 3.14 se muestran los diagramas $f_d - k_t$ a escala 10-minutal para los seis conjuntos de datos relevados (al separar TT y PP), coloreados por densidad de puntos. Se observa en general que el conjunto de filtros remueve exitosamente los puntos en las zonas prohibidas del diagrama. Sin embargo, podemos ver que la forma de la nube se encuentra más dentro de lo esperado para un conjunto de buenas medidas en el caso de LE, GO y TA, mientras que en las estaciones AR, TT y PP se observan aún algunas anomalías. En particular, en la Figura 3.14d (AR) se nota que el borde de la nube en la región de f_d baja tiene una pendiente más horizontal que en el resto de las estaciones. Esto es un indicio de problemas en la medida de DHI en condiciones de cielo claro (índice de claridad k_t alto), que pareciera estar siendo subestimada. En el caso de TT y PP ese problema es menos notorio, pero es muy clara la deformación de la nube en la región de $f_d \sim 1$ asociada a cielo cubierto, que debería tener una forma más horizontal.

El paso siguiente es determinar el azimut real de las superficies inclinadas,

¹Esto asegura que los promedios se conforman con medidas que pasaron todos los filtros, asegurando la consistencia entre las variables promediadas. Este enfoque es posible al contar con una cantidad importante de datos.

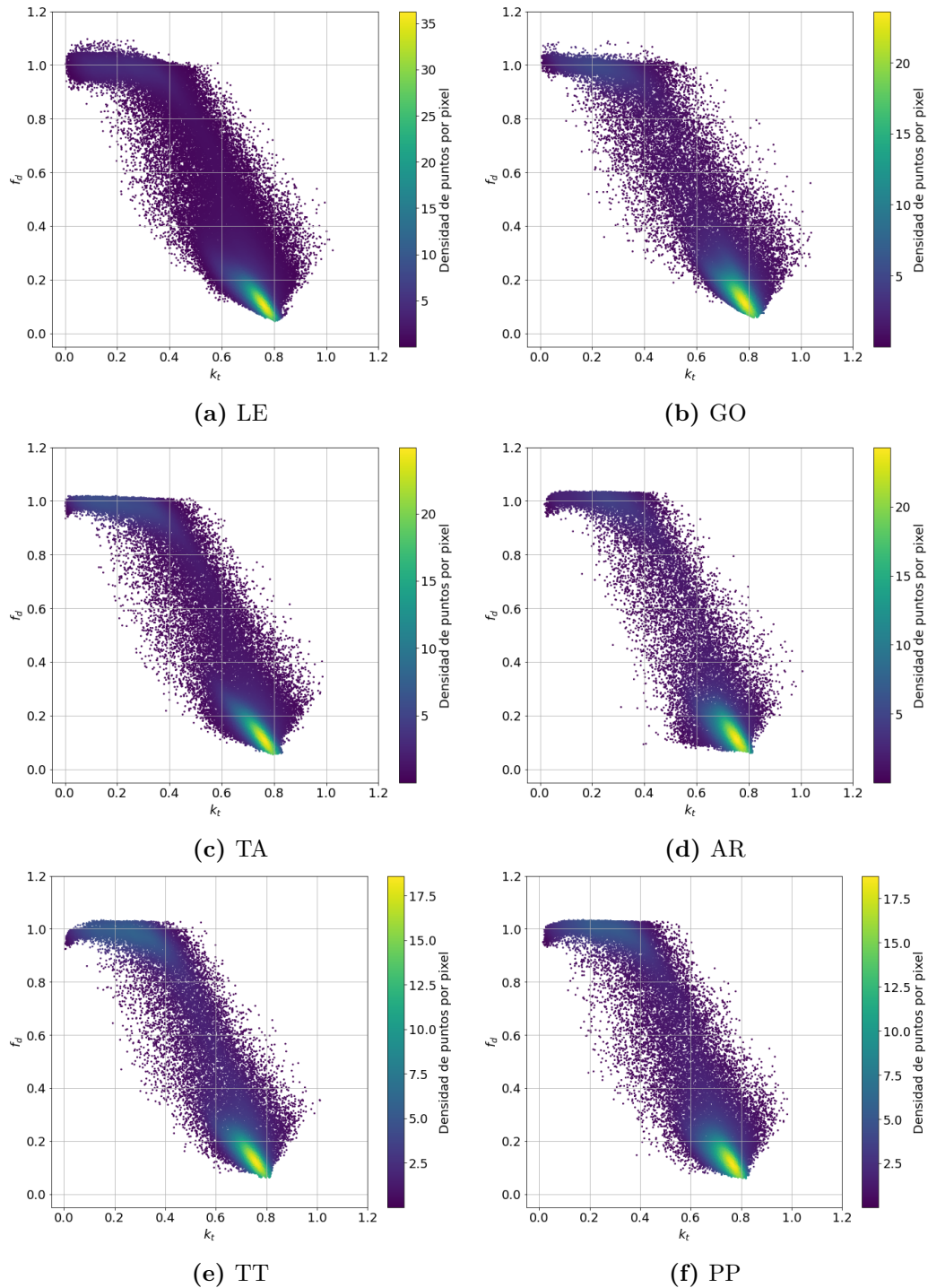


Figura 3.14: Diagrama $f_d - k_t$ a escala diezminutal, coloreado por densidad de puntos por píxel.

para poder así filtrar los datos de GTI y finalmente evaluar los modelos de transposición. El procedimiento de detección de azimut de superficies inclinadas se explicará en el próximo capítulo.

3.3. Discusión

En esta sección se pretende distinguir las estaciones en función de la calidad de sus datos de acuerdo a lo visto en la inspección minutal de datos, su filtrado e integración 10-minutal y horaria, y el análisis de las incertidumbres instrumentales. Se distinguen entonces tres categorías de estaciones, en función de si presentan o no anomalías en sus series temporales (grandes faltantes, offsets negativos u outliers), la forma de las nubes de datos en el diagrama $f_d - k_t$, los porcentajes de descarte por filtro de la Tabla 3.5, la desalineación azimutal del plano inclinado (visto en forma preliminar en la Figura 3.11) y la incertidumbre instrumental típica asignada en la Tabla 3.2.

- Estaciones de tipo I: categoría asignada a GO y TA. No presentan anomalías en sus series temporales, ni en la forma del diagrama $f_d - k_t$ minutal previo al filtrado, por lo que el filtrado descarta pocos datos en comparación con las otras estaciones. En el caso de GO no hay desvío azimutal pero sí lo hay en TA.
- Estaciones de tipo II: categoría asignada a LE. Es una estación de instrumental de baja incertidumbre y alto nivel de mantenimiento, pero muestra series temporales con faltantes y una gran cantidad de DNI negativas. El descarte del filtro de clausura, F8, es mucho mayor que el de GO (estación similar en términos de mantenimiento e instrumental). La forma del diagrama $f_d - k_t$ previo al filtrado presenta muchas anomalías, aunque estas se resuelven con el filtrado obteniéndose una nube cuya forma es aceptable. Esta estación no presenta desvío azimutal notable.
- Estaciones de tipo III: categoría asignada a AR, TT y PP. Se trata de estaciones problemáticas, con diagramas $f_d - k_t$ que incluso luego del filtrado no muestran una forma aceptable, por lo que se sospecha de la calidad de sus medidas, en especial la de DHI del SPN1. En el caso de TT y PP el desvío azimutal es notable, y como se verá en la siguiente sección dedicada a la detección de azimut, hay entradas en los libros de visita de estación que acreditan la problemática de las mismas.

Capítulo 4

Estimación del azimut de las superficies

En general, las superficies para captación de energía solar se orientan hacia el ecuador (es decir, al Norte en el hemisferio sur), dado que esta es la orientación que maximiza la cantidad de radiación recibida por una superficie inclinada en un año (Duffie y Beckman, 2013).

La orientación espacial de una superficie se determina por medio de dos ángulos: β , el ángulo entre la superficie y el plano horizontal y γ , el azimut, definido como el ángulo entre la proyección de la normal a la superficie sobre el plano horizontal y la dirección Sur-Norte.

La determinación de la dirección Norte, que permite la alineación correcta de las superficies captadoras, es una tarea difícil en especial en estaciones ubicadas en lugares apartados sin referencias a la vista. Algunos métodos utilizados son: navegadores GPS, el empleo de brújulas magnéticas o la sombra de una varilla en un día claro al mediodía solar. El primero puede tener errores considerables en la estimación del Norte, mientras que el empleo de brújulas magnéticas puede dar resultados que difieren en varios grados respecto al Norte geográfico, dado que las mismas indican el norte magnético y son afectadas por elementos metálicos cercanos. La proyección de la sombra de una varilla vertical en un día claro al mediodía solar (preferentemente en invierno para que la sombra sea de mayor longitud), si se realiza de forma correcta, es el más preciso de estos métodos.

En el caso de las estaciones AR, TA y TT/PP, los instrumentos de medida (y en particular el LI200R que mide GTI) se encuentran montados sobre

soportes fijados con lingas al pasto circundante y expuestos a las condiciones meteorológicas, además de recibir visitas esporádicas e incluso cambios de emplazamiento. pudiendo afectarse la alineación del sensor de GTI con respecto al Norte, desviándolo del azimut nominal. Esto se constató durante la inspección visual de datos minutales, en particular en la Figura 3.11: la medida de GTI en condiciones de cielo claro no alcanza su máximo en el mediodía solar ($\omega = 0$), como sucedería si la superficie estuviera orientada hacia el Norte. Se observó en estas gráficas que las estaciones AR, TA y TT presentan un desvío azimutal hacia el Oeste (el máximo de GTI se da luego del mediodía solar), mientras que en LE no se aprecia un desfase a simple vista, por lo que es de esperar que su azimut real sea muy cercano a cero.

Dado que para evaluar los modelos de transposición es necesario conocer el azimut real de las medidas de GTI, es deseable poder estimar este ángulo a partir de la serie de medidas. Este problema no está bien resuelto en la literatura, por lo que desarrollamos, implementamos y validamos dos métodos complementarios, que denominaremos A y B, y que se describen en este capítulo. Cabe destacar que el primer método a describir (Método A) es novedoso en su totalidad.

En la Sección 4.1 se describe el método A, y en la Sección 4.2 el método B. En la Sección 4.3 se muestra la validación de estos métodos con datos de La Reunión y Salto (LE) de azimut nominal conocido, y se comparan ambos métodos. Por último en la Sección 4.4 se aplica el método A para estimar el azimut real de las estaciones de campo usadas en este trabajo. En esta última sección se presenta el resultado del filtrado de los datos minutales de GTI, que requieren de la estimación del azimut real de las superficies.

4.1. Descripción del método A

Este método se basa en determinar el azimut real de la superficie a partir del ángulo horario ω^* en el que ocurre el máximo de GTI, bajo condiciones de cielo despejado. Si este ángulo es cero, la superficie se encuentra perfectamente orientada hacia el ecuador y por lo tanto $\gamma = 0$; si $\omega^* > 0$ entonces $\gamma > 0$ y la superficie está desviada hacia el Noroeste, mientras que si $\omega^* < 0$, entonces $\gamma < 0$ y está desviada hacia el Noreste.

La metodología propuesta puede resumirse en la aplicación de los siguientes pasos:

- (I) Se seleccionan días con condiciones de cielo claro alrededor del máximo de GTI. Este proceso es automático en caso de contar con medida simultánea de GHI, o por medio de inspección visual de la serie de GTI en caso de no contar con dicha medida.
- (II) Se estima ω_i^* a partir de la serie minutal de GTI para cada día claro seleccionado. Esta estimación se realiza a través de un ajuste por medio de funciones locales que aproximan a la curva de GTI y tienen inmunidad a la fluctuación propia de la medida.
- (III) Para cada día claro seleccionado en (I), se genera una función auxiliar $\gamma = f_i(\omega^*)$ que relaciona el azimut de la superficie con el ángulo horario ω^* . El azimut para ese día, γ_i , se obtiene al sustituir el ω_i^* estimado en el paso anterior en la función f_i .
- (IV) Se analiza el comportamiento de la serie de γ_i a lo largo del tiempo, se infieren posibles cambios en el azimut real de la estación¹ y se determina el estimativo final del mismo, así como la incertidumbre asociada al método.

A continuación se presentan los detalles de los pasos aplicados.

(I) Selección de días claros

Partiendo de la serie de datos minutales de GTI, se seleccionan días con condiciones de cielo claro en un entorno de su máximo, quien está cualitativamente bien definido como se vio en la Figura 3.11 durante la inspección visual de datos.

Si contamos con la medida simultánea de GHI, esta selección puede realizarse de forma automática por medio de un algoritmo de detección de minutos claros. En este caso se implementó el algoritmo de [Reno y Hansen, 2016](#)² que compara el dato de GHI con un estimativo de cielo claro a escala minutal. Utilizamos en este caso el modelo de cielo claro ESRA³ ([Rigollier et al. 2000](#)) con valores de [turbidez de Linke](#), T_L , calculados para Uruguay por [Laguarda y Abal, 2016](#). Usando una ventana móvil de tiempo de diez minutos y la

¹Por reubicaciones u otros eventos registrados en los metadatos.

²Este algoritmo es parte de la biblioteca `pvl` de Python (<https://pvl-pyhton.readthedocs.io/en/stable/index.html>), y fue usado en nuestro trabajo.

³Ver la Apéndice A.3 del Apéndice A para más detalles de este modelo

aplicación de una serie de tests, el algoritmo determina si una medida de GHI minutal corresponde a cielo claro o no. En la Figura 4.1 se muestra una selección de minutos claros a lo largo de un período de 18 días en 2018 para la estación LE. Se observa que el método es eficaz a la hora de detectar instantes de cielo claro, dejando afuera medidas que son notoriamente de cielo cubierto o sobreirradiancias.

Finalmente, un día se selecciona si más del 90 % de los datos minutales, en un intervalo de dos horas alrededor del máximo de GTI, es detectado como de cielo claro por el algoritmo.

De no contar con medida de GHI simultánea a GTI, es necesario observar la serie temporal día por día y seleccionar de manera discrecional aquellos con un intervalo claro alrededor del máximo de GTI.

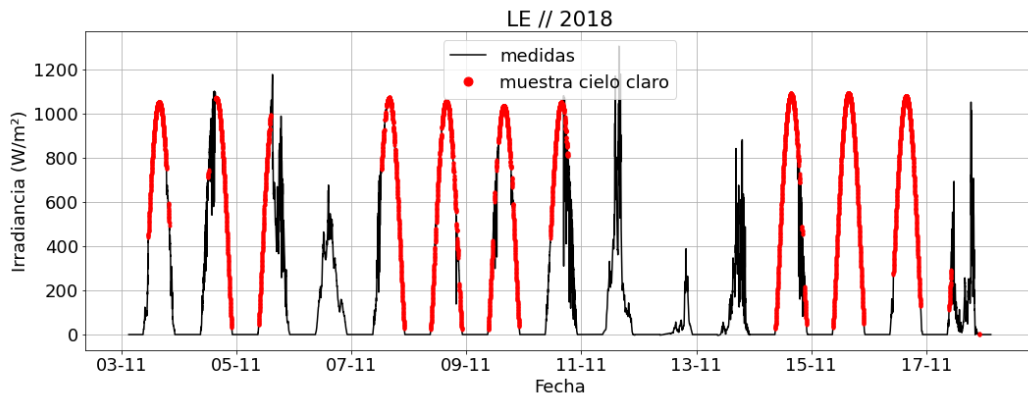


Figura 4.1: Selección de minutos de cielo claro a partir de medidas de GHI.

(II) Estimación de ω^*

La serie de datos minutales alrededor del máximo de GTI puede presentar pequeñas fluctuaciones (presumiblemente de origen atmosférico pero también inherentes a la incertidumbre en la medida) que afectan el ajuste y la precisión del método. Para atacar este problema, para cada día claro seleccionado se ajusta una función cuadrática a los datos minutales de GTI en un entorno de dos horas alrededor de su máximo. Se procede de forma iterativa como sigue:

- Se utiliza el ángulo horario que maximiza el dato minutal de GTI como primera aproximación de ω^* y se establece un intervalo de dos horas alrededor de este ángulo (es decir, 15° antes y después del mismo).

- Se ajustan estos datos por medio de una función cuadrática y se identifican como outliers todos aquellos puntos que distan más de 2σ de la curva de ajuste, donde σ es la desviación estándar de los residuos (diferencia entre la estimación y el dato). Estos outliers se descartan, y el nuevo conjunto de datos se vuelve a ajustar, recalculándose el nuevo estimativo de ω^* y σ .
- Este procedimiento iterativo se repite hasta que no se detectan mas outliers. Típicamente esto sucede en no más de ocho iteraciones descartándose un porcentaje no mayor al 15% de los datos minutales que componen el intervalo alrededor del máximo de GTI.

Terminado este procedimiento, el ángulo horario que maximiza la curva de ajuste de GTI es el estimativo final ω_i^* para el día i . Un ejemplo de este descarte iterativo y ajuste se muestra en la Figura 4.2, para un día claro de la estación TA. El panel izquierdo es la primera iteración del ajuste, con los datos identificados como outliers en rojo, y luego de 6 iteraciones se llega al ajuste final en el panel derecho. En el proceso se descartaron en total 18 outliers y el ángulo ω^* varió de 7.7° a 7.5° .

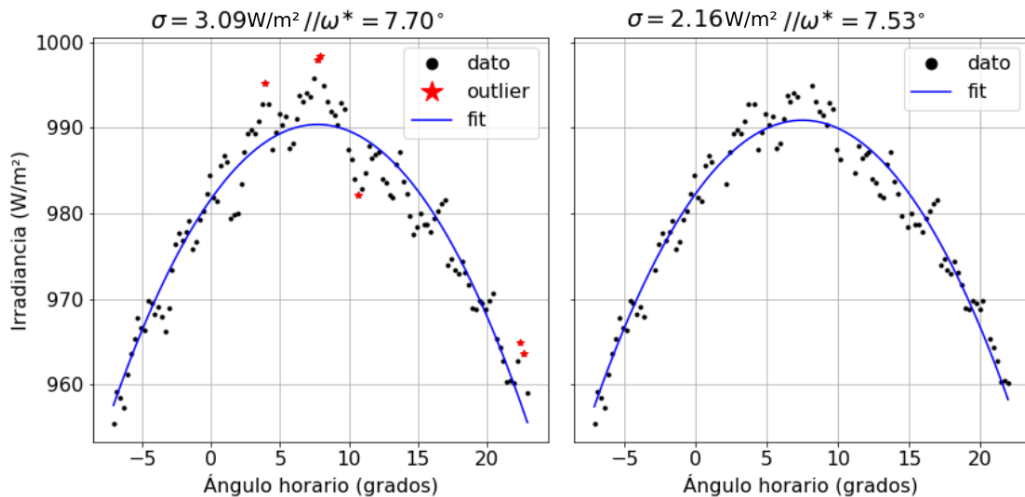


Figura 4.2: Ejemplo de ajuste de datos minutales de GTI para la estación TA. A la izquierda, el primer ajuste realizado, con los puntos que distan más de 2σ de la curva resaltados. A la derecha, la curva final de ajuste.

(III) Estimación de la serie de azimuts γ_i

La relación (en ausencia de nubes) entre ω^* y γ es compleja, ya que no es geométrica debido al hecho de que GTI no se maximiza en el instante en que el ángulo de incidencia es mínimo. Esta afirmación se sustenta en el análisis de las componentes de GTI en un día claro, presentado en la Figura A.4 del Apéndice A.

A efectos de relacionar ω_i^* y γ_i para el i -ésimo día claro, se construye una función $\gamma = f_i(\omega^*)$ para cada día i . Para esto se calculan, para cada día seleccionado, los estimativos de GHI, DHI y DNI de cielo claro según el modelo ESRA (Rigollier et al. 2000), y luego se aplica el modelo de transposición de Perez (R. Perez et al. 1990), Ec. (2.22) de la Sección 2.2.5, para un rango de valores de azimut en torno al azimut nominal, generándose así una serie de estimativos de GTI de cielo claro. En todo momento se supone que el suelo es el único reflector difuso, supuesto isotrópico y perfecto, de reflectancia constante e igual a 0.20. Como se mencionó antes, los valores de turbidez de Linke T_L usados para estimar las componentes de cielo claro se extrajeron de los ciclos calculados por Laguarda y Abal, 2016 para diversos puntos del territorio uruguayo, en tanto que para otras ubicaciones geográficas se usaron los estimativos de la biblioteca pvlib de Python ya mencionados anteriormente.

La elección del modelo ESRA para estimar la irradiancia en cielo claro a nivel de plano horizontal responde a simplicidad de implementación y al hecho de que solamente utiliza un parámetro atmosférico, T_L , cuyo valor medio para un día dado está bien determinado en las estaciones de interés. Por otra parte, la elección del modelo de transposición de Perez por sobre otros más simples como el isotrópico se justifica por ser el que presenta menor variabilidad en la hora solar del máximo de GTI para distintos T_L (Piccioli et al. 2021), además de ser un modelo que representa mejor la anisotropía del cielo claro.

Finalmente, el ángulo horario que maximiza la GTI de cielo claro para cada valor de azimut γ será entonces el ω^* asociado a γ . Esto permite determinar una función para cada día seleccionado $\omega^* = F_i(\gamma)$, que como puede verse en la Figura 4.3 es invertible en el rango de azimuts de interés, con $f_i \equiv F_i^{-1}$. Para determinar la función inversa, se utiliza un ajuste de la forma $\gamma = f_i(\omega^*) = a_i \tan(b_i \omega^*)$, donde el ángulo ω^* está en radianes y los parámetros a_i y b_i dependen del día del año.

Este ajuste se evaluó para cada día seleccionado, calculándose un indicador

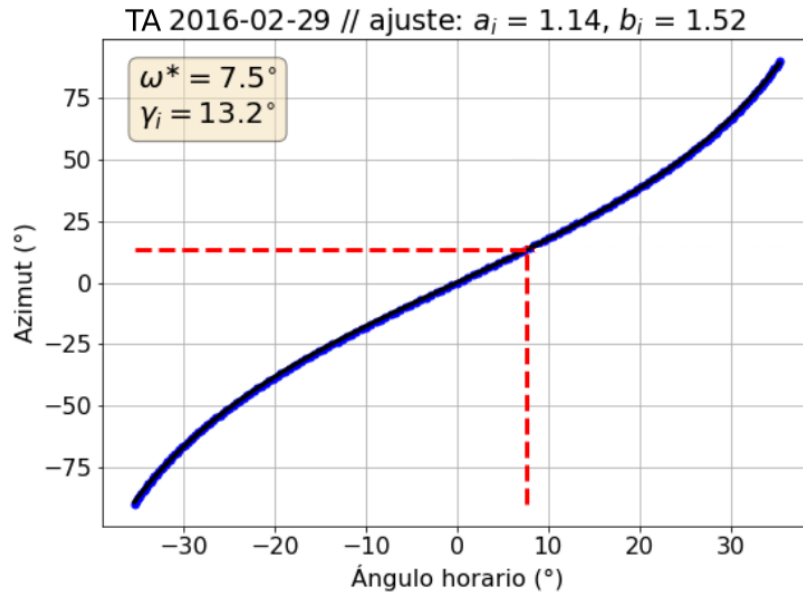


Figura 4.3: Función $\gamma_i = f(\omega_i^*)$ para un día claro seleccionado de la estación TA. Superpuesto se muestra el ajuste y el resultado de sustituir el valor de ω^* estimado para ese día, dando como resultado la estimación del azimut de la superficie para ese día.

de la bondad del ajuste, el parámetro R^2 definido como

$$R^2 = 1 - (SS_{res}/SS_{tot}) \quad (4.1)$$

donde SS_{res} es la suma de los cuadrados de los residuos (diferencias entre el valor del ajuste y el calculado) y SS_{tot} es la suma de los cuadrados total. Se obtuvieron valores de R^2 ubicados entre 0.9995 y 0.9997, por lo que el ajuste es bueno.

La sustitución del ω_i^* determinado a partir del dato minutil de GTI para condiciones de cielo claro da como resultado el estimativo del azimut de la superficie para el día seleccionado, γ_i , como puede verse en la Figura 4.3. Esta gráfica corresponde al mismo día claro cuyo ángulo horario ω_i^* fue determinado en el ajuste de la Figura 4.2.

Se observa que la función ajustada presenta una pendiente que aumenta (en términos absolutos) al aumentar el ω^* , haciéndose vertical cuando γ se aproxima a 90° . Esto implica que el error en la estimación se incrementa cuanto mayor es el azimut absoluto de la superficie, limitando así la aplicación del método a azimuts no muy grandes.

(IV) Determinación del azimut real

De la aplicación de los pasos anteriores para cada día seleccionado resulta un conjunto de azimuts γ_i , variables a lo largo del tiempo, y el promedio de los n azimuts de cada serie

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad (4.2)$$

será nuestra estimación preliminar del azimut real de la superficie, mientras que la desviación estándar

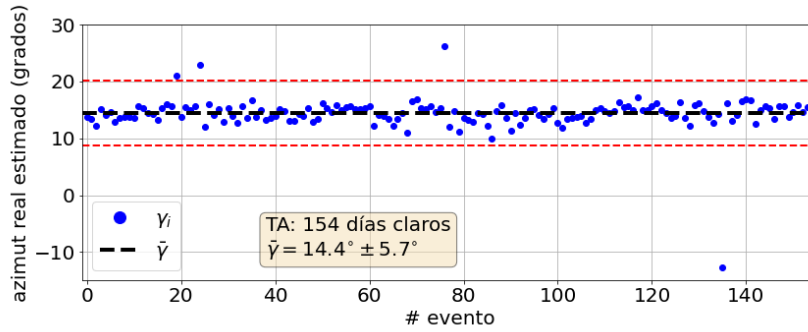
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \bar{\gamma})^2} \quad (4.3)$$

nos da una noción de la incertidumbre asociada al método. Con el objetivo de refinar la estimación y disminuir la incertidumbre, descartamos las estimaciones de γ_i que se encuentren a más de 2σ del promedio, recalculándose promedio y σ , hasta que todos los valores de azimut se encuentren dentro de dicho intervalo.

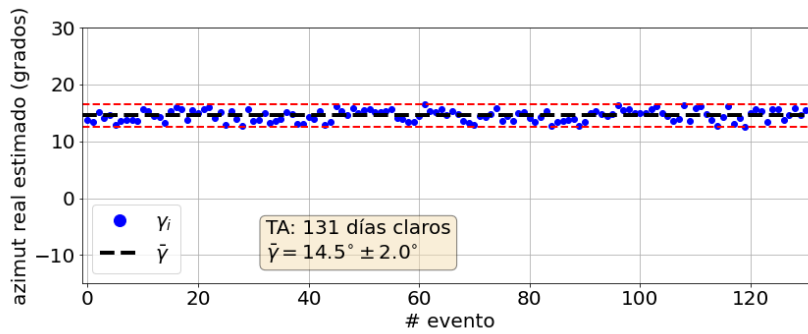
En la Figura 4.4a se grafican los distintos azimuts γ_i en función del día claro seleccionado para la estación TA, previo al descarte de outliers. En la Figura 4.4b se muestra el resultado de descartar los outliers en función del número de evento (día claro seleccionado). El resultado del azimut real de la superficie con su intervalo de confianza a P95 es, en este caso, $\gamma = 14.5^\circ \pm 2.0^\circ$, se descartaron 23 de los 154 días claros seleccionados inicialmente, y se observa cómo el descarte de outliers disminuye notoriamente la desviación estándar.

Una cualidad interesante de este método es que es capaz de identificar cambios abruptos en el azimut de las superficies. Estas variaciones aparecen en forma de salto en la serie de estimativos de azimuts graficados contra el tiempo o el número de evento, y fueron detectados, en particular, en las estaciones AR y PP como puede verse en la Figura 4.5. En ambos casos se trata de desvíos grandes que fueron corregidos en visitas que coinciden con las fechas en las que se observa el cambio, y estos eventos se encuentran registrados en las bitácoras de cada estación.

En el caso de AR, se registra en las bitácoras una visita del 9 de Febrero de 2017 donde se reconoce un desvío al Noroeste que afecta la medida de GTI. Se reubica la estación a un metro de distancia, fijada con bulones a losas



(a) Estimativos preliminares γ_i en función del día claro seleccionado.



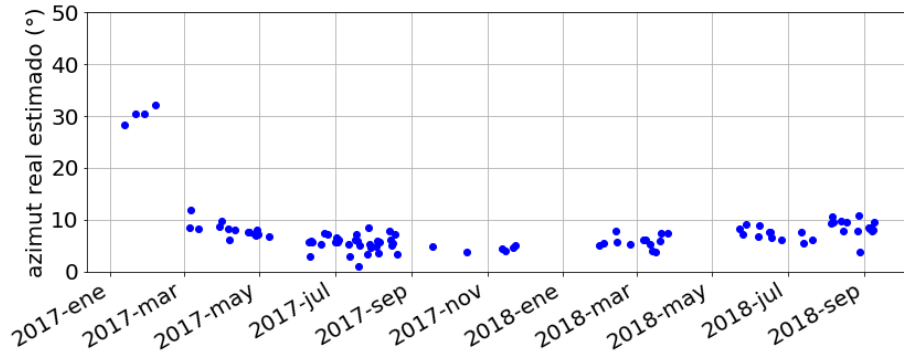
(b) Estimativos finales γ_i en función del día claro seleccionado.

Figura 4.4: Estimativos de azimut para TA: (a) preliminares (sin descarte de outliers) y (b) finales habiendo descartado aquellos γ_i a más de dos desvíos estándar del promedio.

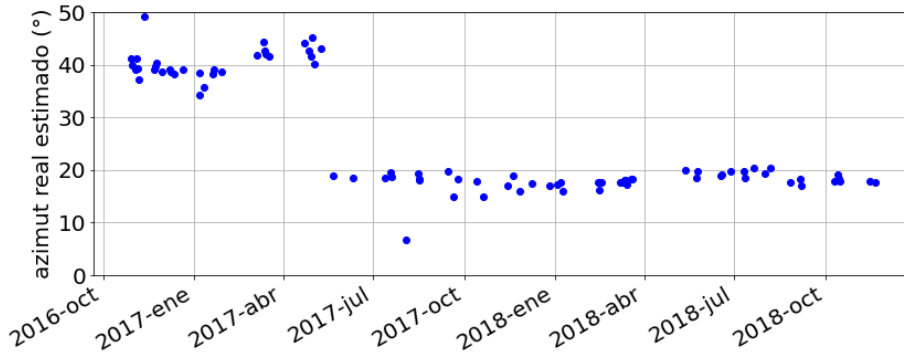
de hormigón y tensadas por lingas, determinándose el Norte por medio de la sombra de una varilla al mediodía solar. Por otra parte, en PP también hay un registro con fecha 11 de Mayo de 2017 que da cuenta de un desvío hacia el Noroeste en la medida de GTI, además de que las lingas que tensan la estación se encuentran sueltas. Al igual que en AR se procedió a relocalizar la estación a un metro de distancia sobre un conjunto de losas y se determinó el Norte nuevamente.

4.2. Descripción del método B

Para este método se comparan medidas sub-horarias de GTI con el estimativo de GTI dado por el modelo de transposición de Perez (R. Perez et al. 1990) aplicado a la medida simultánea de GHI y sus componentes. Esto se hace para un rango de azimuts en torno al valor nominal, hallándose aquel que minimiza el indicador rRMSD (Ecs. (2.27) y (2.28)).



(a) AR



(b) PP

Figura 4.5: Estimativos preliminares (sin descarte de outliers) de azimut para (a) AR y (b) PP. Se observan los cambios abruptos en la serie de azimuts, en concordancia con fechas de visitas realizadas a las estaciones.

Si bien este método fue desarrollado en forma independiente en el marco de este trabajo, resultó ser una variante del método propuesto por [Barbier et al. 2019](#), que corrige azimuts a partir de la medida de GTI y estimativos satelitales de cielo claro para GHI y DHI por medio del modelo CAMS McClear ([Lefèvre et al. 2013](#)), haciendo variar tanto el azimut como la inclinación de la superficie y hallando el par (β, γ) que minimiza el rRMSD.

En nuestra implementación, en cambio, partimos de medidas minutas de GHI, DHI y DNI en tierra, y solo variamos el azimut bajo la hipótesis de que la inclinación β nominal de las estaciones coincide con la inclinación real¹.

Los pasos de este procedimiento se detallan a continuación:

- (i) Los datos minutas de GHI, DHI y DNI (en caso de no tener medida de

¹La inclinación real de las medidas de GTI se chequeó con un inclinómetro digital en cada visita de mantenimiento y es confiable a $\pm 1^\circ$.

DNI se puede estimar la misma usando la Ec. (2.6) de clausura) pasan por un subconjunto de filtros laxo, dado por los filtros F0 a F3 y F8 a F11 descritos en la Sección 3.2.2.

- (II) Se identifican los datos correspondientes a condiciones de cielo claro, utilizando el algoritmo ya mencionado de [Reno y Hansen, 2016](#) a escala minatural, con una ventana móvil de 10 minutos y utilizando el modelo ESRA de cielo claro, tal como se hizo en la implementación del Método A. Los datos minutales filtrados e identificados como de cielo claro son integrados a datos diezminutales, utilizando un criterio de integración tal que el intervalo de diez datos minutales es promediado a un dato diezminutal si más de $2/3$ de los mismos pasaron el conjunto de filtros y están etiquetados como de cielo claro.
- (III) A partir de las GHI, DHI y DNI integradas, se calcula la GTI modelada para un rango de valores de azimut, en torno al valor nominal del azimut de la superficie. El modelo Perez de transposición es el elegido para esto, dado que es el que mejor describe la característica de anisotropía del cielo claro ([Yang, 2016](#)). Usar el modelo isotrópico en condiciones de cielo claro introduciría un sesgo innecesario.
- (IV) La GTI modelada es comparada con la medida por medio del indicador de dispersión rRMSD (Ecs. (2.27) y (2.28)) expresado relativo a la media de la medida de GTI. El azimut que minimiza este indicador es nuestro primer estimativo del azimut real de la superficie, y este procedimiento se repite en forma de validación cruzada, eligiendo al azar un 50 % de datos para entrenamiento y evaluación e iterando 1000 veces. De esta manera obtenemos un conjunto de estimativos de azimuts, cuyo promedio nos da el azimut real de la superficie.

Este método a diferencia del método A, no es capaz de detectar cambios en el azimut a lo largo del tiempo, por lo que debe aplicarse solamente en intervalos temporales donde se comprueba que el azimut no varía. Además, el método B no proporciona una estimación de la incertidumbre asociada¹.

En la sección siguiente se muestra cómo fueron validados ambos métodos contra datos de azimut nominal conocido.

¹La desviación estándar asociada al método de validación cruzada es muy baja y no es útil para representar la incertidumbre real del método.

4.3. Validación de los métodos

Necesitamos validar el método de estimación de azimut aplicándolo a superficies con azimut conocido. Es importante mencionar que las medidas de irradiancia en planos inclinados no orientados al ecuador son extremadamente escasas, lo que dificulta la tarea.

Para esta validación contamos con datos provenientes de un arreglo de piranómetros montados sobre un soporte semi-hemisférico en la Isla de La Réunion, Francia (Lat = -21.33° , Lon = 55.50° , Asnm = 76 m), con inclinación y azimuts nominales conocidos. Estas medidas fueron tomadas originalmente para un trabajo de evaluación de modelos de transposición (David et al. 2013) y comprenden un período de un año de datos de GTI con una medida simultánea de GHI, DHI y DNI más escasa que comprende cinco meses. Los detalles de instrumentación se encuentran en la Tabla 4.1.

De manera complementaria se utilizaron también los datos de la estación LE, por ser confiables en términos de su orientación nominal, chequeada en varias oportunidades. Esto da como resultado dos conjuntos más de datos, LE1 y LE2, correspondientes a medidas de GTI a 30° y 45° respectivamente.

Parte de los resultados obtenidos mediante estos métodos fueron publicados en el Solar World Congress SWC19 (Piccioli et al. 2021).

Etiqueta	$\beta_{\text{nom}}(^{\circ})$	$\gamma_{\text{nom}}(^{\circ})$	Estación	Inicio	Fin	Instrumento
G40_60W	40	60	RE	13/11/2008	04/12/2009	CMP11
G40_30W	40	30	RE	13/11/2008	04/12/2009	CMP11
G45_0	45	0	LE2	15/03/2018	21/02/2021	CMP6
G40_0	40	0	RE	13/11/2008	04/12/2009	CMP11
G30_0	30	0	LE1	01/01/2015	14/03/2018	CMP6
G20_0	20	0	RE	13/11/2008	04/12/2009	CMP11
G40_30E	40	-30	RE	13/11/2008	04/12/2009	CMP11
G20_30E	20	-30	RE	13/11/2008	04/12/2009	CMP11
G40_60E	40	-60	RE	13/11/2008	04/12/2009	CMP11
GHI	0	-	RE	24/02/2009	13/07/2009	CMP11
DHI	0	-	RE	24/02/2009	13/07/2009	CMP11
DNI	0	-	RE	24/02/2009	13/07/2009	CH1

Tabla 4.1: Tabla de instrumentación para la validación de los métodos de detección de azimut con datos de las Islas Reunión (RE) y Salto (LE1 y LE2). Todos los piranómetros son de la marca Kipp and Zonen.

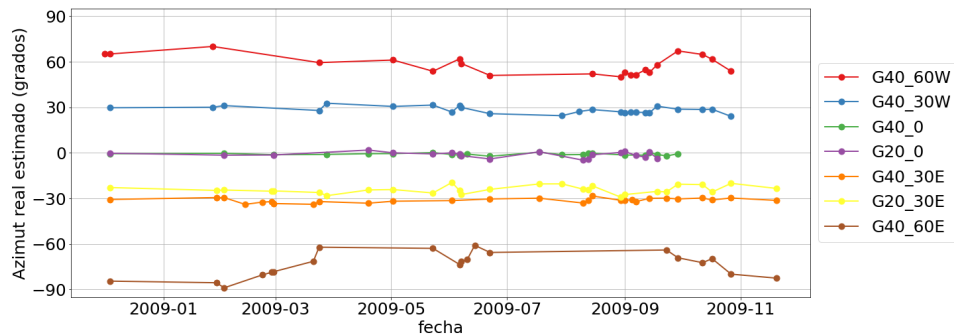
4.3.1. Método A

En el caso de los datos de La Réunion, dado que la medida de GHI es de corta duración, para cada orientación de GTI se realizó una inspección visual

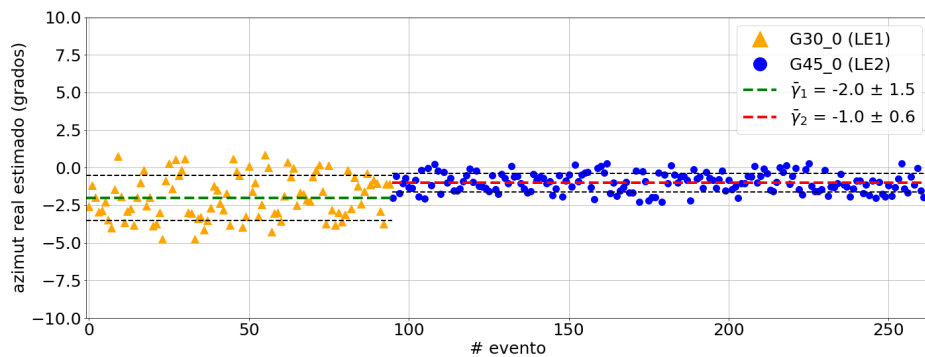
de la serie temporal de forma tal de seleccionar días con condiciones de cielo claro alrededor del máximo de cada GTI. En el caso de LE1 y LE2 al contar con medidas de GHI simultáneas se utilizó el algoritmo de detección de minutos claros. Luego se aplicó el método, obteniéndose así una serie de azimuts para cada superficie en función del tiempo, resultado que se muestra en la Figura 4.6 para los datos de La Reunión y LE.

El promedio de los γ_i es el valor de azimut real para cada superficie, $\bar{\gamma}$, y su desviación estándar σ es la incertidumbre asociada al método. En el Tabla 4.2 se muestran los resultados de azimut real estimado junto a la desviación estándar y la diferencia d entre el valor absoluto del valor nominal del azimut y el estimativo.

Esta validación realizada sobre datos de GTI con azimut nominal conocido muestra que el método es bastante preciso en general, con una tendencia a estimar mejor los azimuts pequeños en comparación con valores grandes, tan-



(a) Validación con datos de Islas Reunión (RE). Se muestran los estimativos de azimut real en función de la fecha para todas las orientaciones, previo al filtrado de outliers.



(b) Estimativos de azimut real de LE1 y LE2 (orientaciones G30_0 y G45_0 respectivamente), en función del día claro seleccionado.

Figura 4.6: Resultado de la validación del método A con datos de RE y LE.

to en términos de la diferencia entre el valor nominal y estimado como en la incertidumbre del método dado por la desviación estándar σ . Esto puede deberse en parte al hecho ya mencionado de que la función $\gamma = f(\omega^*)$ tiene una pendiente creciente con el ángulo horario ω^* , por lo que pequeñas variaciones en la estimación de ω^* se amplifican al hallar γ_i .

En la Figura 4.7 se muestra la desviación estándar σ en función del azimut nominal para las orientaciones de inclinación $\beta = 40^\circ$, con un ajuste cuadrático superpuesto. Por más que no contamos con una cantidad representativa de puntos, el comportamiento creciente de la incertidumbre con el azimut nominal es bien marcado. Sería interesante a futuro poder realizar una campaña de medidas de GTI con azimuts nominales en un rango con valores intermedios que permita completar esta gráfica e inferir una tendencia en su comportamiento con más certeza.

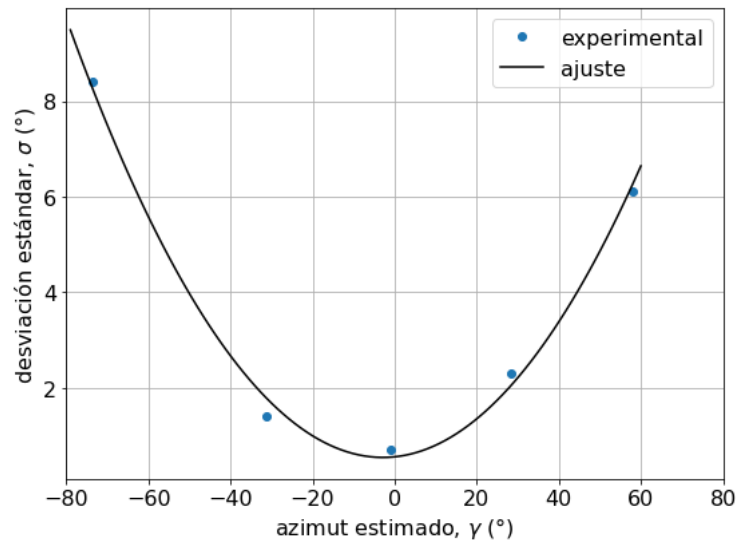


Figura 4.7: Desviación estándar σ en función del azimut nominal de las superficies con $\beta = 40^\circ$ para la validación con datos de las Islas Reunión. Superpuesto, un ajuste de los valores experimentales por una función cuadrática.

4.3.2. Método B

La validación de este método con datos de RE implicó el filtrado e integración de los datos minutales para el período en que coinciden las medidas de GHI, DHI, DNI y las distintas GTI. A partir de 78669 ternas de datos minutales válidos a nivel de plano horizontal, se obtuvieron 57298 muestras que pasaron el conjunto de filtros mencionados en la descripción del método.

De estas muestras, 17006 corresponden a minutos de cielo claro de acuerdo al algoritmo de Reno y Hansen. Finalmente, la integración a escala diezminutal da como resultado 1623 muestras de GHI, DHI y DNI a partir de las que se calculan los distintos estimativos de GTI.

En la Figura 4.8 se muestra el diagrama f_d vs k_t para los datos de RE, con los descartes de filtros y los datos de cielo claro resaltados.

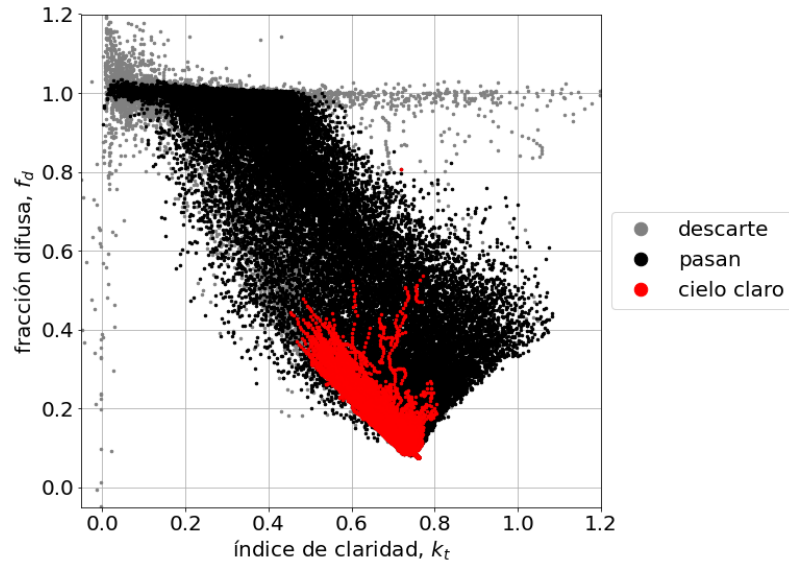


Figura 4.8: Diagrama $f_d - k_t$ a escala minutal para los datos de RE, con el resultado del filtrado y la selección de datos de cielo claro.

Para cada una de las orientaciones se calcula el estimativo diezminutal de GTI a partir de los datos de plano horizontal de acuerdo al modelo de transposición de Perez, $GTI_e(\gamma)$. Este cálculo se realiza para un rango de azimuts alrededor del valor nominal asumiendo que la inclinación real coincide con la nominal¹, y se halla el valor de γ que minimiza el rRMSD.

En la Figura 4.9 se muestran cuatro ejemplos de este procedimiento de optimización, graficándose el indicador rRMSD en la comparación del dato de GTI contra su estimativo, en función del azimut. Se observa que el mínimo de esta función está bien definido alrededor de un valor cercano al azimut nominal, y el valor objetivo de azimut real se puede determinar con precisión.

Los resultados de la validación de ambos métodos se muestran en el Tabla 4.2, donde se presentan los valores de azimut real final para todas las orientaciones, así como la desviación estándar de cada método y la diferencia

¹Esto se justifica ya que en los libros de visitas a las estaciones se comprobó inclinación por medio de un inclinómetro, sin detectar cambios de β durante la toma de medidas.

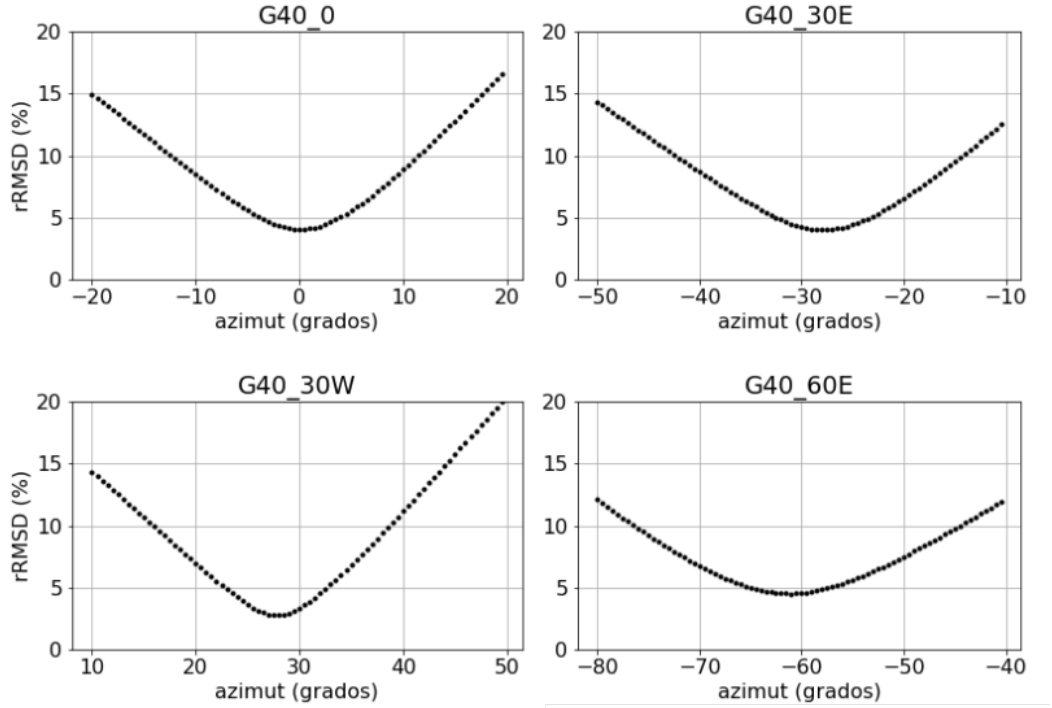


Figura 4.9: rRMSD en función del azimut de la superficie para cuatro orientaciones elegidas de los datos de RE.

absoluta entre el valor real del azimut y el nominal, $d = |\gamma_{\text{real}} - \gamma_{\text{nom}}|$ expresada en grados.

Se observa a partir de los resultados de la validación de ambos métodos, que los resultados de azimut real en general son concordantes, con algunas discrepancias en casos particulares. Todas las orientaciones dan azimuts que difieren en menos de 2σ siendo σ la desviación estándar del método A, mientras que en las orientaciones de azimut menor a 60° la discrepancia es menor a una desviación estándar (excepto el caso de G40_30E).

Claramente el método A se vuelve más impreciso y aumenta su incertidumbre al aumentar el azimut nominal, como muestra la gráfica de la Figura 4.7 para una inclinación fija. También hay una tendencia a que las inclinaciones bajas den incertidumbres mayores, como se aprecia al comparar los resultados de LE1 y LE2 en la Figura 4.6b y los cuatro resultados correspondientes a azimut nulo del Tabla 4.2.

Como trabajo a futuro en este sentido, es deseable desarrollar variantes que utilicen otros modelos de cielo claro para estimar la GTI que da lugar a la función $\gamma_i = f_i(\omega_i^*)$ del método A, como el modelo CAMS McClear (Lefèvre

Etiqueta	Método A				Método B		
	Días Claros	$\gamma_{\text{real}}(^{\circ})$	$\sigma(^{\circ})$	d(^{\circ})	$\gamma_{\text{real}}(^{\circ})$	$\sigma(^{\circ})$	d(^{\circ})
G40_60W	21	58.0	6.1	-2.0	49.5	0.0	-10.5
G40_30W	25	28.3	2.3	-1.7	27.5	0.0	-2.5
G45_0	167	-1.0	0.6	1.0	-0.9	0.2	0.9
G40_0	23	-0.9	0.7	0.9	-0.5	0.0	0.5
G30_0	95	-2.0	1.5	2.0	-2.0	0.2	2.0
G20_0	20	-1.3	1.9	1.3	0.8	0.2	0.8
G40_30E	28	-31.2	1.4	1.2	-29.0	0.1	-1.0
G20_30E	28	-24.2	2.6	-5.8	-22.9	0.2	-7.1
G40_60E	20	-73.6	8.4	13.6	-60.9	0.2	0.9

Tabla 4.2: Resultados de la validación de ambos métodos para las estaciones RE y LE1/LE2.

et al. 2013) y tener mejores datos de irradiancia en plano inclinado con diferentes orientaciones más confiables y representativos de valores intermedios de azimut, en vistas a comprender mejor el comportamiento de la incertidumbre y variabilidad del método en función de γ .

4.4. Corrección de azimut para los datos de GTI

Una vez validados los métodos de detección de azimut sobre datos de La Réunion (RE) y Salto (LE1 y LE2) con azimut nominal conocido, estamos en condiciones de proporcionar estimativos del azimut real para las estaciones de campo.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar los modelos de transposición, por lo que el método B, que se basa en determinar el azimut que minimiza los errores en la estimación de GTI por estos mismos modelos, no es el más apropiado. Por otra parte, el método A es mucho menos dependiente de aplicar un modelo de transposición (sólo se utiliza en la construcción de la función $\gamma_i = f_i(\omega_i^*)$) y tiene incertidumbre conocida, por lo que vamos a emplear este método para estimar el azimut real de la superficie.

De acuerdo a lo visto en las Figuras 4.4a y 4.5, resulta que AR y PP presentan cambios en el azimut, mientras que TA y TT (no mostrado aquí) no muestran variaciones significativas en la serie de azimuts.

Para el caso de AR se decide descartar todos los datos previos a la visita

de Febrero de 2017, y nos quedamos con una serie de datos con azimuts relativamente constantes. En el caso de la estación PP, debido a la gran variación entre los azimuts detectados, se decide renombrar la estación como PP1 antes de la fecha de la visita y PP2 posteriormente.

La Figura 4.10 muestra los estimativos finales de azimut en función del evento (día claro seleccionado), luego del descarte iterativo de outliers. En la misma figura se explicitan los promedios e incertidumbres de cada estimación, y se muestra la cantidad de días claros que finalmente la conforman. Un resumen de estos resultados se presenta en el Tabla 4.3.

Estación	inicio	fin	días claros	$\bar{\gamma}(\circ)$	$\sigma(\circ)$
AR	30/Mar/2017	09/Set/2018	87	6.6	1.6
TA	05/Set/2015	10/Oct/2018	131	14.5	1.0
TT	10/Abr/2015	26/Set/2016	60	14.2	0.8
PP1	29/Oct/2016	09/May/2017	26	40.0	1.6
PP2	22/May/2017	21/Nov/2018	45	18.3	0.8

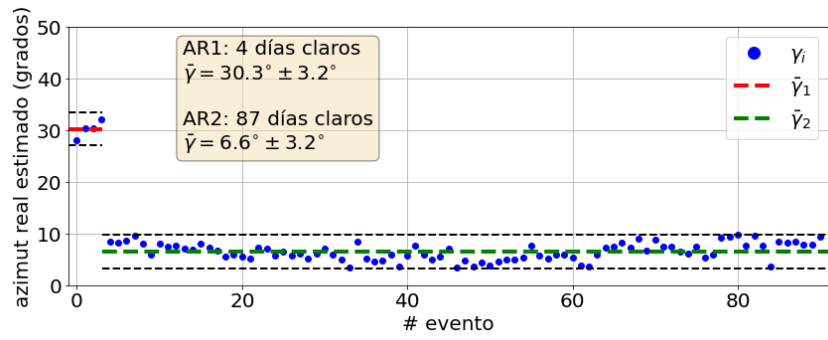
Tabla 4.3: Resultado final de la estimación de azimut para las estaciones que presentan desvío desconocido.

La utilidad y relevancia de este método se verá en el Capítulo 5, al evaluar los modelos de transposición a plano inclinado comparando los resultados al suponer un azimut real nulo, contra los valores obtenidos de acuerdo a la metodología presentada.

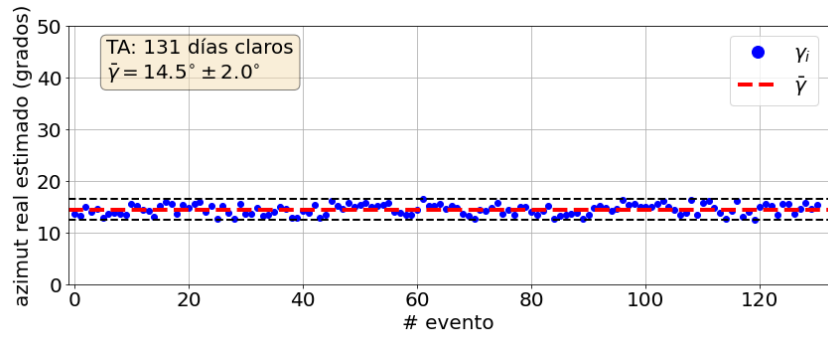
4.5. Control de calidad para datos de GTI

Una vez determinado el azimut real γ de las superficies, se procede a realizar el filtrado de GTI aplicando cotas inferiores y superiores, según se detalla a continuación:

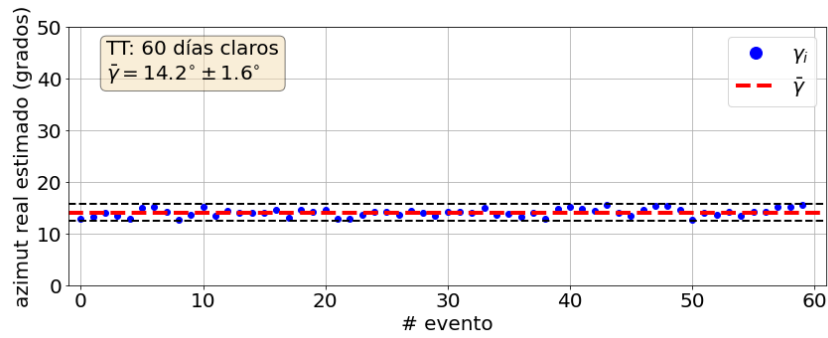
- F_{20} : $\theta < 80^\circ$. Filtro geométrico análogo al F_0 pero involucrando el ángulo de incidencia θ (dependiente del azimut real γ hallado previamente), tiene como objetivo de descartar datos afectados por efecto coseno en los piranómetros inclinados.
- F_{21} : $G_i > G_{i_{min}}$. Cota inferior sobre la medida de GTI, análoga a los filtros F_1 a F_3 . Se impone una GTI mínima de 0 W/m^2 en todas las estaciones.



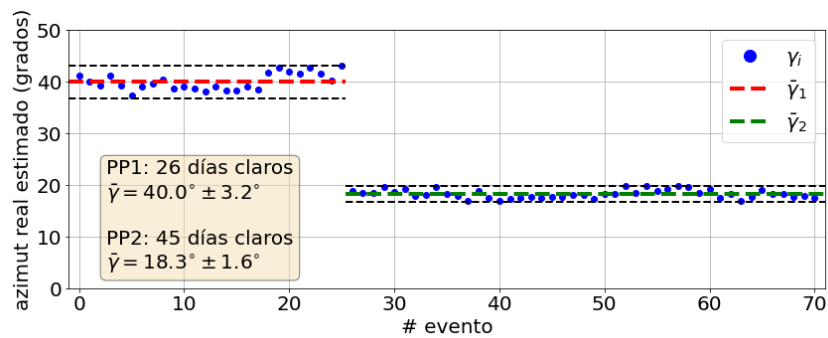
(a) AR



(b) TA



(c) TT



(d) PP

Figura 4.10: Estimativos de azimuth real para las cuatro estaciones relevadas en función del número de día claro seleccionado (evento).

	LE1		LE2		GO		TA	
#válidos	614928		759784		528721		832539	
Filtro	desc	%desc	desc	%desc	desc	%desc	desc	%desc
F19	77367	12.6	104873	13.8	75161	14.2	124220	14.9
F20	3516	0.6	3148	0.4	107	0.0	754	0.1
F21	10284	1.7	683	0.1	50	0.0	50	0.0
Fe	11101	1.8	733	0.1	0	0.0	175	0.0
totalPI	87911	14.3	107057	14.1	75214	14.2	124759	15.0

	AR		TT		PP1		PP2	
#válidos	401138		523236		164278		388678	
Filtro	desc	%desc	desc	%desc	desc	%desc	desc	%desc
F19	40621	10.1	60429	11.5	38538	23.5	55815	14.4
F20	470	0.1	19	0.0	158	0.1	102	0.0
F21	0	0.0	30	0.0	28	0.0	31	0.0
Fe	175	0.0	0	0.0	525	0.3	609	0.2
totalPI	41132	10.3	60467	11.6	39153	23.8	56430	14.5

Tabla 4.4: Descarte de filtros por estación a nivel de datos de GTI. Todos los porcentajes se dan respecto al total de datos diurnos válidos de dicha variable.

- F_{22} : $G_i < G_o$. Se establece como cota superior para GTI el valor de la irradiancia TOA en incidencia normal.
- F_e : Filtro extra de detección de datos espurios análogo al usado para las medidas en plano horizontal.

El resultado de este filtrado se muestra en la Tabla 4.4

Completado el proceso de filtrado, se busca tener un conjunto de datos estacionalmente balanceado que represente de manera equitativa todas las estaciones del año. Esto se logra calculando en primera instancia la proporción de horas o diez minutos diurnos en un año que pertenecen a media estación (período que comprende primavera y otoño), verano e invierno.

Este resultado es débilmente dependiente de la ubicación geográfica, y podemos suponerlo uniforme para el territorio uruguayo. Se encuentra que la

Estación	Inicio	Fin	ME	VER	INV
LE1	21/ jun/2016	21/ sep/2017	49.9	29.1	21.0
LE2	1/ may/2018	1/ jun/2020	51.5	26.7	21.8
GO	1/ ene/2020	31/ dic/2021	49.9	28.3	21.8
TA	1/ jul/2015	1/ dic/2018	49.0	28.6	22.4
AR	1/ jul/2017	1/ jul/2018	50.0	27.0	23.0
TT	1/ abr/2015	1/ abr/2016	48.1	27.8	24.1
PP1	29/ sep/2016	11/ may/2017	55.9	44.1	0.0
PP2	12/ may/2017	12/ may/2018	49.0	27.7	23.3

Tabla 4.5: Período final seleccionado para cada estación, y proporción (en porcentaje) de datos válidos diurnos a escala diezminutal, de acuerdo a la estación del año.

proporción es 50 % de datos de media estación, 28 % verano y 22 % invierno. Entonces se consideran todos los datos integrados válidos diurnos (ya sea a escala horaria o diezminutal) y se busca establecer el mayor intervalo posible de tiempo que respete la proporción estacional mencionada. El resultado de este análisis se presenta en el Tabla 4.5.

El período correspondiente a la medida de PP1, con azimut de 40° , no cuenta con datos de invierno, por lo que no está estacionalmente balanceado y por más que evaluaremos los modelos de transposición para ese período los resultados deben ser tomados con cautela.

Capítulo 5

Desempeño de los modelos

En este capítulo se describe la metodología detrás de las diferentes validaciones de los modelos de transposición realizadas, y se presentan los resultados de las mismas. En la Sección 5.1 se describen los distintos conjuntos de datos utilizados, tanto para la validación con DHI dato como con DHI estimada por un modelo de separación. En la Sección 5.2 se analiza el problema del impacto de la estimación de la reflectancia en los modelos de transposición. En la Sección 5.3 se presentan los resultados de la validación de modelos de transposición en términos de los indicadores de incertidumbre (sesgo y dispersión) al utilizar el dato de DHI. Se analizan las consecuencias de suponer un azimut nominal nulo (es decir, que las superficies están correctamente orientadas al ecuador), y de utilizar como entrada el azimut real determinado según el método A descrito en el Capítulo 4. Dicha sección se complementa con un análisis de desempeño según distintas condiciones de cielo, de acuerdo al índice de claridad k_t . En la Sección 5.4 se presenta el desempeño de los modelos de transposición al utilizar un modelo de separación para estimar DHI. Primero se ajustan localmente y se validan tres modelos de separación para decidir el que se va a implementar, para luego evaluar el impacto en la incertidumbre de la estimación de GTI. El capítulo finaliza con la Sección 5.5 donde se discuten y analizan los resultados.

5.1. Esquema de validación

De acuerdo a la Ec. (2.17), para calcular GTI por medio de un modelo de transposición se necesitan datos de GHI y datos o estimativos de sus compo-

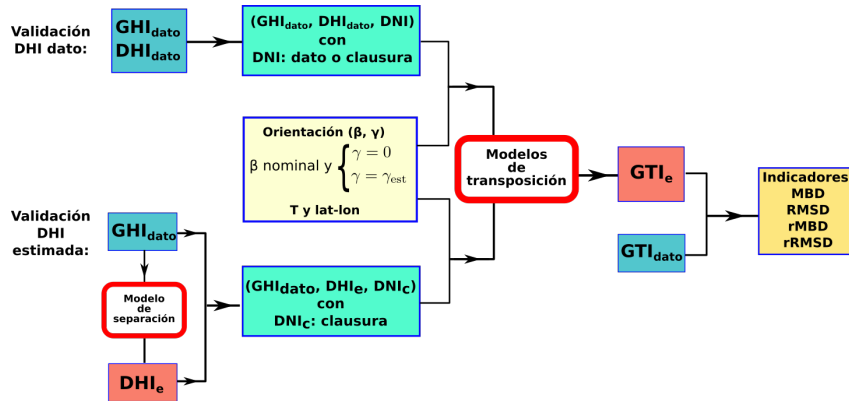


Figura 5.1: Diagrama de flujo representando la metodología aplicada.

nentes DHI y DNI. Los diferentes conjuntos de datos de entrada utilizados para el cálculo de GTI por medio de los diferentes modelos fueron:

- Pares de datos (GHI, DHI), con DNI calculada por la relación de clausura (Ec. (2.6)) en caso de que el dato de DNI no exista. Este conjunto de datos da lugar a lo que llamaremos *validación con difusa medida*.
- Datos de GHI, a partir de los que se calculan estimativos de DHI usando el modelo de separación RA2S (Sección 2.4), y DNI calculada por clausura a partir del dato de GHI y la DHI estimada. Ésta será la *validación con difusa estimada*.

En la Figura 5.1 se representa en forma de diagrama de flujo la metodología seguida. En todos los casos, se estima GTI suponiendo (a) un azimut nominal nulo (superficie mirando hacia el Norte), y (b) utilizando el valor real de azimut calculado por el método A del Capítulo 4. El desempeño de los modelos se cuantifica mediante los indicadores de incertidumbre MBD y RMSD (y sus valores relativos a la media de la medida de GTI, rMBD y rRMSD) al comparar el estimativo de GTI contra su correspondiente medida. Estos indicadores fueron presentados en la Sección 2.3.1. La estimación de DHI por medio de tres modelos de separación también es validada según las mismas métricas, y los desempeños se muestran en la Sección 5.4.1. Con esta información se selecciona el modelo de separación a usar para evaluar su impacto en la transposición.

Además de la validación a partir de datos¹ diezminutales, se decidió trabajar también la escala horaria por consistencia con estudios previos de irradian-

¹En todos los casos se entiende por dato a la medida diezminutal u horaria, integrada a partir de los datos minutales filtrados, según lo visto en el Capítulo 3.

cia difusa, en especial el trabajo de validación local de modelos de separación de [Abal et al. 2017](#), que caracterizó las incertidumbres de varios modelos de separación sobre el territorio uruguayo.

Todos los cálculos solares y las implementaciones de los modelos se realizaron por medio de la biblioteca `pvlib`¹ de Python ([F. Holmgren et al. 2018](#)).

5.2. Reflectancia

Como se vio en la Sección 2.1.4, el término G_{ri} correspondiente a la componente difusa reflejada de GTI depende de un factor de reflectancia o albedo ρ_g (ver Ec. (2.17)). Este factor se puede medir de forma continua al dividir la medida de irradiancia de un piranómetro que mira al suelo entre la medida de GHI^2 . Si no se dispone de medidas de reflectancia simultáneas, se puede utilizar un valor constante efectivo medido localmente. Como veremos, existe una influencia del albedo en el desempeño de los modelos de transposición.

A efectos de investigar la importancia de seleccionar el valor de reflectancia adecuado en las estaciones de la RMCIS, se decidió investigar la sensibilidad de la incertidumbre en los modelos de transposición con respecto a ρ_g . Para ello se evaluaron los cinco modelos de transposición para valores de reflectancia entre 0.05 y 0.55. El resultado se presenta gráficamente en la Figura 5.2, donde se observa que el MBD es lineal en ρ_g (como es de esperarse debido a la dependencia lineal de GTI con el mismo), y el modelo ISO presenta sesgos negativos en la mayor parte del rango de ρ_g . Por otra parte, la pendiente de dichas rectas (y por lo tanto el impacto de usar un ρ_g no representativo) aumenta con la inclinación de la superficie. El RMSD presenta mínimos bien definidos, y una concavidad que aumenta con la inclinación, demostrándose que la sensibilidad del RMSD respecto a ρ_g es también dependiente de la inclinación. Los modelos HD y HDKR son los que presentan menor variabilidad en su RMSD en la región de reflectancias de interés, $\rho_g \in [0.1, 0.3]$, lo que los hace más robustos a estimaciones no óptimas de ρ_g , a diferencia de los modelos más sofisticados como el TCK y PER. Finalmente, es claro que el ordenamiento de los modelos según RMSD es dependiente del valor de ρ_g elegido: baja reflectancia favorece a los modelos TCK y PER, mientras que altas reflectancias favorecen al modelo ISO dado que al aumentar artificialmente ρ_g estamos suponiendo

¹<https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/index.html>

²Este es el caso de la estación GO.

mayor contenido de irradiancia difusa del que realmente hay, compensando la subestimación típica del modelo ISO.

Estas figuras son muy similares a las presentadas en el reciente trabajo de [Tuomiranta et al. 2021](#), en el contexto de la incertidumbre en la estimación de la potencia de salida de plantas fotovoltaicas bifaciales en distintas estaciones que cubren variadas regiones del planeta.

Finalmente, en la Figura 5.3 se presentan medidas de reflectancia realizadas recientemente (2020-21) sobre pasto en LE, que dan soporte a la elección del valor $\rho_g = 0.2$ constante para todas las estaciones de la RMCIS, ya que este valor es adecuado para vegetación rala y superficies grises (como en el caso de LE). A falta de mayor información se adoptará este valor para todas las estaciones, aunque es posible que en LE el valor real sea algo menor debido a la reflexión de la mesa metálica en la que se encuentra montado el instrumental de medida, y las losas circundantes.

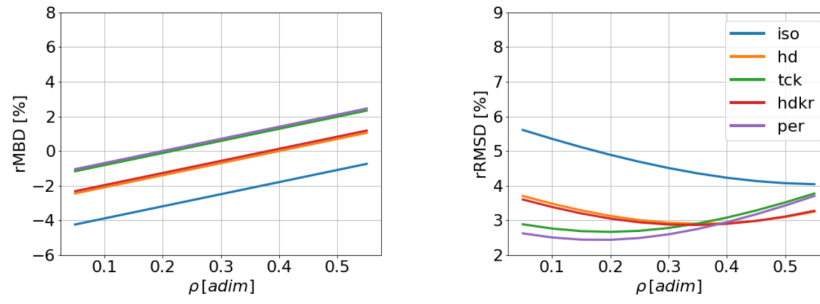
5.3. Validación de modelos de transposición con difusa medida

En esta sección se presentan los resultados de la validación de cinco modelos de transposición utilizando como entrada la medida de GHI y DHI, y la medida de DNI en caso de que exista (como sucede en las estaciones LE y GO) o su valor por la ecuación de clausura a partir de GHI y DHI (Ec. (2.6)).

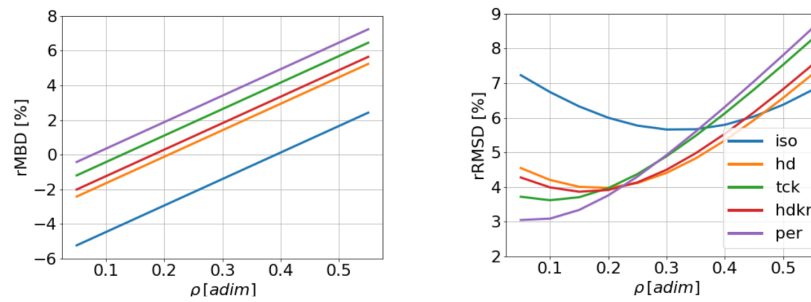
Esta validación se separa en tres análisis: (i) una comparación de indicadores al utilizar el azimut nominal $\gamma = 0$ de las superficies contra el valor de azimut real calculado en el Capítulo 4, (ii) el desempeño para todo cielo, comparando la totalidad de los estimativos de GTI contra el dato, y (iii) desempeño por condición de cielo, según el [índice de claridad](#) k_t . Aquí presentaremos los resultados más significativos, mientras que las tablas de indicadores completas, debido a su tamaño, se encuentran en el Apéndice C. En particular la Tabla C.1 presenta los indicadores de sesgo y dispersión para todas las estaciones utilizando el azimut nominal y real de cada estación.

5.3.1. Impacto de la estimación del azimut real

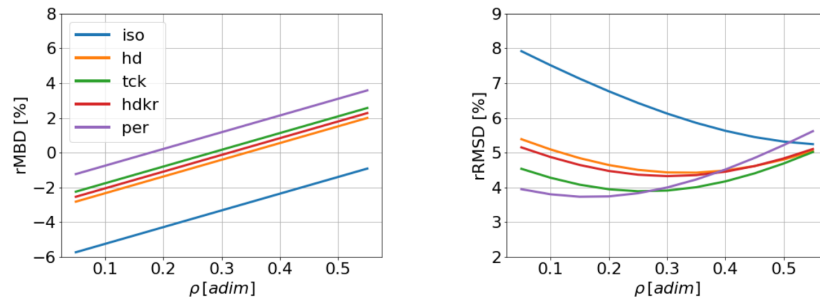
Los resultados presentados en la Tabla C.1 muestran que para todas las estaciones que presentan desvíos importantes con respecto a la dirección Nor-



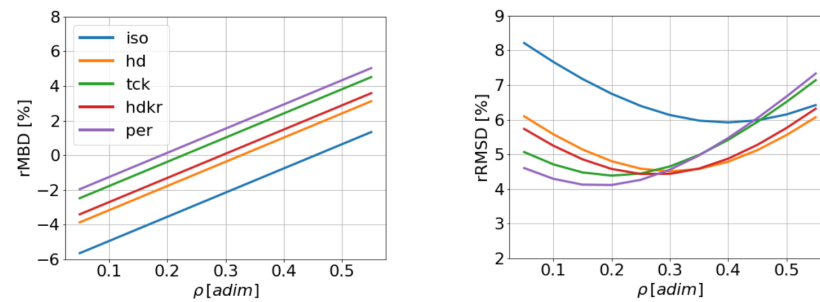
(a) LE1 - $\beta = 30^\circ$, $\overline{GTI} = 601.3 \text{ W/m}^2$



(b) LE2 - $\beta = 45^\circ$, $\overline{GTI} = 570.6 \text{ W/m}^2$



(c) GO - $\beta = 40^\circ$, $\overline{GTI} = 594.0 \text{ W/m}^2$



(d) TA - $\beta = 45^\circ$, $\overline{GTI} = 535.4 \text{ W/m}^2$

Figura 5.2: Indicadores relativos (a la media de la medida de GTI) de sesgo y dispersión para diferentes valores de reflectancia asumida constante, a nivel diezminutal para las estaciones tipo I y II, definidas en la Sección 3.3.

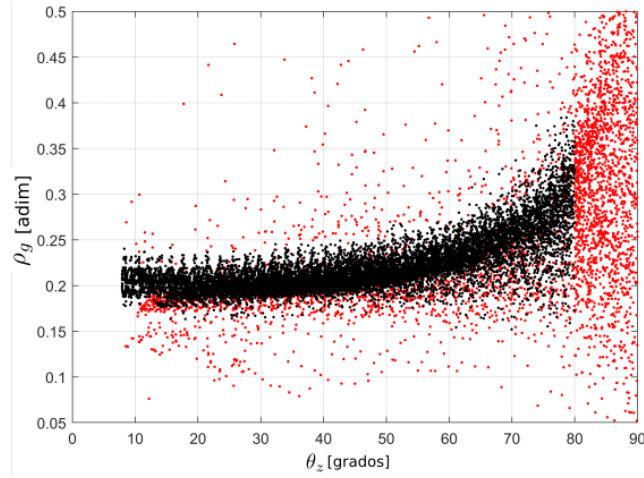


Figura 5.3: Reflectancia en función del ángulo cenital para LE. Gráfica cedida por Juan Rodríguez, integrante del LES, y parte de un trabajo en proceso de publicación en la revista ERMA. En rojo, puntos descartados según un filtrado basado en la recomendación BSRN (Long y Dutton, 2010) y $\theta_z < 80^\circ$.

te, los indicadores de dispersión (calculados sobre la totalidad de los datos) disminuyen notoriamente al utilizar el azimut real respecto al nominal. Por ejemplo, el rRMSD disminuye del 30 % al 6 % en PP1, del 17 % al 9 % en PP2 y del 14 % al 7 % en TT.

Esta variación en la incertidumbre de los modelos de transposición se cuantifica mediante la diferencia porcentual

$$\Delta = 100 \times (\text{RMSD}_{real} - \text{RMSD}_{nom}) / \text{RMSD}_{nom} \quad (5.1)$$

entre el indicador de dispersión RMSD con azimut real y azimut nominal, relativo a este último, y se muestra en la Tabla 5.1.

Se observa una tendencia esperable a mayores diferencias en el rRMSD para azumuts mayores, con PP2 como excepción. Es notable la disminución en la incertidumbre en el caso de LE1, donde el desvío era de apenas 2° , mientras que en LE2 al ser menor el azimut de la superficie y tener una inclinación mayor, no hay cambios en el RMSD.

Resulta claro que la aplicación de un método para determinar el azimut real de las superficies es clave para una correcta validación de los modelos de transposición. Por lo tanto, de aquí en adelante las validaciones subsiguientes se realizarán con el azimut real calculado (método A).

Por otro lado, las estaciones AR y TT/PP arrojaron resultados que evidencian problemas en las medidas, en concordancia con lo visto en el Capítulo 3

	LE1	LE2	TA	AR	TT	PP1	PP2
ISO	-2.1	0.0	-50.4	-12.0	-59.8	-83.1	-46.4
HD	-6.1	0.0	-62.8	-11.0	-59.1	-81.8	-49.4
TCK	-10.0	0.0	-64.8	-9.0	-52.1	-79.3	-43.1
HDKR	-6.3	0.0	-64.1	-10.9	-57.6	-81.3	-48.2
PER	-10.7	0.0	-67.2	-9.0	-51.7	-78.9	-43.2
$(\beta, \gamma) (^{\circ})$	(30, -2.0)	(45, -1.0)	(45, 14.4)	(30, 6.6)	(45, 14.2)	(45, 39.9)	(45, 18.3)

Tabla 5.1: Diferencia porcentual entre el rRMSD de los modelos de transposición al usar azimut real y el valor nominal $\gamma = 0$, relativo a este último.

de control de calidad y en el Capítulo 4 de detección de azimut, donde se las catalogó como estaciones de tipo III y se estableció que la medida era de calidad inferior a las otras estaciones. El desempeño de los modelos de transposición para estas estaciones se incluye en la Tabla C.1 y muestra comportamientos anómalos. Por ejemplo, sesgos positivos grandes en el modelo ISO, que contradicen lo esperado y visto en la literatura, en conjunto con RMSD exageradamente grandes en los modelos anisotrópicos.

De aquí en más nos enfocaremos entonces en analizar los resultados confiables de las estaciones tipo I y II: GO, TA, LE1 y LE2, donde LE1 y LE2 son los nombres asignados al conjunto de datos de LE con inclinaciones $\beta = 30^{\circ}$ y $\beta = 45^{\circ}$ respectivamente.

5.3.2. Desempeño para todo cielo

El desempeño de los modelos de transposición para toda condición de cielo se presenta en función de los indicadores de sesgo y dispersión absolutos y relativos MBD, rMBD, RMSD y rRMSD en las Tablas 5.2 y 5.3 respectivamente, para las estaciones de Tipo I y II, a escala diezminutal y horaria, mientras que los resultados correspondientes a las estaciones tipo III se encuentran en la Tabla C.1. Es importante notar que solo son comparables entre estaciones los indicadores absolutos, dado que los relativos dependen de las medias de la medida de GTI, que varía tanto entre estaciones como entre escalas temporales¹. La gráfica de dispersión obtenida al comparar el dato de GTI contra la GTI estimada por los cinco modelos se presenta en la Figura 5.4 para las estaciones tipo I y II, en tanto que su equivalente para las estaciones tipo III se muestra

¹Al integrar a nivel diezminutal y horario a partir de los datos minutales, los conjuntos obtenidos no se corresponden exactamente por la diferente influencia de los huecos en las diferentes escalas temporales. Como consecuencia, las medias de ambas escalas temporales no son las mismas.

	LE1 (30,-2.0)		LE2 (45,-1.0)		GO (40,180)		TA (45,14.4)		Global	
	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)
Escala 10-minutal										
Modelo										
ISO	-15.3	-2.6	-13.6	-2.4	-23.9	-4.0	-19.0	-3.5	-18.6	-3.2
HD	-6.6	-1.1	0.0	0.0	-6.6	-1.1	-9.5	-1.8	-6.1	-1.1
TCK	0.4	0.1	6.2	1.1	-3.2	-0.5	-2.0	-0.4	-0.3	0.0
HDKR	-5.8	-1.0	2.1	0.4	-4.9	-0.8	-7.0	-1.3	-4.1	-0.7
PER	1.4	0.2	10.9	1.9	2.8	0.5	0.8	0.1	3.7	0.6
$\overline{\text{GTI}}$	601.3		570.6		594.0		535.4		575.3	
# datos	14722		29498		39758		49871		133849	
Escala horaria										
Modelo										
ISO	-15.4	-2.4	-11.9	-2.0	-23.7	-3.9	-18.9	-3.5	-18.3	-3.1
HD	-6.0	-0.9	2.6	0.4	-5.6	-0.9	-9.6	-1.8	-5.1	-0.9
TCK	2.0	0.3	10.0	1.7	-0.8	-0.1	-1.0	-0.2	1.7	0.3
HDKR	-5.2	-0.8	5.0	0.8	-3.6	-0.6	-6.9	-1.3	-3.0	-0.5
PER	2.6	0.4	14.3	2.4	5.3	0.9	1.1	0.2	5.4	0.9
$\overline{\text{GTI}}$	639.1		598.1		607.2		540.9		596.3	
# datos	1921		4132		6426		7113		19592	

Tabla 5.2: Sesgos absolutos y relativos (a la media de la medida de GTI en W/m²) MBD y rMBD respectivamente. Junto al nombre de cada estación se muestra la orientación real (β , γ) en grados, con γ obtenido por el método A (Sección 4.1). En las últimas filas se indica la media de GTI y el número de datos usados para cada estación. La cuarta columna es el indicador global de las estaciones seleccionadas (tipo I y II).

	LE1 (30,-2.0)		LE2 (45,-1.0)		GO (40,180)		TA (45,14.4)		Global	
	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)
Escala 10-minutal										
Modelo										
ISO	27.5	4.6	32	5.6	38.2	6.4	36.1	6.7	34.4	6.0
HD	18.4	3.1	22.3	3.9	27.4	4.6	25.7	4.8	24.3	4.2
TCK	16.4	2.7	22.2	3.9	22.7	3.8	23.5	4.4	21.8	3.8
HDKR	18.1	3.0	22.0	3.9	26.4	4.5	24.5	4.6	23.5	4.1
PER	15.2	2.5	21.6	3.8	22.2	3.7	22.0	4.1	20.9	3.6
$\overline{\text{GTI}}$	601.3		570.6		594		535.4		575.3	
# datos	14722		29498		39758		49871		133849	
Escala horaria										
Modelo										
ISO	26.2	4.1	29.4	4.9	36.1	5.9	35.1	6.5	32.6	5.5
HD	16.3	2.6	19.8	3.3	24.6	4.0	24.2	4.5	22.1	3.7
TCK	15.0	2.3	21.3	3.6	19.4	3.2	21.3	3.9	19.6	3.3
HDKR	15.9	2.5	19.9	3.3	23.6	3.9	22.8	4.2	21.3	3.6
PER	13.9	2.2	22.2	3.7	20.2	3.3	20.7	3.8	19.7	3.3
$\overline{\text{GTI}}$	639.1		598.1		607.2		540.9		596.3	
# datos	1921		4132		6426		7113		19592	

Tabla 5.3: Indicadores de dispersión absolutos y relativos y RMSD y rRMSD. Los mismos detalles de la Tabla 5.2 aplican para ésta.

en la Figura C.1.

Con el objetivo de cuantificar el desempeño global de los modelos, se calcularon indicadores globales a partir de las cuatro estaciones seleccionadas

(última columna de las Tablas 5.2 y 5.3). Para calcular el MBD y RMSD global, se realizó un promedio de los indicadores ponderado por la cantidad de datos de cada una de las estaciones y por la irradiancia media; los indicadores relativos rMBD y rRMSD globales se obtienen dividiendo su correspondiente indicador absoluto por la media global de GTI.

Todos los modelos, salvo el ISO, presentan sesgos pequeños en el entorno de $\pm 2\%$ de la media (Tabla 5.2). En LE1, GO y TA, los modelos más sofisticados PER y TCK presentan los menores sesgos, representando bien las condiciones locales. Debe tenerse en cuenta en este contexto que los modelos de transposición no tienen coeficientes ajustables.

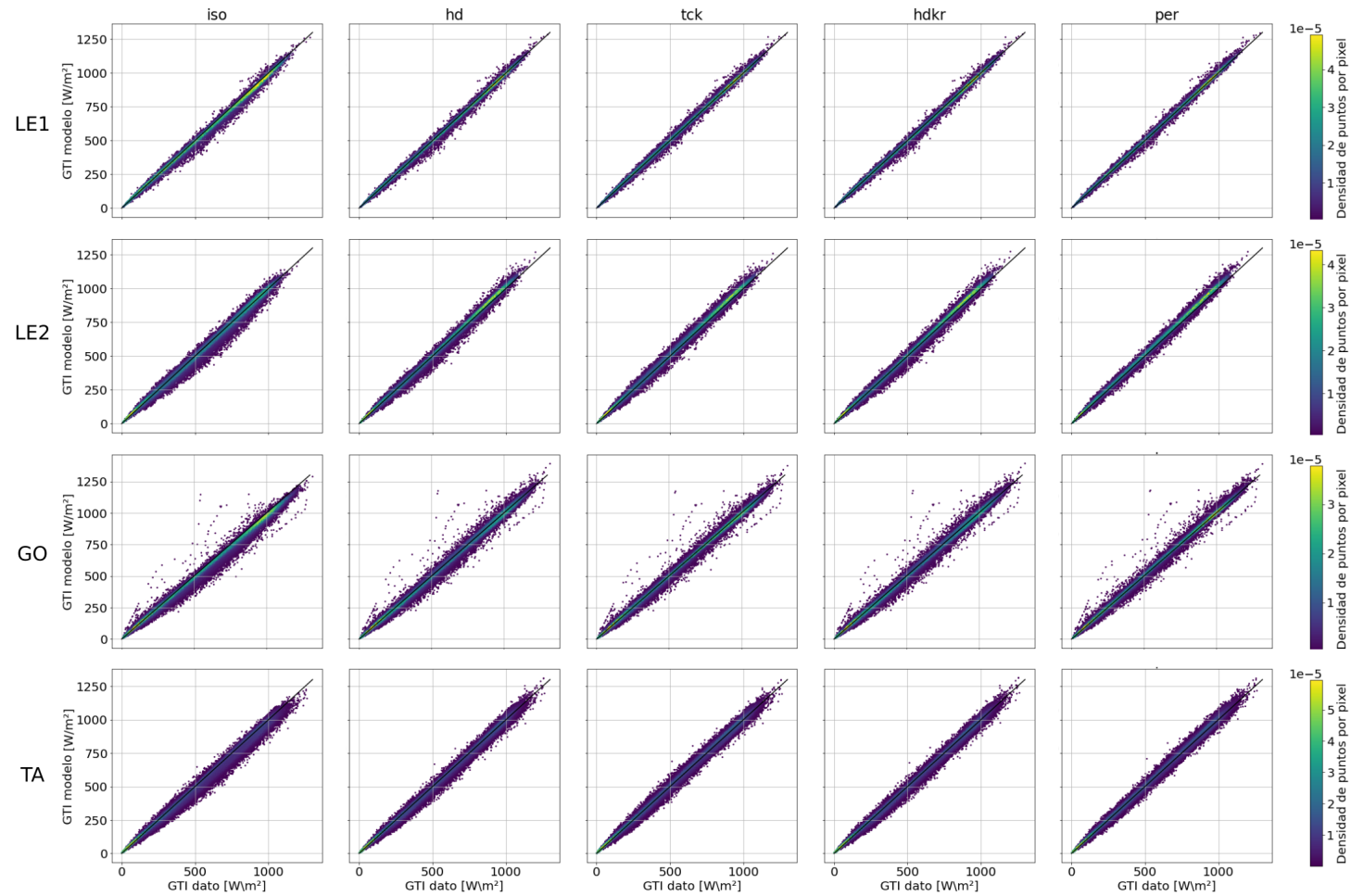


Figura 5.4: GTI modelada en función del dato de GTI, para las estaciones tipo I y II, y coloreado por densidad de puntos.

De acuerdo con los resultados previos en la literatura (Yang, 2016, R. Perez et al. 1990), el modelo ISO presenta MBD negativos en todas las estaciones y RMSD más altos que los demás modelos. Los rRMSD para todo cielo son pequeños, variando entre 4 % y 6 % de la media. Además son muy similares entre los modelos anisotrópicos y comparables a la incertidumbre típica asociada a las medidas, por lo que no hay base para resolver un mejor modelo en función únicamente de su desempeño. En este sentido, de acuerdo a lo observado en Duffie y Beckman, 2013, se recomienda el uso del modelo HD por ser el de mayor simplicidad de implementación, acompañado por un desempeño similar al de los modelos más complejos.

5.3.3. Desempeño según condición de cielo

Con el objetivo de analizar la incertidumbre de los modelos de transposición en diversas condiciones de cielo, definiremos tres categorías, de acuerdo al valor del índice de claridad k_t :

- (NA) $0 < k_t < 0.30$: esta categoría está asociada a condiciones de nubosidad muy alta, cielo en general cubierto con alto contenido de difusa y poca o nula irradiancia directa.
- (NP) $0.30 \leq k_t < 0.65$: esta categoría es representativa del cielo parcialmente nublado, donde la anisotropía de la difusa es más notable.
- (CD) $k_t \geq 0.65$: cielo mayoritariamente despejado, incluyendo condiciones de cielo claro.

En la Figura 5.5 se muestran las distribuciones en frecuencia relativa y acumulada del índice de claridad, k_t , y la fracción difusa, f_d , a nivel dieziminutal para LE. Estas gráficas aportan información relevante sobre la proporción de datos en cada categoría de k_t , y podemos considerarlas típicas para todas las estaciones. La distribución de f_d es bimodal, con dos picos asociados a las condiciones de cielo claro (f_d baja) y cielo cubierto (f_d alta). La distribución acumulada en k_t muestra que en LE aproximadamente 16 % de los datos corresponden a cielo cubierto ($k_t < 0.30$) y 60 % a condiciones mayormente despejadas ($k_t \geq 0.65$). El resto (24 %) son condiciones de nubosidad parcial.

Los resultados del desempeño de los modelos de transposición a nivel dieziminutal por categoría de k_t se presentan en la Tabla C.2 en términos de los

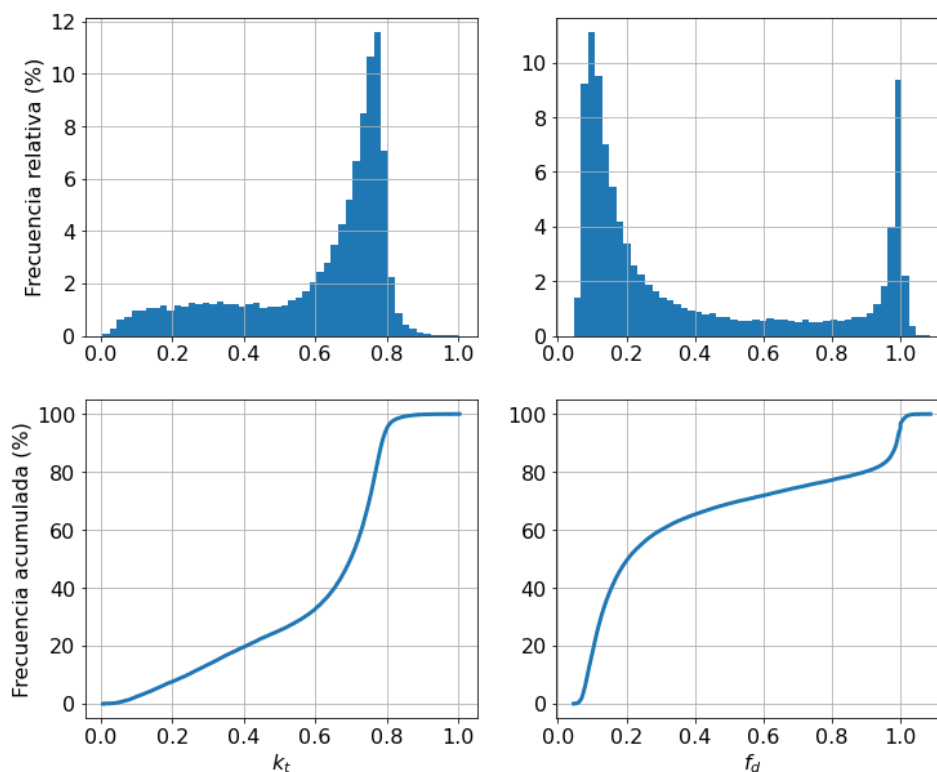


Figura 5.5: Histogramas de k_t y f_d a nivel diezminutal para los datos de la estación LE (que incluye ambas inclinaciones). Se complementa con la distribución acumulada de ambas magnitudes.

indicadores absolutos y relativos de sesgo y dispersión. Los indicadores relativos no son comparables entre categorías de k_t ni entre estaciones, debido a que las medias de las medidas de GTI son diferentes entre sí. Sin embargo podemos comparar los indicadores absolutos. De forma tal de visualizar mejor estos indicadores, se los presenta en forma de gráfica de barras en las Figuras 5.6 y 5.7.

De la Figura 5.6 se observa a primera vista que en la categoría de cielo cubierto (NA) todos los modelos presentan sesgos similares al ISO, de buen desempeño como es de esperarse. Los sesgos son además prácticamente nulos en el caso de GO y levemente positivos en LE1 y TA, mientras que en LE2 los mismos son considerablemente mayores en esta categoría¹. Al pasar a la categoría de nubosidad parcial (NP), se evidencia el sesgo negativo del modelo ISO y la falla de la hipótesis isotrópica en estas condiciones. En dicha categoría los modelos TCK y PER son los que muestran menor sesgo (excepto

¹Quizás en esta estación la suposición de $\rho_g = 0.20$ sea excesiva (no hay vegetación, sino lasas grises), y el efecto de la irradiancia reflejada es mayor a 45° .

PER en LE2). Finalmente en condiciones de cielo despejado (CD) se observan sesgos muy bajos de los modelos anisotrópicos en LE1, GO y TA, y considerablemente mayores en LE2. En esta categoría se sigue observando la esperable subestimación del modelo ISO en todas las estaciones.

En la Figura 5.7 se muestra el indicador de dispersión absoluto RMSD para las tres categorías de k_t . Allí se observa que en la categoría (NA) todos los modelos se desempeñan de forma similar, ya que todos los modelos se reducen al ISO cuando las condiciones de cielo tienden a cielo cubierto. En la categoría (NP) el ISO tiene una incertidumbre mayor en todas las estaciones, mientras que el modelo PER se desempeña mejor que el resto. Finalmente en la categoría (CD) se observa una paridad en el desempeño de todos los modelos anisotrópicos, con leves variaciones de acuerdo a la estación.

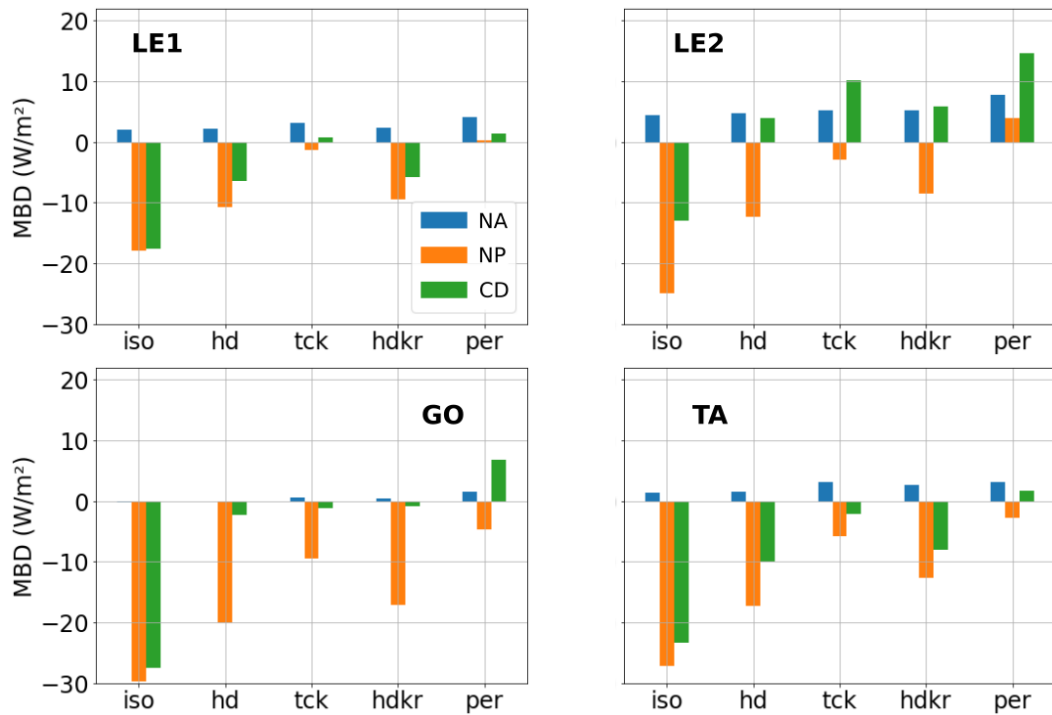


Figura 5.6: Indicadores de sesgo absoluto MBD en las estaciones tipo I y II, a nivel diezminutal y por categoría de k_t . NA: nubosidad alta ($k_t < 0.30$), NP: nubosidad parcial ($0.30 \leq k_t \leq 0.65$), CD: cielo despejado ($k_t > 0.65$)

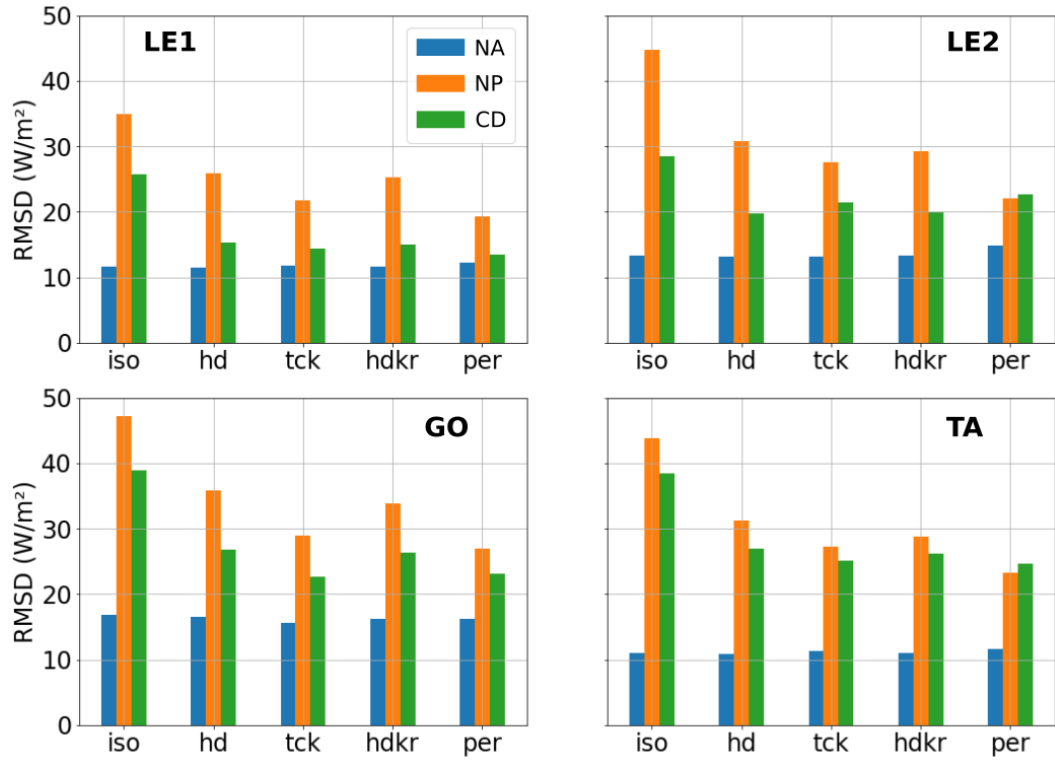


Figura 5.7: Indicadores de dispersión RMSD en las estaciones tipo I y II, a nivel diezminutal y por categoría de k_t . NA: nubosidad alta ($k_t < 0.30$), NP: nubosidad parcial ($0.30 \leq k_t \leq 0.65$), CD: cielo despejado ($k_t > 0.65$).

5.4. Validación con difusa estimada

Muy frecuentemente no se cuenta con medidas simultáneas de GHI y sus componentes (DHI, DNI). En estos casos, los modelos de transposición se usan en conjunto con un modelo de separación (Sección 2.4), que permite estimar estas componentes a partir de GHI. El uso de estos modelos implica una incertidumbre adicional y es de interés evaluar su impacto en el problema de la estimación de GTI.

En la Sección 2.4 se presentó a la familia de modelos de separación propuesta por Ruiz-Arias et al. 2010 y validada localmente por Abal et al. 2017. En la Ec. (2.30) se muestra la expresión general de los modelos RA (un predictor), RA2 (dos predictores) y RA2s (dos predictores simplificado). Esta familia de modelos localmente ajustada es la que ofrece mejor compromiso entre simplicidad y desempeño de acuerdo a la validación local, con rRMSD del orden de 20% a nivel horario en f_d ajustado localmente.

En primera instancia, con el objetivo de comparar estos tres modelos, se

realizó un nuevo ajuste local de coeficientes con los datos horarios y diezminutales empleados en este trabajo, seguido de una validación de los tres modelos mencionados.

5.4.1. Validación de los modelos de separación

Previo al ajuste de los modelos de separación, y a los efectos de eliminar algunos puntos anómalos en el diagrama $f_d - k_t$, se aplican los siguientes filtros adicionales a los datos integrados (presentados por su condición de aceptación):

- $G_h \leq G_{h,cs}$, donde $G_{h,cs}$ es la GHI en condiciones de cielo claro, estimada por el modelo ESRA (Rigollier et al. 2000), con turbidez de Linke $T_L = 2$.
- $G_{dh} \geq G_{dh,cs}$ para $k_t > 0.1$. Aquí la $G_{dh,cs}$ es DHI de cielo claro estimada por ESRA, con $T_L = 1.5$.
- $G_{dh} \leq (600 \text{ W/m}^2) \times \alpha_s$, donde α_s es la altura solar en radianes.
- $k_t \leq 1.05$ a escala diezminutal y $k_t \leq 0.85$ a escala horaria.

Este filtrado está basado en la validación local de modelos de separación realizada por Abal et al. 2017, es muy laxo y descarta, por ejemplo para el caso de LE, 1.9% de los datos diezminutales y 0.2% de los datos horarios, como se muestra en la Figura 5.8.

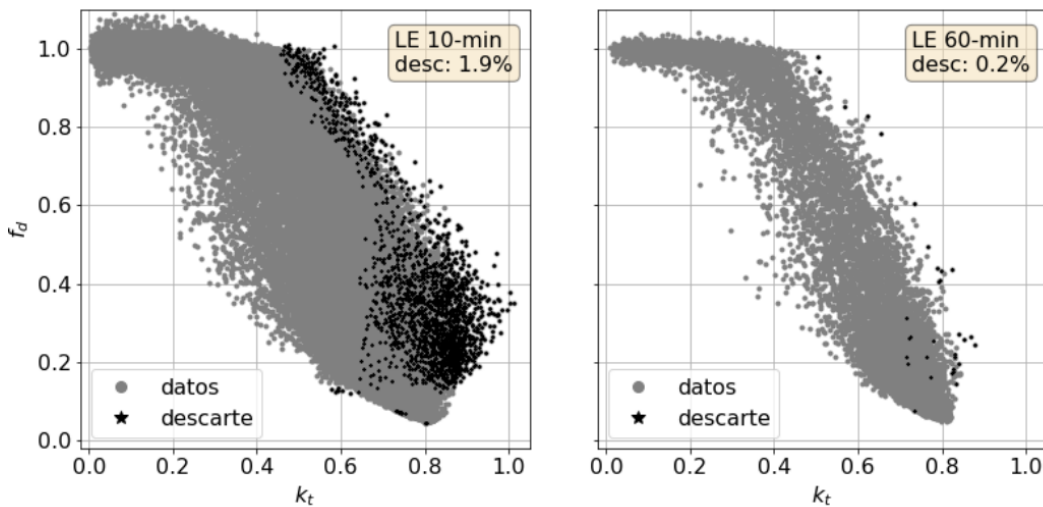


Figura 5.8: Diagrama $f_d - k_t$ a escala diezminutal y horaria para la estación LE, con el resultado del descarte adicional.

Luego se utilizan pares de datos de GHI y DHI para determinar, por medio de una validación cruzada con muestreo aleatorio, los coeficientes que mejor ajustan la fracción difusa de acuerdo a la Ec. (2.30). Se sortea un subconjunto del 80 % de los datos para entrenar el modelo, determinando los coeficientes que mejor ajustan a la nube $f_d - k_t$ por medio de una regresión no-lineal bivariada¹. Con el 20 % restante se testea el ajuste, calculando los indicadores de sesgo y dispersión MBD y RMSD, así como los relativos a la media de la medida de f_d (rMBD y rRMSD). Este procedimiento se repite 1000 veces, obteniéndose una familia de coeficientes e indicadores, que se promedian para determinar el conjunto final de coeficientes, y la incertidumbre estadística asociada al ajuste.

Los resultados de esta validación se presentan, en términos de los indicadores en f_d , en la Tabla C.3 del Apéndice C para todas las estaciones a escala diezminutal y horaria. De esta tabla se extraen y muestran aquí los indicadores de dispersión RMSD y rRMSD para las estaciones tipo I y II a nivel diezminutal (Tabla 5.4).

Modelo	LE		GO		TA	
	RMSD (adim.)	rRMSD (%)	RMSD (adim.)	rRMSD (%)	RMSD (adim.)	rRMSD (%)
RA1	0.11	26.3	0.11	23.1	0.11	20.8
RA2s	0.10	23.4	0.10	21.7	0.10	18.9
RA2	0.10	23.4	0.10	21.6	0.10	18.8
\bar{f}_d	0.42		0.47		0.52	
# datos	99761		41199		56339	

Tabla 5.4: Validación diezminutal en las estaciones tipo I y II de los modelos de separación de Ruiz-Arias. Los resultados del indicador rRMSD son relativos a la media de la medida de f_d

La Tabla C.3 muestra que todos los modelos son esencialmente insesgados en f_d y que los modelos con dos predictores tienen menor dispersión que el RA1. Además los modelos RA2 y RA2s tienen desempeños prácticamente iguales, por lo que el modelo RA2s simplificado es el más conveniente para separar la componente difusa. Esta es la primera validación a nivel diezminutal de modelos de fracción difusa en Uruguay, cuyo precedente es la validación horaria de Abal et al. 2017.

Una vez elegido el modelo de separación a utilizar, resulta informativo pre-

¹Al tratarse de un ajuste no lineal, se debe partir con un conjunto de coeficientes (semilla) que en este caso son los globales calculados en Abal et al. (2017).

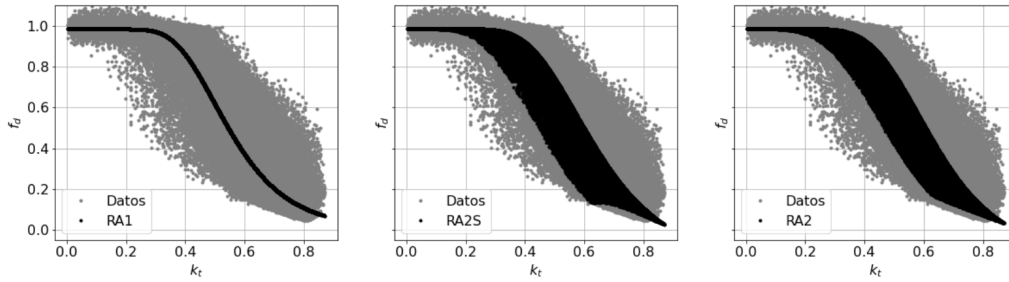


Figura 5.9: Diagrama f_d vs. k_t a nivel diezminutal para la estación LE, con el ajuste dado por los tres modelo de Ruiz-Arias superpuestos. A la izquierda el RA1 de un predictor, a la derecha el RA2 con dos predictores, y al centro el RA2s con dos predictores simplificado.

sentar los indicadores de incertidumbre en términos de las dos variables relevantes, DHI y DNI. Este resultado se muestra en la Tabla C.5 del Apéndice C, a escala diezminutal para la estación LE. Se compararon estos indicadores en tres casos: utilizando los coeficientes originales que aparecen en el trabajo de Ruiz-Arias et al. 2010 (columna “global RA”), utilizando los coeficientes localmente ajustados para la región por Abal et al. 2017 (columna “local GA”) y por último los obtenidos por validación cruzada en este trabajo (columna “local IP”). De esta tabla se observa que estamos frente a un modelo de separación que introduce una incertidumbre del 13% en DNI, que es la componente más importante de la irradiancia, y un leve sesgo de un 2% en dicha componente.

Como complemento, en la Figura 5.9 se muestra el diagrama $f_d - k_t$ diezminutal en LE, con el resultado de superponer la estimación de f_d por las tres variantes del modelo de Ruiz-Arias ajustadas. Esta figura muestra la diferencia al ajustar con sólo un predictor (modelo RA1) respecto a utilizar dos predictores (modelos RA2s y RA2), así como la poca diferencia entre las dos últimas implementaciones. Los coeficientes obtenidos del ajuste, para todas las estaciones y los tres modelos de separación evaluados, a nivel diezminutal, se muestran en la Tabla C.4.

5.4.2. Validación de los modelos de transposición

En la Tabla C.6 se muestra el resultado de la validación de modelos de transposición utilizando DHI estimada por el modelo de separación RA2S, con parámetros localmente ajustados. Para esta validación se utilizó el valor de azimut real calculado a partir de la medida de GTI (Método A) visto en el Capítulo 4. De esta tabla se extraen los indicadores diezminutales de las

estaciones de tipo I y II, a la vez que se generan los indicadores a nivel global a partir de estas tres estaciones, de la misma forma que se hizo en las Tablas 5.2 y 5.3. Los resultados se muestran en la Tabla 5.5.

Con el objetivo de visualizar el impacto de la estimación de DHI en los modelos de transposición, se presentan los indicadores absolutos a nivel diez-minutal de las validaciones con DHI dato y DHI estimada respectivamente, en forma de gráfico de barras en la Figura 5.10. El impacto de la separación en la estimación de GTI se puede cuantificar por medio de la diferencia porcentual

$$\Delta\text{RMSD} = 100 \times (\text{RMSD}_{\text{RA2s}} - \text{RMSD})/\text{RMSD}, \quad (5.2)$$

donde RMSD y $\text{RMSD}_{\text{RA2s}}$ son las incertidumbres de los modelos en las validaciones con DHI dato y DHI estimada respectivamente, en la Tabla 5.6.

En las estaciones GO y TA, (de tipo I con las medidas más confiables), se observan comportamientos muy similares entre sí y dentro de lo esperado: como ser un leve aumento en el sesgo, que favorece al modelo ISO disminuyendo su RMSD, y un aumento en el RMSD de los modelos anisotrópicos. La introducción de un modelo de separación con una incertidumbre (rRMSD) del entorno del 20 % introduce una pequeña incertidumbre adicional en la estimación de GTI, pasando de 3-6 % a un 5-6 % de acuerdo a las Tablas 5.5 y C.1, referido al rRMSD Global. Estas incertidumbres siguen siendo similares a la incertidumbre de las medidas.

Modelo	LE1		LE2		GO		TA		Global	
	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)
ISO	-3.4	-0.6	-1.4	-0.3	-19.3	-3.3	-16.7	-3.3	-12.7	-2.3
HD	6.0	1.0	12.7	2.3	-2.2	-0.4	-8.1	-1.6	-0.3	-0.1
TCK	13.4	2.2	19.0	3.4	1.7	0.3	-0.2	0.0	6.0	1.1
HDKR	6.8	1.1	14.9	2.6	-0.5	-0.1	-5.7	-1.1	1.6	0.3
PER	14.0	2.3	23.6	4.2	6.0	1.0	2.2	0.4	9.2	1.6
	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)
ISO	24.2	4.0	27.5	4.9	36.1	6.2	36.4	7.2	33.0	5.9
HD	21.3	3.6	29.4	5.2	27.7	4.8	28.2	5.6	27.6	4.9
TCK	24.4	4.1	31.7	5.6	26.8	4.6	27.0	5.3	27.7	4.9
HDKR	21.3	3.6	30.1	5.3	27.4	4.7	27.3	5.4	27.3	4.9
PER	23.9	4.0	34.3	6.1	27.0	4.7	26.4	5.2	28.0	5.0
GTI	598.6		565.4		579.3		506.5		562.5	
# datos	14424		29014		38056		51399		132893	

Tabla 5.5: Indicadores para la validación diezminutal de modelos de transposición con difusa estimada por el modelo RA2s, en estaciones tipo I y II.

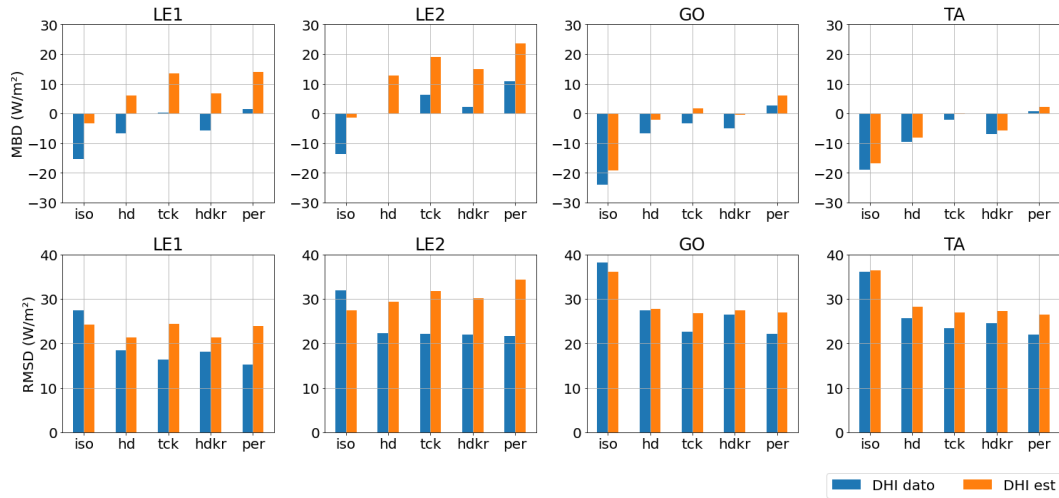


Figura 5.10: Comparación de indicadores para la validación con DHI dato y DHI estimada por modelo de separación.

En todas las estaciones, el modelo ISO es el más resiliente frente al uso de modelos de separación, reduciendo su sesgo y mejorando levemente su desempeño. A su vez, los modelos anisotrópicos aumentan sus incertidumbres, siendo mayor el impacto en los modelos más sofisticados TCK y PER en comparación con los modelos HD y HDKR, quienes muestran ser algo más robustos a la separación. En este sentido es notable la variación de apenas 1.1% de la incertidumbre del modelo HD en GO (Tabla 5.6).

	LE1	LE2	GO	TA	Global
ISO	-12.0	-14.1	-5.5	0.8	-5.2
HD	15.8	31.8	1.1	9.7	11.8
TCK	48.8	42.8	18.1	14.9	24.7
HDKR	17.7	36.8	3.8	11.4	14.6
PER	57.2	58.8	21.6	20.0	32.0

Tabla 5.6: Variación porcentual en el RMSD al validar modelos de transposición con DHI dato y DHI estimada, denominada Δ RMSD.

Respecto a las estaciones LE1 y LE2, de tipo II, se observa en la Tabla 5.6 que la separación impacta mucho más en la incertidumbre de los modelos anisotrópicos de estas estaciones que en las de tipo I. La disminución del RMSD del modelo ISO está asociada a la introducción de un sesgo positivo importante, que se observa en la Figura 5.10, menos notable en TA y GO. El modelo de separación fue ajustado localmente de forma tal que es insesgado, por lo que se esperaría que las variaciones en el sesgo de la transposición no fuesen grandes.

Con el objetivo de entender un poco más este comportamiento anómalo, se realizó un análisis de desempeño utilizando una DNI calculada en su totalidad por clausura para el caso de LE y GO (TA ya tiene su DNI estimada de esta forma). Esta validación se compara con la de DHI dato y su resultado se presenta en el Apéndice C.3. La Figura C.2 muestra que los indicadores para LE1 y LE2 empeoran apreciablemente al usar clausura para estimar DNI, mientras que en GO varían poco o incluso mejoran. Estos resultados podrían explicarse por una posible subestimación de DNI y DHI dato en LE, según se analiza en la Apéndice C.3.

5.5. Discusión

De los resultados presentados en las secciones anteriores podemos inferir, en primera instancia, que los problemas en las medidas analizados en los Capítulos 3 y 4, que derivaron en la clasificación de las estaciones según su grado de confiabilidad, se refleja en los resultados obtenidos en la validación de los modelos de transposición. De esta forma las estaciones tipo III, con medidas menos confiables que las demás, presentaron indicadores que no guardan coherencia con lo reportado en la literatura ni lo esperado (en especial los sesgos positivos del modelo ISO), por lo que sus resultados, reportados en el Apéndice C, no se utilizan para extraer conclusiones.

La Figura 5.2 muestra que el valor de reflectancia constante elegido impacta en el ordenamiento de los modelos de acuerdo a su incertidumbre, y que existe una dependencia de este impacto con la inclinación de la superficie. Se observó también que los modelos HD y HDKR son menos sensibles a variaciones en la reflectancia, mientras que los modelos sofisticados TCK y PER presentan mayor variabilidad y son menos robustos¹.

Una vez definido el valor de reflectancia $\rho_g = 0.2$ para las estaciones RM-CIS, se compararon los indicadores de dispersión al validar los modelos de transposición utilizando el valor nominal de azimut ($\gamma = 0$, es decir, superficies supuestamente mirando al Norte) respecto a usar el valor real estimado en el Capítulo 4. En todas las estaciones (Tablas 5.1 y C.1) los indicadores de

¹De acuerdo a una comunicación personal con el Dr. Christian A. Gueymard, este resultado es novedoso. Esta falta de robustez del modelo PER podría deberse a que dada la complejidad inherente al mismo, pequeñas variaciones en los parámetros de entrada suponen una propagación de incertidumbres mayor que el resto de los modelos.

dispersión porcentuales disminuyen drásticamente al utilizar como entrada el valor de azimut real de la superficie. En particular la Tabla 5.1 demuestra que la disminución porcentual en la incertidumbre de los modelos de transposición vinculada con el desvío azimutal puede llegar a ser importante, en términos relativos, incluso para pequeños desvíos: tal es el caso de LE1, que tiene un azimut de apenas -2° y los modelos PER y TCK disminuyen en un 10 %, aunque hay que tener en cuenta que se trata de rRMSD de por sí muy bajos.

La validación con DHI dato da como resultado, para las estaciones de tipo I y II, sesgos similares a los reportados en la literatura demostrando la subestimación de la irradiancia del modelo ISO y las mejoras aportadas por los modelos anisotrópicos. Por otra parte, la incertidumbre relativa rRMSD de todos los modelos es del orden de la incertidumbre instrumental, variando del 2 % horario para el modelo de mejor desempeño (PER) al 6 % diezminutal del modelo ISO que tiene la mayor incertidumbre. Además en las estaciones de tipo I (GO y TA) la dispersión de los modelos anisotrópicos son prácticamente iguales entre sí, no pudiéndose determinar un modelo superior a los demás. En este sentido, se puede afirmar que los modelos HD y HDKR, debido a su simplicidad de implementación y buenos desempeños, son los recomendados cuando se cuenta con medidas de GHI y DHI (en [Duffie y Beckman, 2013](#) se recomienda en particular el uso del modelo HD).

De la validación para distintas condiciones de cielo según el índice de claridad k_t (Tabla C.2 y Figura 5.6) se observa que todos los modelos se desempeñan de forma similar en condiciones de cielo cubierto, de acuerdo con el hecho de que la distribución de la radiación difusa cuando el Sol no está visible se aproxima a la isotrópica. Luego al pasar a condiciones de cielo mixto o claro el modelo ISO se degrada, la hipótesis isotrópica ya no es válida, y los modelos anisotrópicos mejoran ampliamente su desempeño respecto al ISO. Es importante notar además que, en estas condiciones, los sesgos en GO son prácticamente nulos.

En cielo parcialmente nublado, cuyas características son las más difíciles de modelar, los modelos TCK y PER muestran en general sesgos más bajos que el resto, indicio de que son modelos que representan correctamente las condiciones de cielo mixto, siendo esto esperable dado que son los modelos más sofisticados. En la categoría de cielo claro, la subestimación del modelo ISO es notoria, al no considerar las componentes circumsolar y de brillo del horizonte propias del cielo claro. A su vez, los modelos HD y HDKR presentan

sesgos muy bajos en esta categoría, mostrando que las hipótesis simplificadas que permiten considerar la irradiancia circumsolar (vistas en detalle en el Capítulo 2) son adecuadas y compiten con los modelos más complejos TCK y PER. Es importante tener en cuenta que, de acuerdo a la Tabla C.2 y el histograma de la Figura 5.5, las categorías (NP) y (CD) representan alrededor de un 25 % y 60 % de los datos respectivamente, y que la proporción de datos en cada categoría determina en última instancia el desempeño de cada modelo en todo cielo.

Finalmente, en la categoría (CD) se observa una discrepancia entre los sesgos positivos y altos de los modelos no isotrópicos en LE2, que son mayores a los de TA. Esto podría deberse a un impacto en la estimación de la irradiancia reflejada por superficies circundantes, al estar ambas estaciones inclinadas 45° pero estar rodeadas la primera por cemento y la segunda por pasto.

Respecto al problema de la separación directa-difusa y su impacto en la validación de los modelos de transposición (evaluados mediante la validación B), podemos observar en primera instancia que el uso de este modelo insesgado introduce pequeños sesgos positivos en las estaciones de tipo I, y bastante mayores en las de tipo II (ver Figura 5.10). Teniendo en cuenta que el modelo de separación es insesgado, los resultados obtenidos en las estaciones tipo I son confiables y están dentro de lo esperado. Este aumento en el sesgo resulta en una menor incertidumbre en términos del RMSD en el modelo ISO.

La variación relativa del RMSD, ΔRMSD , mostrada en la Tabla 5.6, sirve para cuantificar el impacto en la incertidumbre de los modelos al usar DHI estimada por el modelo de separación. Entre los modelos anisotrópicos, los modelos HD y HDKR son más resilientes a la introducción de un modelo de separación que sus contrapartes TCK y PER. Este resultado se da en todas las estaciones y se refleja en el indicador global, volviendo a poner de manifiesto el buen desempeño del modelo HD en relación a su simplicidad. Por otra parte, hay una relación muy clara entre la calidad de los datos y el impacto de la separación, dado que el impacto de la separación es mayor en las estaciones tipo II que en las tipo I.

Es importante destacar que en todos los casos, las incertidumbres relativas al introducir el modelo de separación siguen siendo del orden de la incertidumbre instrumental (esto incluye los resultados de LE1 y LE2).

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se relevaron datos de irradiancia solar provenientes de cinco estaciones, cuatro de las cuales forman parte de la [RMCIS](#) y una estación testigo (GO, en Golden Colorado, perteneciente a [NREL](#)). Se validan cinco modelos de transposición de uso corriente en la literatura, comparando su desempeño al usar diferentes datos de entrada. Este estudio tiene, a nivel local, un solo antecedente ([Piccioli et al. 2018](#)) donde se trabaja solamente con datos de LE; es el primer trabajo detallado en Uruguay de modelos de transposición y el impacto sobre su desempeño al agregar un modelo de separación para estimar DHI.

La información de partida consta de varios años de medidas minutas de GHI, DHI y GTI en todas las estaciones, y DNI en LE y GO. Estos datos minutas pasaron por un exhaustivo control de calidad a través de una inspección visual de datos, y un filtrado automático, para generar datos integrados a escala horaria y diezminutal. Las estaciones presentaron distintos niveles de calidad de datos, lo que ameritó una discriminación en tres categorías. Los resultados por estación obtenidos a posteriori mostraron estrecha dependencia con esta distinción en categorías: las estaciones tipo I y II tienen sesgos e incertidumbre acordes a lo visto en la literatura, mientras que en las tipo III el modelo ISO presentó sesgos positivos y RMSD extremadamente altos en total discrepancia con lo esperado, y por ello no se las consideró para extraer conclusiones.

Durante el control de calidad de datos se encontró que el azimut de los captadores inclinados de algunas estaciones difería respecto al valor nominal, en dirección Norte. Para atacar este problema se desarrolló un método novedoso de detección de azimuts (método A en el [Capítulo 4](#)), que se validó contra

datos de GTI de azimut conocido. En paralelo se implementó una variante de otro método conocido (método B) y se compararon fortalezas y debilidades de ambos métodos. El método A da una estimación de su incertidumbre, es capaz de detectar cambios en el azimut a lo largo del tiempo, requiere a priori sólo datos de GTI de alta resolución (minutal por lo menos) y no depende de un modelo de transposición en particular. Por esto fue utilizado para determinar el azimut real de las superficies. La incertidumbre de este método crece rápidamente con el valor del azimut, por lo que no es recomendable su uso para desvíos mayores a 60° . Ambos métodos son complementarios, y su empleo es esencial ya que mejoran significativamente los indicadores de incertidumbre de todos los modelos de transposición evaluados. Resultados parciales de este trabajo han sido publicados en [Piccioli et al. 2021](#).

Se analizó el desempeño de los modelos de transposición para un rango de ρ_g en la región de interés (entre 0.1 y 0.5) y se estudió la sensibilidad de los indicadores a la suposición sobre el terreno circundante. Se observó que los modelos HD y HDKR son los más robustos a estas variaciones en ρ_g , que los modelos TCK y PER son más sensibles, y que asumir reflectancias altas favorece al modelo ISO. Estos resultados son novedosos y hay pocos trabajos previos al respecto. También se observó que la sensibilidad de los modelos a la variación de ρ_g aumenta con la inclinación. Las curvas que relacionan el rMBD y el rRMSD con la reflectancia aplican directamente a la sensibilidad al albedo de la generación fotovoltaica, de acuerdo a resultados recientemente publicados ([Tuomiranta et al. 2021](#)). A falta de medidas locales de albedo, en este trabajo se utilizó un valor constante de $\rho_g = 0.2$ para todas las estaciones de la RMCIS.

Luego se realizó en primera instancia una validación de los cinco modelos de transposición a partir de medidas de GHI y DHI (y DNI en caso de contar con la medida o su valor calculado por la ecuación de clausura). Se obtuvieron indicadores para las estaciones tipo I y II similares a los encontrados en la literatura, con un modelo ISO que subestima la GTI y mayor RMSD que los demás modelos, y mejoras en los indicadores de los modelos anisotrópicos. El modelo PER se desempeña levemente mejor que el resto, pero los rRMSD porcentuales son muy bajos y comparables con la incertidumbre instrumental, por lo que no es posible decidir un mejor modelo entre los anisotrópicos, aunque se recomienda el uso del modelo HD debido a su buen desempeño y simplicidad de uso, acorde a lo encontrado en la literatura. Es importante destacar que en

este punto, se probó que el empleo del método de detección de azimut es clave para la correcta validación de los modelos, ya que al usar el azimut real los indicadores disminuyeron notoriamente, incluso un 10% en los RMSD para azimuts tan pequeños como 2° , como es el caso de LE1.

Esta primera validación se complementó con una validación de modelos según condición de cielo, separando en tres categorías de índice de claridad, k_t . La misma reveló la naturaleza de los modelos, en el entendido que para k_t bajo (condiciones de cielo cubierto) todos los modelos se desempeñan prácticamente igual, para condiciones intermedias los modelos sofisticados TCK y PER son mejores, y para k_t alto (cielo despejado) los modelos HD y HDKR tienen un muy buen desempeño.

Previo a la validación de los modelos de transposición a partir de GHI dato y DHI estimada por un modelo de separación, se ajustaron localmente y validaron tres modelos de separación. De estos modelos se eligió el RA2S con dos predictores (k_t y masa de aire) para determinar la DHI, debido a simplicidad de uso y buen desempeño. Este modelo presenta una incertidumbre del orden de 20% en f_d y un 13% en DNI a nivel diezminutal, es esencialmente insesgado en DHI y tiene un leve sesgo positivo en DNI del orden de 3% diezminutal.

Se estudió finalmente el impacto en la incertidumbre de GTI al introducir este modelo de separación para determinar la DHI. Se observó un aumento en los sesgos en la estimación de GTI en todas las estaciones, posiblemente debido al sesgo positivo en DNI del modelo de separación mencionado antes. Este aumento en el sesgo favorece al modelo ISO, disminuyendo su RMSD en un 5% global y hasta un 14% global, pero aumenta en todos los casos la incertidumbre de los modelos anisotrópicos. Los modelos HD y HDKR son más resilientes a la introducción del modelo de separación, aumentando su RMSD un 12% y 15% global, y con aumentos tan pequeños como 1% y 4% en GO respectivamente, de acuerdo a la Tabla 5.6. Los modelos más complejos (TCK y PER) muestran un deterioro importante en la estimación, en especial el modelo PER que aumenta su incertidumbre en un 32% global. Hay indicios de que la complejidad inherente al modelo hace que al introducir pequeñas variaciones en los datos de entrada las incertidumbres se amplifiquen; este aspecto es de interés y amerita estudiarse con más detalle.

De lo visto anteriormente podemos concluir que, partiendo de datos de GHI y DHI de buena calidad y medida de reflectancia, los modelos anisotrópicos

complejos TCK y PER estiman GTI con baja incertidumbre y de forma casi insesgada. Si no se cuenta con medida de reflectancia, la suposición de ρ_g constante es un factor de incertidumbre a tener en cuenta, y en este sentido se recomienda usar un modelo resiliente al error en la suposición y sencillo como el HD. Si además deseamos estimar GTI a partir solamente del dato de GHI usando un modelo de separación para estimar la componente difusa, los modelos TCK y PER ya no resultan competitivos frente a modelos más resilientes como el HD y HDKR por lo que el uso del modelo sencillo HD es el recomendado. Es importante observar que las incertidumbres porcentuales son del orden del error instrumental, siendo muy difícil establecer un ranking claro de modelos, además de que estos indicadores son muy sensibles a la calidad de los datos de entrada.

Como trabajo a futuro, se destaca el método A de detección de azimut, que es trabajo en proceso. En este sentido es necesario realizar una campaña de medidas de GTI, controladas y de buena calidad, con azimut variable conocido que abarque valores intermedios, para estimar la variación de la incertidumbre en función del azimut. Además es importante comparar el desempeño del método ante la aplicación de otro modelo de cielo claro más preciso que el ESRA (Rigollier et al. 2000), que es semi-empírico, como ser el modelo McClear (Lefèvre et al. 2013) que incluye información atmosférica trihoraria. Finalmente, este método puede ser usado en forma sistemática con fines de control de calidad de series de GTI, ya que la problemática de la desalineación de planos inclinados y el azimut desconocido es frecuente especialmente en medidas de campo.

Es importante realizar también una campaña de al menos un año de medidas de reflectancia en las estaciones de la RMCIS que permita contar con información de albedo más confiable en cada una de las estaciones. Esta medida no tiene por qué ser continua, como ya se vio, sino que alcanza con medidas que permitan reconocer posibles variaciones estacionales.

Bibliografía

- Abal, G., Aicardi, D., Alonso Suárez, R. y Laguarda, A. (2017). Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay. *Solar Energy*, 141, 166-181. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.030>
- Abal, G., Alonso-Suárez, R., Aicardi, D., Dovat, L. y Laguarda, A. (2015). *Red de Medida Continua de Irradiancia Solar* (inf. téc.). Laboratorio de Energía Solar, LES/UdelaR. http://les.edu.uy/report/2015_informe_RMCIS.pdf
- Abal, G., Alonso-Suárez, R. y Laguarda, A. (2020). Radiación Solar: Notas del curso Fundamentos del Recurso Solar.
- Alonso-Suárez, R. (2017). *Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales* (Tesis doctoral). Universidad de la República. http://les.edu.uy/tesis/PhD_ralonsosuares.pdf
- Andreas, A. y Stoffel, T. (1981). NREL Solar Radiation Research Laboratory (SRRL): Baseline Measurement System (BMS); Golden, Colorado (Data). <https://doi.org/10.7799/1052221>
- Badosa, J., Wood, J., Blanc, P., Long, C. N., Vuilleumier, L., Demengel, D. y Haeffelin, M. (2014). Solar irradiances measured using SPN1 radiometers: uncertainties and clues for development. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(12), 4267-4283. <https://doi.org/10.5194/amt-7-4267-2014>
- Barbier, T., Blanc, P. y Saint-Drenan, Y.-M. (2019). Software correction of angular misalignments of tilted reference solar cells using clear-sky satellite open data. *EU PVSEC 2019*. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-02291410>
- David, M., Lauret, P. y Boland, J. (2013). Evaluating tilted plane models for solar radiation using comprehensive testing procedures, at a southern hemisphere location. *Renewable Energy*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.074>

- Delta-T Devices Ltd. (2019). User Manual for the Sunshine Pyranometer type SPN1.
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- Espinar, B., Ramírez, L., Drews, A., Beyer, H. G., Zarzalejo, L. F., Polo, J. y Martín, L. (2009). Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and German radiometric stations. *Solar Energy*, 83(1), 118-125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.07.009>
- F. Holmgren, W., W. Hansen, C. y A. Mikofski, M. (2018). pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*. <https://doi.org/10.21105/joss.00884>
- Gueymard, C. (2008). From global horizontal to global tilted irradiance: How accurate are solar energy engineering predictions in practice? *Solar 2008 Conf., San Diego, CA*.
- Gueymard, C. A. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71(5), 325-346. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00054-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00054-8)
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.117>
- Gueymard, C. A. y Ruiz-Arias, J. A. (2016). Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance. *Solar Energy*, 128, 1-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.010>
Special issue: Progress in Solar Energy
- Hay, J. E. y Davies, J. A. (1980). Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface. En J. Hay y T. Won (Eds.), *First Canadian Solar Radiation Data Workshop* (pp. 59-72). Atmospheric Environment Service.
- Hay, J. E. y McKay, D. C. (1985). Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces: A Review and Assessment of Methodologies. *International Journal of Solar Energy*, 3(4-5), 203-240. <https://doi.org/10.1080/01425918508914395>

- Holmgren, W. F., Hansen, C. W. y Mikofski, M. A. (2018). pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, 3(29), 884. <https://doi.org/10.21105/joss.00884>
- IEA. (2021). *Solar PV*, IEA (inf. téc.). Paris. www.iea.org/reports/solar-pv
- Ineichen, P., Guisan, O. y Perez, R. (1990). Ground-reflected radiation and albedo. *Solar Energy*, 44(4), 207-214. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90149-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90149-7)
- Iqbal, M. (1983). An Introduction to Solar Radiation. En M. Iqbal (Ed.), *An Introduction to Solar Radiation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.50002-1>
- ISO. (1992). Solar energy — Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. *ISO 9847:1992*. <https://www.iso.org/standard/17725.html>
- ISO. (2018). Solar energy — Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. *ISO:9060:2018*.
- Iturbide, P., Stern, V., Righini, R. y Aristegui, R. (2020). Evaluación del albedo en la estación solarimétrica de Luján, suelo característico de la pampa húmeda. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 24, 24*, 222-231. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/138479>
- Kasten, F. (1996). The linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar Energy*, 56(3), 239-244. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00114-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00114-7)
- Kasten, F. y Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl. Opt.*, 28(22), 4735-4738. <https://doi.org/10.1364/AO.28.004735>
- Klucher, T. M. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23(2), 111-114. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90110-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90110-5)
- Kondratyev, K. J. y Manolova, M. P. (1960). The radiation balance of slopes. *Solar Energy*. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90041-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90041-4)
- Kopp, G. y Lean, J. L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

- Laguarda, A. y Abal, G. (2016). Índice de turbidez de Linke a partir de irradiación solar global en el Uruguay. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 20*, pp 11.35-11.46, 35-46.
- Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J. W. y Morcrette, J.-J. (2013). McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(9), 2403-2418. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013>
- Liou, K.-N. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation* (2nd). Academic Press.
- Liu, B. Y. H. y Jordan, R. C. (1961). Daily insolation on surfaces tilted towards equator. *ASHRAE J.*, 10, 53-59. <https://www.osti.gov/biblio/5047843>
- Liu, B. Y. H. y Jordan, R. C. (1963). The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: With design data for the U.S., its outlying possessions and Canada. *Solar Energy*, 7(2), 53-74. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(63\)90006-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(63)90006-9)
- Long, C. N. y Dutton, E. G. (2010). BSRN Global Network recommended QC tests, V2. x.
- Lynas, M., Houlton, B. Z. y Perry, S. (2021). Greater than 99 % consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature. *Environmental Research Letters*, 16(11), 114005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2966>
- McArthur, L. J. B. y Hay, J. E. (1981). A Technique for Mapping the Distribution of Diffuse Solar Radiation over the Sky Hemisphere. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 20(4), 421-429. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1981\)020<0421:ATFMTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<0421:ATFMTD>2.0.CO;2)
- Perez, R., Stewart, R., Arbogast, C., Seals, R. y Scott, J. (1986). An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation. *Solar Energy*, 36(6), 481-497. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90013-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90013-7)
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J. y Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271-289. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)

- Perez, R. y Perez, M. (2009). A fundamental look at energy reserves for the planet. *50*.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R. y Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, *39*(3), 221-231. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80031-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80031-2)
- Perez-Astudillo, D., Bachour, D. y Martin-Pomares, L. (2018). Improved quality control protocols on solar radiation measurements. *Solar Energy*, *169*, 425-433. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.028>
- Piccioli, I., Abal, G. y David, M. (2021). Surface azimuth estimation from solar irradiance on tilted surfaces. En International Solar Energy Society (Ed.), *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2021*. International Solar Energy Society. <https://doi.org/10.18086/swc.2021.39.02>
- Piccioli, I., Laguarda, A. y Abal, G. (2018). Transporte de irradiación global horizontal a una superficie inclinada: efecto de la separación directa-difusa. *XVI Congreso Ibérico y XII Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, 785-792. <https://agenda.uib.es/15227/files/xvi-congreso-iberico-y-xii-congreso-iberoamericano-de-energia-solar.html>
- Reindl, D. T., Beckman, W. A. y Duffie, J. A. (1990). Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, *45*(1), 9-17. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90061-G](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90061-G)
- Remund, J., Wald, L., Lefèvre, M., Ranchin, T. y Page, J. H. (2003). Worldwide Linke turbidity information. *ISES Solar World Congress 2003, CD-ROM*, 13 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00465791>
- Reno, M. J. y Hansen, C. W. (2016). Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.031>
- Rigollier, C., Bauer, O. y 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. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00055-9)
- Ruiz-Arias, J. A., Alsamamra, H., Tovar-Pescador, J. y Pozo-Vázquez, D. (2010). Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. *Energy Conversion and Management*,

- 51(5), 881-893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.024>
- Spencer, J. (1971). Fourier Series Representation of the Position of the Sun. *Search*, 2(5), 162-172. <http://www.mail-archive.com/sundial@uni-koeln.de/msg01050.html>
- Temps, R. y Coulson, K. (1977). Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, 19(2), 179-184. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90056-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90056-1)
- Tuomiranta, A., Alet, P.-J., Ballif, C. y Ghedira, H. (2021). Worldwide performance evaluation of ground surface reflectance models. *Solar Energy*, 224, 1063-1078. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.023>
- Vignola, F., Grover, C., Lemon, N. y McMahan, A. (2012). Building a bankable solar radiation dataset. *Solar Energy*, 86, 2218-2229. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.013>
- Vitale, G., Bove, I., Pereyra, J. y Abal, G. (2019). Global solar transmittance of vertical glazings oriented towards the Equator. *Proceedings of the ISES Solar World Congress, Santiago de Chile, Chile*.
- Yang, D. (2016). Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks. *Solar Energy*, 136, 288-302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.062>
- Yang, D. (2022). Estimating 1-min beam and diffuse irradiance from the global irradiance: A review and an extensive worldwide comparison of latest separation models at 126 stations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112195>
- Young, A. T. (1994). Air mass and refraction. *Applied optics*, 33(6), 1108-1110. <https://doi.org/10.1364/AO.33.001108>

Glosario

altura solar Ángulo complementario del cenital. Es el formado por la línea Tierra-Sol y el horizonte del observador.

azimut de la superficie Ángulo formado por la proyección de la normal de un captador inclinado sobre el plano horizontal, y la dirección Norte-Sur. Es negativo en el cuadrante Noreste, positivo en el Noroeste y nulo si la superficie mira hacia el ecuador (es decir, hacia el Norte para un observador en el H.S.). Es importante no confundir este ángulo con el azimut solar γ_s .

azimut solar Ángulo formado por la proyección de la línea Tierra-Sol sobre el plano horizontal y la dirección Norte del observador (si éste se encuentra en el Hemisferio Sur). Aumenta a medida que el Sol se mueve de Este a Oeste; es negativo a la mañana y positivo a la tarde.

constante solar Promedio de irradiancia solar a una distancia del Sol igual al radio promedio de la órbita terrestre.

declinación solar Ángulo formado por el plano ecuatorial y la línea Tierra-Sol. Está comprendido entre -23.44° y $+23.44^\circ$ debido a la inclinación del eje polar respecto al plano de la eclíptica, es mínimo en el verano austral, máximo en el invierno, y vale exactamente cero en los equinoccios.

factor orbital Factor de corrección dado por la razón entre el valor diario de la distancia Tierra-Sol y el radio medio de la órbita terrestre.

fracción difusa Razón entre la irradiancia difusa horizontal (DHI) y la irradiancia global horizontal (GHI).

irradiancia difusa horizontal Irradiancia que incide sobre un plano horizontal a nivel de la superficie terrestre, proveniente de la bóveda celeste producto de la dispersión de la radiación con la atmósfera.

irradiancia difusa normalizada Razón entre la irradiancia difusa horizontal (DHI) y la irradiancia horizontal en el tope de la atmósfera.

irradiancia directa normal Irradiancia que incide de forma directa desde el disco solar sobre el plano perpendicular a la línea Tierra-Sol, a nivel de la superficie terrestre.

irradiancia global horizontal Irradiancia solar que incide sobre un plano horizontal a nivel de la superficie terrestre.

irradiancia global sobre un plano inclinado Irradiancia solar directa y difusa incidente sobre un plano inclinado en la superficie terrestre.

irradiancia solar Potencia radiante incidente desde el Sol por unidad de área receptora. Se mide en W/m^2 .

masa de aire Razón entre el camino óptico de un haz de luz a través de un medio de cierta densidad, y su equivalente para el recorrido de un haz vertical.

radiancia potencia radiante, integrada sobre todas las longitudes de onda, por unidad de área normal a la dirección de la radiación, por unidad de ángulo sólido, medida en $Wm^{-2}sr^{-1}$.

razón directa Cociente entre el ángulo de incidencia y el cenital.

reflectancia También conocido como albedo, es la razón entre la irradiancia reflejada por una cierta superficie y irradiancia global incidente sobre la misma.

transmitancia directa Razón entre la irradiancia directa horizontal (BHI) y la irradiancia horizontal en el tope de la atmósfera.

turbidez de Linke Número de atmósferas secas y limpias (atmósfera de Rayleigh) que produciría los mismos efectos de atenuación y dispersión observados en la atmósfera real en ausencia de nubes.

ángulo cenital Ángulo formado por la línea Tierra-Sol con la vertical local (cenit local) del observador. Vale 90° en la salida y puesta del Sol.

ángulo de incidencia Ángulo formado por la línea Tierra-Sol y la normal a una superficie inclinada. Varía entre 0° y 360° , y es mayor a 90° si el Sol se encuentra detrás de la misma

ángulo horario Ángulo formado entre el meridiano del observador y el meridiano solar, definido sobre el plano ecuatorial. Es nulo al mediodía solar (cuando el Sol se encuentra en su punto más alto), negativo a la mañana y positivo a la tarde, variando a una tasa constante de $\frac{\pi}{12} rad/h = 15^\circ/h$.

índice de claridad Razón entre la irradiancia global horizontal (GHI) y la irradiancia horizontal en el tope de la atmósfera.

APÉNDICES

Apéndice A

Generalidades

En este Apéndice se presentan algunos cálculos para la determinación de ángulos solares que aparecen en el Capítulo 2 y que describen la posición aparente del Sol en la bóveda celeste. Se introduce el problema de la interacción entre la radiación y la atmósfera, que da lugar a la atenuación del haz de irradiancia directa y la existencia de la irradiancia difusa, componentes de la radiación en la superficie terrestre. Además se introduce el concepto clave de masa de aire, y se presenta un modelo de cielo claro de uso frecuente a lo largo de esta tesis.

A.1. Determinación del ángulo horario

A.1.1. Factor orbital

El [factor orbital](#) se calcula a partir del día del año, de acuerdo a la siguiente expresión en series de Fourier ([Spencer, 1971](#))

$$F_n = \left(\frac{r_o}{r}\right)^2 \approx 1.000110 + 0.001280 \sin(\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma) + 0.034221 \cos(\Gamma) + 0.000719 \cos(2\Gamma), \quad (\text{A.1})$$

donde $\Gamma = 2\pi(n - 1)/365$ se conoce como ángulo diario, y n es el ordinal-día¹. Esta expresión presenta un error máximo de 0.0001.

¹ $n = 1, \dots, 365$ o 366 en caso de que se trate de un año bisiesto.

La [declinación solar](#) se calcula también a partir del ángulo diario y el ordinal-día, y su expresión aproximada en series de Fourier es

$$\begin{aligned} \delta \approx & 0.006918 + 0.070257 \sin(\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma) + 0.001480 \sin(3\Gamma) + \\ & - 0.399912 \cos(\Gamma) - 0.006758 \cos(2\Gamma) - 0.002697 \cos(3\Gamma). \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

donde δ está en radianes. Esta expresión tiene un error asociado menor a 6×10^{-4} rad, o $3'$ de arco.

A.1.2. Ángulo horario

El [ángulo horario](#), ω , se determina a partir de la hora local del observador y su ubicación geográfica. Para ello debemos definir el tiempo solar, el tiempo local y cómo se relacionan entre ellos.

Se define el día solar como el tiempo que emplea el Sol en completar un ciclo alrededor de un observador estacionario en la Tierra. Este tiempo no es necesariamente igual a 24h: la variabilidad de la declinación, así como la variación de la velocidad orbital de la Tierra (debido a la 3ra Ley de Kepler), inducen una discrepancia entre el Tiempo Solar Aparente T_S , definido a partir del día solar, y el Tiempo Solar Medio T_0 , que define un día de 24hs de duración.

La diferencia entre T_S y T_0 recibe el nombre de *Ecuación del Tiempo*, E_T , está tabulada en almanaques náuticos y supone una corrección que oscila entre ± 16 minutos. Puede pensarse a E_T como la diferencia en minutos entre la medida de un reloj de sol y uno de agujas corriente.

La expresión en minutos para E_T utilizada en esta tesis está dada por [Spencer, 1971](#) en forma de serie de Fourier en función del ángulo diario:

$$\begin{aligned} E_T = T_S - T_0 \approx & 229.18 \text{min} \times [0.000075 + 0.001868 \cos(\Gamma) - 0.032077 \sin(\Gamma) \\ & - 0.014615 \cos(2\Gamma) - 0.04089 \sin(2\Gamma)]. \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Esta aproximación tiene una precisión de 35 segundos.

Por otro lado, es usual contar con datos cuya etiqueta temporal está expresada en Tiempo Estándar o Tiempo UTC. T_{UTC} se da respecto al Meridiano

de Greenwich, que es UTC-0; los sitios al oeste de UTC-0 se nombran como UTC-1, UTC-2, UTC-3 y al este como UTC+1, UTC+2, UTC+3. Cada huso horario tiene a su vez asociado un meridiano UTC, L_{UTC} : -15° , -30° , -45° , etc. para los sitios al oeste de Greenwich UTC-1, UTC-2, UTC-3, etc. respectivamente, y con signo positivo para los sitios al este de Greenwich. De esta forma, Uruguay, por ejemplo, al estar ubicado en el huso UTC-3 le corresponde $L_{UTC} = -45^\circ$.

La discrepancia entre el tiempo estándar T_{UTC} y el tiempo solar medio T_0 depende de la longitud (meridiano) del observador, L_0 , y se expresa como

$$T_0 = T_{UTC} + \frac{1}{15}(L_0 - L_{UTC}) \quad (\text{A.4})$$

donde los tiempos se expresan en horas y fracción.

El tiempo solar aparente T_S se puede expresar en función del T_{UTC} (que es en general el formato de la etiqueta temporal de los datos de entrada) sustituyendo la Ec. (A.4) en la Ec. (A.3), y recordando que E_T está expresada en minutos, de donde

$$T_S = T_{UTC} + \frac{L_0 - L_{UTC}}{15} + \frac{E_T}{60}, \quad (\text{A.5})$$

donde los tiempos se expresan en horas y fracción.

De acuerdo a su definición, es evidente entonces la relación entre ω y el tiempo solar T_S definido anteriormente:

$$\omega = \frac{\pi}{12}(T_S - 12), \quad (\text{A.6})$$

por lo que conociendo la hora local, el día del año y el meridiano del observador, se determina T_S por medio de la Ec. (A.5) y luego ω .

A.2. Interacción entre la radiación y la atmósfera

La atmósfera terrestre es, un medio no homogéneo mayoritariamente gaseoso con presencia de partículas sólidas en suspensión (aerosoles), así como con nubes (concentraciones de agua en forma de vapor o pequeñas gotas en suspensión). Suele realizarse una separación conceptual de la atmósfera en tres grupos de componentes (Iqbal, 1983), que interactúan de forma diferenciada

con la radiación solar atenuando su energía:

- Una atmósfera gaseosa sin vapor de agua ni nubes o aerosoles, compuesta en un 99.97% de Nitrógeno molecular (N_2), Oxígeno molecular (O_2), Argón atómico (Ar) y Dióxido de Carbono (CO_2), más otros compuestos minoritarios (Neón, Helio, Metano, etc.). Esta idealización recibe el nombre de *atmósfera estándar seca y limpia* o *atmósfera de Rayleigh*, y existen varios modelos estáticos que describen las proporciones de los compuestos en la atmósfera estándar (Abal et al. 2020).
- Atmósfera limpia y húmeda, con vapor de agua en forma de nubes y microgotas en suspensión, las que determinan la *cantidad de agua precipitable en la atmósfera*, w , definida como la altura en cm que alcanzaría el agua presente en una columna vertical si estuviera en estado líquido, en condiciones estándar¹.
- Atmósfera que incluye aerosoles provenientes de fuentes tanto antropogénicas como naturales: partículas de polvo y suciedad, sales en suspensión, actividad volcánica, tormentas de arena, actividades industriales, etc.

Procesos de dispersión y absorción

La irradiancia incidente en TOA experimenta, al atravesar la atmósfera, esencialmente dos procesos: absorción y dispersión (o scattering).

La absorción produce una atenuación espectralmente selectiva del haz incidente, producida mayoritariamente por moléculas de Ozono (O_3), O_2 , CO_2 , vapor de agua y en menor medida, aerosoles (Abal et al. 2020). En la Figura A.1 se muestran los espectros de irradiancia solar tanto en TOA (conocido como AM0) como en la superficie terrestre en incidencia normal, basado en el modelo SMARTS (C. A. Gueymard, 2001). Además se superpuso el resultado de aplicar la Ley de Planck para un cuerpo negro a 5777 K (Iqbal, 1983). En esta figura se observan claramente las bandas de absorción de los diferentes gases atmosféricos. En estas regiones del espectro la absorción puede ser total.

La dispersión o scattering se produce por interacción elástica de la radiación con las moléculas de aire, vapor de agua y aerosoles en suspensión. La

¹Pequeñas gotas de agua pueden coexistir también con aerosoles en suspensión, dando lugar a fenómenos ópticos más complejos (Iqbal, 1983).

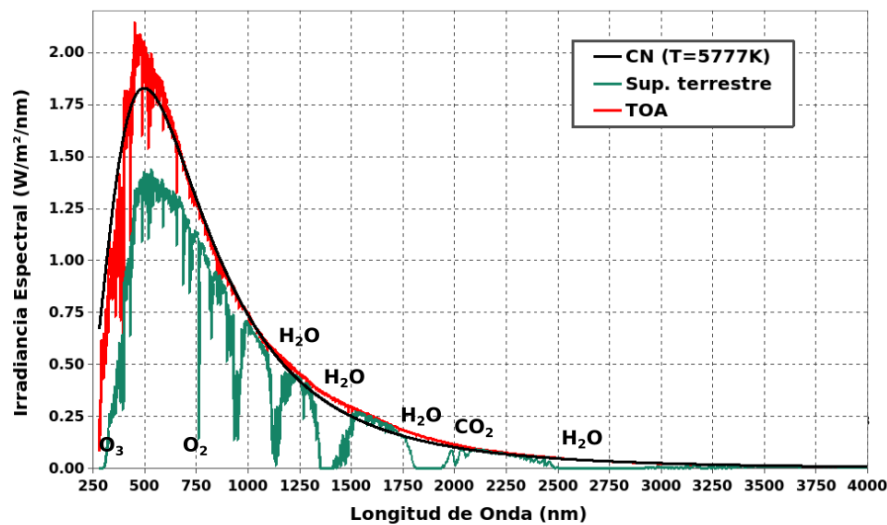


Figura A.1: Espectro de irradiancia fuera de la atmósfera, a nivel terrestre en incidencia normal, y de un cuerpo negro irradiando a la temperatura media del Sol a distancia de 1UA. Figura de elaboración propia en base a datos de libre acceso de NREL (<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/smarts.html> y <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-wehrli.html>).

probabilidad de dispersión (sección eficaz) y distribución angular de la radiación dispersada se obtienen resolviendo la ecuación de ondas electromagnéticas bajo ciertas simplificaciones.

El parámetro que determina el tipo de dispersión es $\xi = d/\lambda$, donde d es el tamaño característico del centro dispersor y λ la longitud de onda característica de la radiación incidente. En el caso de la interacción con moléculas de aire (mayoritariamente O₂ y N₂), se cumple $\xi \ll 1$, el problema de la ecuación de ondas es sencillo y la dispersión recibe el nombre de *dispersión de Rayleigh*. En este caso la probabilidad de dispersión es proporcional a $1/\lambda^4$ (Iqbal, 1983), y por tanto los fotones azules son más dispersados que los rojos¹.

Partículas de mayor tamaño, para las que ξ es del orden de la unidad, producen dispersión que se modela por medio del *scattering de Mie*. Los aerosoles y el vapor de agua en suspensión en la atmósfera son centros dispersores que caen dentro de esta categoría, y la descripción de Mie es la apropiada (Iqbal, 1983).

En la Figura A.2 se muestra una representación de las distribuciones angulares características de la dispersión de Rayleigh y Mie; en la misma se observa

¹Esto explica el color azul del cielo sin nubes, y también los rojos (menos dispersados) que predominan en el haz directo durante las salidas o puestas de Sol.

que el scattering de Rayleigh es idéntico en su propagación hacia adelante y atrás, mientras que el de Mie implica una dispersión hacia adelante mucho mayor que hacia atrás (“forward scattering”), siendo este efecto más pronunciado cuanto mayor es el diámetro del centro dispersor. Estos procesos de dispersión diferenciados son importantes a los efectos de representar la distribución angular de la radiación difusa proveniente de la bóveda celeste, tanto en condiciones de cielo claro como de cielo cubierto.

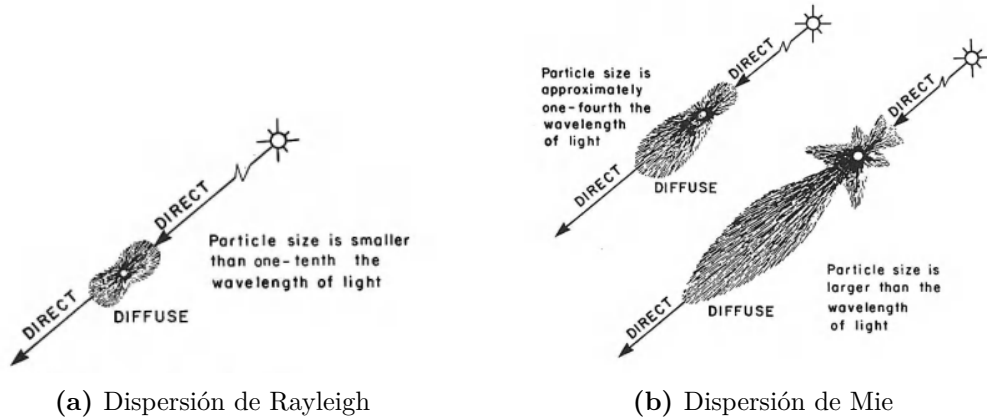


Figura A.2: Distribución angular de la dispersión de Rayleigh y la dispersión de Mie. Tomado de [Iqbal, 1983](#).

A.2.1. Masa de aire

La atenuación de un haz de luz monocromática debido a su interacción con la atmósfera está relacionada con el recorrido del haz a través del medio. Se define entonces la *masa de aire relativa* (o simplemente masa de aire), m , como la razón entre el recorrido de un haz de luz a través de un medio de densidad ρ y su equivalente para el recorrido de un haz vertical:

$$m = \frac{\int \rho ds}{\int \rho dz}, \quad (\text{A.7})$$

donde la integración va desde TOA a la superficie terrestre. s es el camino del haz recorrido desde el tope de la atmósfera hasta la superficie donde incide (que podría encontrarse a cierta altura), mientras que z representa el camino vertical.

La Figura [A.3](#) muestra dos representaciones de la atmósfera terrestre: una geometría simplificada en la cual la atmósfera es homogénea y se desprecia

la curvatura de la tierra y los efectos de la refracción. La segunda es una representación más realista, donde se tiene en cuenta la curvatura de la tierra, refracción y atmósfera no homogénea. En el primer caso, bajo la suposición de que $\rho = \text{cte}$, la Ec. (A.7) queda

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}, \quad (\text{A.8})$$

expresión que tiene un error asociado que aumenta con el ángulo cenital, siendo del 0.25 % para $\theta_z = 60^\circ$ y llegando al 10 % para $\theta_z = 80^\circ$. Esta expresión además diverge para $\theta_z = 90^\circ$, lo que la hace poco adecuada en condiciones de sol bajo.

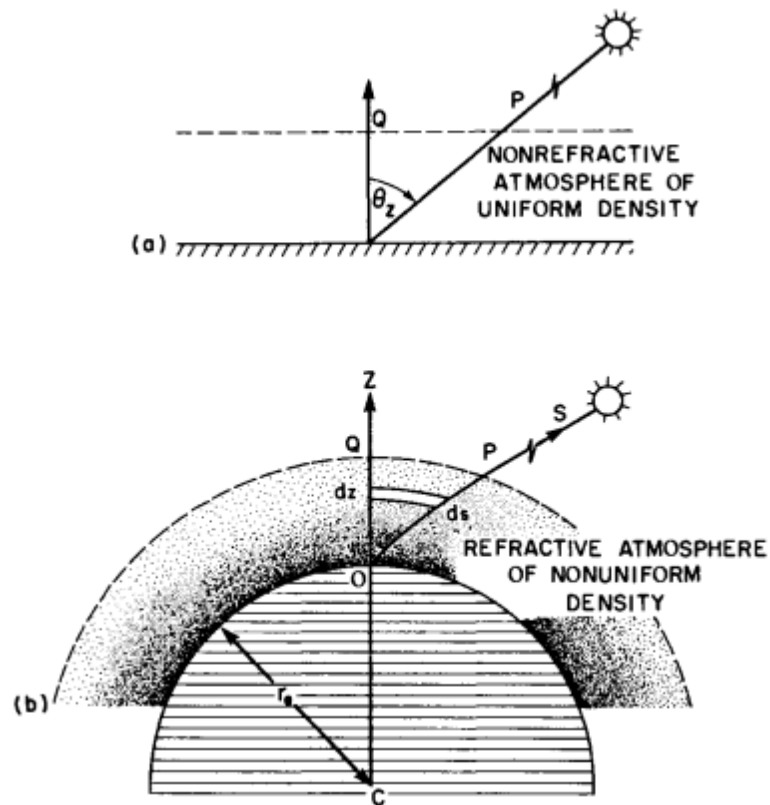


Figura A.3: a) Representación simplificada de la atmósfera. b) Representación realista de la atmósfera terrestre para mayor precisión en el cálculo de la masa de aire. Tomado de [Iqbal, 1983](#).

Existen formulaciones alternativas a la Ec. (A.8), que no divergen en $\theta_z = 90^\circ$ y tienen en cuenta la curvatura de la tierra, la refracción y la no homogeneidad de la atmósfera. Una de las más empleadas es la de [Kasten y Young, 1989](#), que expresa la masa de aire como

$$m = \frac{1}{\cos \theta'_z + 0.5057(96.080 - \theta'_z)^{-1.634}}, \quad (\text{A.9})$$

donde θ'_z es el ángulo cenital aparente; es decir, el ángulo cenital corregido por refracción. Esta expresión da errores menores al 0.05 % para todo θ_z de acuerdo a su autor, y no diverge en $\theta_z = 90^\circ$. Esta expresión es la utilizada por la biblioteca pvlib de Python (F. Holmgren et al. 2018) en la que se realizaron todos los cálculos solares implementados en esta tesis. Una expresión en función del ángulo cenital real θ_z puede encontrarse en Young, 1994.

A.3. Modelos de cielo claro

El modelado de la irradiancia en condiciones de cielo claro (CC), es decir, cielo despejado en ausencia de nubes, es importante debido a que sirve de base para modelos que estiman la irradiancia en presencia de nubes (modelos físicos e híbridos a partir de imágenes satelitales). La estimación de las componentes de la irradiancia en estas condiciones es clave también para el control de calidad de datos, ya que establece límites posibles para las medidas de irradiancia; en el Capítulo 3 se utiliza para determinar cotas superiores e inferiores para la DNI y la DHI, y en el Capítulo 4 el uso de un modelo de CC es clave para identificar intervalos de tiempo en condiciones de cielo claro para la estimación del azimut real de las superficies captadoras inclinadas.

En esta tesis se decidió utilizar el modelo ESRA¹ de cielo claro (Rigollier et al. 2000), que toma como entrada la masa de aire y un parámetro atmosférico conocido como turbidez de Linke, T_L . Este parámetro adimensionado caracteriza el estado de la atmósfera en ausencia de información detallada del contenido de aerosoles o vapor de agua en la misma, y fue caracterizado y validado localmente en forma de ciclos mensuales por Laguarda y Abal, 2016. T_L tiene dependencia leve con la masa de aire, y es usual que se lo determine para $m = 2$, notándose como $T_L(AM2)$. Existen estimativos de T_L para todo el planeta en la biblioteca pvlib de Python, en base al trabajo de Remund et al. 2003. Más detalles sobre este parámetro y su determinación pueden encontrarse en Abal et al. 2020.

El modelo ESRA separa las componentes de la irradiancia en plano horizontal en condiciones de cielo claro: global, $G_{h,c}$, difusa, $G_{dh,c}$ y directa horizontal,

¹European Solar Radiation Atlas

$G_{bh,c}$, donde el subíndice c explicita que se trata de cielo claro. La componente directa se calcula como

$$G_{bh,c} = G_{sc}F_n \cos \theta_z \exp(-0.8662 \times T_L(AM2) \times m \times \delta_R(m)), \quad (\text{A.10})$$

donde $\delta_R(m)$ es el espesor óptico efectivo de una atmósfera de Rayleigh y se parametriza en función de la masa de aire de acuerdo a ([Kasten, 1996](#))

$$\frac{1}{\delta_R(m)} = \begin{cases} 6.62960 + 1.75130m - 0.12020m^2 \\ \quad + 0.00650m^2 - 0.00013m^4, & \text{si } m \leq 20 \\ 10.6 + 0.718m, & \text{si } m > 20. \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

La componente difusa se modela como el producto de la radiación en el [TOA](#) por un factor de transmitancia difusa $T_{rd}(T_L)$ en un camino vertical ($\theta_z = 0$) y un modificador angular de difusa $F_d(\theta_z, T_L)$ según

$$G_{dh,c} = G_{sc}F_n \times T_{rd}(T_L) \times F_d(\theta_z, T_L), \quad (\text{A.12})$$

donde el factor de transmitancia tiene dependencia cuadrática con T_L ,

$$T_{rd}(\hat{T}_L) = -1.5843 \times 10^{-2} + 3.0543 \times 10^{-2} \hat{T}_L + 3.797 \times 10^{-4} \hat{T}_L^2, \quad (\text{A.13})$$

con $\hat{T}_L = T_L/0.8665$. El modificador angular es cuadrático respecto al $\cos \theta_z$ según

$$F_d(\theta_z, T_L) = A_0(\hat{T}_L) + A_1(\hat{T}_L) \cos \theta_z + A_2(\hat{T}_L) \cos^2 \theta_z, \quad (\text{A.14})$$

y los coeficientes $A_i(T_L)$ están dados por

$$\begin{aligned} A_0(\hat{T}_L) &= 2.6463 \times 10^{-1} - 6.1581 \times 10^{-2} \hat{T}_L + 3.1408 \times 10^{-3} \hat{T}_L^2, \\ A_1(\hat{T}_L) &= 2.0402 + 1.8945 \times 10^{-2} \hat{T}_L - 1.1161 \times 10^{-2} \hat{T}_L^2, \\ A_2(\hat{T}_L) &= 1.3025 + 3.9231 \times 10^{-2} \hat{T}_L + 8.5079 \times 10^{-3} \hat{T}_L^2. \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Finalmente, es claro que la irradiancia global horizontal en cielo claro se

determina como la suma de la directa y la difusa en el plano horizontal:

$$G_{h,c} = G_{bh,c} + G_{dh,c}. \quad (\text{A.16})$$

Este modelo de cielo claro tiene la virtud de depender de un único parámetro atmosférico (dado por un ciclo diario anual) y representa razonablemente bien las condiciones de cielo claro locales.

A.4. Componentes de GTI en cielo claro

Uno de los aspectos claves en el método A de estimación del azimut de superficies inclinadas desarrollado en el Capítulo 4 es la relación entre el ángulo horario que maximiza la medida de GTI, ω^* y el azimut de la superficie, γ . Una primera conjetura que se podría hacer al respecto sería que GTI alcanza su máximo en el instante en que el ángulo de incidencia θ es mínimo (en analogía con GHI, que se maximiza en el mediodía solar, donde θ_z es mínimo y $\cos \theta_z$ es máximo). De ser así, el problema de determinar el azimut de la superficie sería puramente geométrico, pues en ese instante $\gamma = \gamma_s$. Bastaría con determinar el azimut solar correspondiente al máximo de GTI y ese sería el azimut de la superficie.

Sin embargo, de acuerdo a lo observado en la Figura A.4 esto no es así. En dicha figura se presentan las componentes de la irradiancia en plano horizontal en condiciones de cielo claro estimadas por el modelo ESRA, la GTI estimada por el modelo Perez, y las componentes de GTI (es decir, G_{di} llamada DTI, y $G_{bi} = DNI \times \cos \theta$). Existe entonces una competencia entre la evolución temporal de dichas componentes, resultando en que el máximo de GTI no ocurre en el instante en que se maximiza $\cos \theta$.

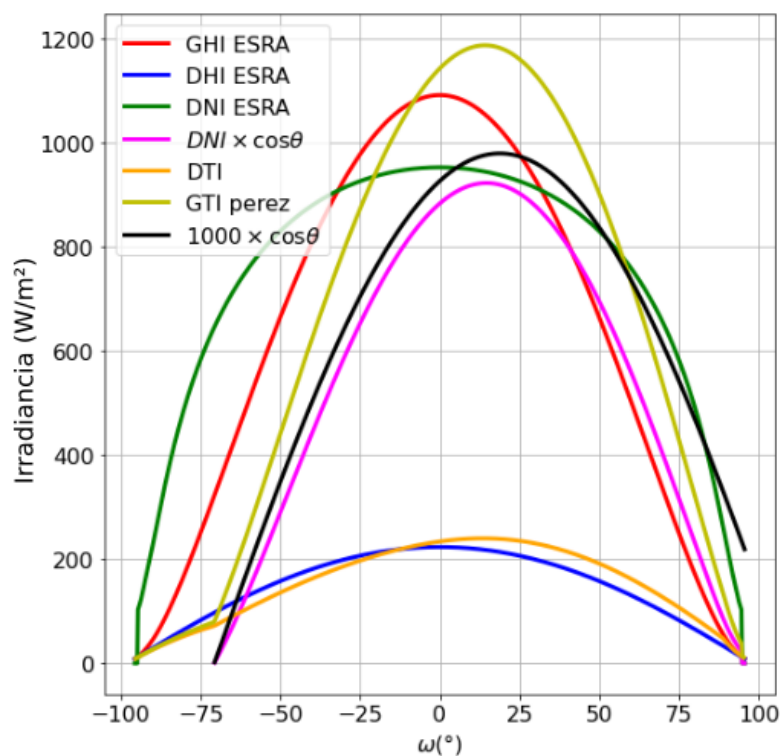


Figura A.4: Componentes de cielo claro estimadas por el modelo ESRA (GHI, DHI y DNI), además de la GTI que resulta de aplicar el modelo Perez a dichas componentes. También se grafica el $\cos\theta$, observándose que su máximo no coincide con el de GTI.

Apéndice B

Instrumentos de medida

En apartado se explica el funcionamiento y características del instrumental de medidas de irradiancia con las que se trabaja en las cinco estaciones evaluadas en esta tesis.

B.1. Piranómetros

El piranómetro es un radiómetro con un campo de vista hemisférico, capaz de medir la radiación global en un plano (ya sea GHI o GTI), así como la DHI en caso de emplearse algún método de bloqueo de la irradiancia directa DNI, como ser máscaras fijas, esferas con seguimiento solar o bandas de sombra rotantes.

Cuenta con un elemento sensible cuyo funcionamiento puede basarse en principios termoeléctricos (como el piranómetro Eppley Black and White o los de la serie CMP de Kipp and Zonen), fotovoltaicos (por ejemplo el Li-Cor), o incluso termomecánicos, como el piranógrafo Robitzsch bimetalico actualmente en desuso ([Iqbal, 1983](#)).

Serie CMP de Kipp and Zonen

Uno de los piranómetros de uso más común en la RMCIS son los de la serie CMP de Kipp and Zonen (en particular los CMP6, CMP10/11 y CMP22). Estos piranómetros cuentan con un elemento detección de termopila, formado por un conjunto de pares de unión termopar conectados eléctricamente en serie, que se valen del efecto Seebeck para convertir diferencias de temperatura en voltaje. Las diferencias entre los modelos residen esencialmente en la calidad

del material, el vidrio de las cúpulas y el registro de temperatura interna que permite compensar su variación a posteriori eliminando la dependencia de la sensibilidad con la temperatura.



Figura B.1: Mesa de calibración de piranómetros contra estándar secundario CMP22 de Kipp and Zonen, ubicada en la azotea del LES.

En la Figura B.1 se muestran piranómetros de la serie CMP ubicados en una mesa de calibración en el Laboratorio de Energía Solar. Éstos se calibran contra el CMP22, que es el piranómetro de mayor calidad fabricado por Kipp & Zonen.

Piranómetros CMP10 y CMP11 se utilizan también como instrumento de medida de DHI en la estación LE, al encontrarse montados sobre un seguidor SOLYS2 de Kipp and Zonen al bloquearse el haz de directa por medio de una esfera solidaria al sistema de seguimiento.

Piranómetro Li-Cor

El LI-200R es un piranómetro que mide irradiancia por medio de un fotodiodo de silicio montado debajo de un difusor de acrílico diseñado para reducir el efecto coseno. La salida del sensor es una señal de corriente directamente proporcional a la irradiancia. Se trata de un piranómetro de respuesta mucho más rápida que los de termopila (del orden de $10\ \mu\text{s}$), lo que lo hace útil para medidas de corta resolución temporal. Sin embargo su respuesta espectral no es plana, aumentando a partir de los 400 nm, por lo que es muy baja en la región del azul; esto implica que su precisión no es la misma en toda condición de cielo, como la de un instrumento de respuesta plana. Además requieren recalibración anual, al experimentar inestabilidad con el paso del tiempo. De acuerdo a su fabricante, su incertidumbre en la medida es del orden de 5%, mayor que la de los piranómetros de termopila, por lo que el instrumento puede clasificarse como clase B de respuesta rápida, según la norma ISO 9060:2018

(ISO, 2018). Este piranómetro se utiliza exclusivamente para la medida de GTI en las estaciones de campo (AR, TA y TT/PP) de la RMCIS.

B.2. Pirheliómetros

El pirheliómetro es el instrumento empleado para medir la componente directa de la irradiancia. Se trata de un piranómetro de alta calidad colimado que, debidamente alineado con el haz de directa, permite medir la DNI. Debe montarse en un sistema de seguimiento solar, ya sea mecánico o manual, para direccionarlo correctamente respecto a la radiación directa. En Iqbal, 1983 se recopila la evolución de los pirheliómetros y los distintos sistemas de seguimiento a lo largo de la historia.

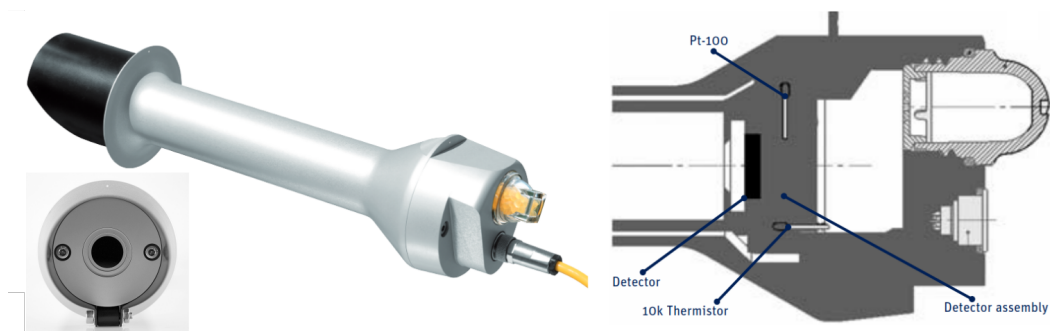


Figura B.2: Pirheliómetro CHP1 de Kipp and Zonen, con detalle frontal de su abertura, y esquema de su sistema de detección ubicado en el fondo.

En la estación de LE se cuenta con un pirheliómetro Kipp and Zonen CHP1 con un sistema detector y sensores auxiliares de temperatura pt-100 y un termistor de 10K, como se ve en la Figura B.2, con una apertura al disco solar que abarca 5° de semiángulo, por lo que capta la totalidad de la irradiancia directa y parte de la circumsolar.

Según el fabricante, este instrumento presenta una respuesta espectral plana entre 200 y 4000 nm, abarcando la totalidad del espectro visible, y tiempo de respuesta menor a 5 s. Tiene una incerteza del 2 % para la medida horaria y 1 % para la diaria, lo que lo convierte en un radiómetro Clase A espectralmente plano de acuerdo a la norma ISO 9060:2018.

B.3. Sistemas de seguimiento

La medida de DNI es compleja debido a que requiere alinear el instrumento respecto a la dirección del Sol, y además mantener el seguimiento por largos periodos de tiempo bajo condiciones meteorológicas diversas. En el LES se cuenta con un sistema de seguimiento solar SOLYS2 de Kipp & Zonen con sistema GPS incorporado y ajuste fino, que proporciona una alineación precisa y estabiliza la medida.

De acuerdo a las especificaciones del fabricante, el SOLYS2 tiene una precisión de seguimiento menor a 0.1° .

B.4. Medidas de DHI en estaciones de campo - SPN1

La medida de difusa en las estaciones de campo se realiza con un piranómetro SPN1 sin partes móviles, que mide GHI y DHI simultáneamente. Consta de un arreglo hexagonal de siete termopilas que detectan la radiación, cubiertas por una máscara hemisférica (ver Figura 3.3) diseñada de forma tal que para toda posición del sol en el cielo, al menos un detector está expuesto al haz de directa, al menos uno está sombreado completamente, y todos los detectores reciben el 50 % de la irradiancia difusa de la bóveda celeste.

En la parte inferior de la Figura 3.3 se representa la vista del cielo desde cada una de las siete termopilas, utilizando una proyección equiangular, es decir, donde las distancias radiales en la imagen son proporcionales al ángulo cenital. Al registrar las siete lecturas simultáneamente y aplicar un sencillo algoritmo, que describiremos a continuación, el SPN1 calcula GHI y DHI (Badosa et al. 2014).

De acuerdo a las especificaciones del fabricante, la respuesta espectral del SPN1 es plana a partir de los 400 nm, por lo que se pierde un poco de contenido de azul-UVA en el espectro. Esto resulta en una subestimación de la DHI en condiciones de cielo muy claro o a grandes altitudes.

El SPN1 es capaz de medir GHI con una incerteza del 5 % en medidas diarias y horarias, y un 8 % en las medidas individuales, mientras que la incertidumbre en DHI es mayor, llegando hasta un 10 % luego de recalibración (Badosa et al. 2014). La señal de salida es amplificada internamente al or-

den de 1 V para 1000 W/m^2 , agregando error en forma de dependencia con la temperatura ambiente. Por ello, los SPN1 tienen calentamiento interno para mantenerse a 25°C y reducir esta dependencia. Sin embargo, por razones de disponibilidad de energía, en sitios remotos no siempre están en funcionamiento los calentadores.

El fabricante recomienda recalibrar el instrumento cada dos años; esto se hizo en las tres estaciones de campo retirando los SPN1 y llevándolos a Salto a calibrar contra el CMP22 de Kipp and Zonen ya descrito. Esta calibración se hizo a nivel de la medida de GHI, no habiéndose calibrado la medida de DHI.

B.4.1. Cálculos internos del SPN1

El algoritmo interno que permite determinar GHI y DHI a partir de las medidas de los siete sensores del SPN1 se presenta a continuación ([Badosa et al. 2014](#), [Delta-T Devices Ltd., 2019](#)).

Sean MAX y MIN la mayor y menor lectura de las termopilas en un instante dado, luego de ser ajustadas por sus constantes de calibración individuales. Entonces de acuerdo a lo explicado más arriba, se cumple que

- $\text{MIN} = \text{DHI}/2$ (este sensor tiene la DNI bloqueada y recibe la mitad de la difusa solamente).
- $\text{MAX} = \text{BHI} + \text{DHI}/2$ (este sensor recibe directa y la mitad de la difusa).
- Por clausura, $\text{GHI} = \text{BHI} + \text{DHI} = \text{MAX} - \text{DHI}/2 + \text{DHI} = \text{MAX} + \text{DHI}/2 = \text{MAX} + \text{MIN}$

Sin embargo, el software interno realiza algunas correcciones adicionales a este sencillo algoritmo ([Delta-T Devices Ltd., 2019](#)).

- $\text{GHI} = \text{MAX} + \text{MIN}$
- $\text{DHI} = 2 \times \text{MIN} \times 1.02$. Este 2% remueve un sesgo sistemático debido a la pequeña discrepancia entre los siete sensores bajo idénticas condiciones de luminosidad.
- Si $(\text{DHI} > \text{GHI})$, entonces $(\text{DHI} = \text{GHI})$. Debido a que la difusa no puede ser mayor que la global.

- $BHI = (GHI - DHI) \times 0.99$. La respuesta espectral de los sensores es diferente para la directa y la difusa: la componente directa tiene menos contenido de rojo que la global, y por lo tanto es sobre-estimada (Badosa et al. 2014).
- $DHI = DHI \times 1.14$. Corrección por subestimación de la difusa, debido a la respuesta espectral del instrumento que decae drásticamente en la región del azul alrededor de 400 nm. El factor 1.14 es un valor promedio para condiciones de cielo mixto (Badosa et al. 2014).
- $GHI = BHI + DHI$. GHI y DHI son las salidas.

B.5. Instrumental por estación

Estación	GHI1		GHI2		DHI		DNI		GTI	
	Sensor	Inicio-Fin	Sensor	Inicio-Fin	Sensor	Inicio-Fin	Sensor	Inicio-Fin	Sensor	Inicio-Fin
AR	CMP6	9/Feb/2017 - 20/Set/2018	SPN1	9/Feb/2017 - 20/Set/2018	SPN1	9/Feb/2017 - 20/Set/2018	N/A	N/A	LI-200R	9/Feb/2017 - 20/Set/2018
LE	CMP11	20/Dic/2014 - 18/May/2015	CMP6	xxxxxxx	CMP10	20/Dic/2014 - 18/May/2015 25/Set/2015 - Presente	CHP1	20/Dic/2014 - Presente	CMP6	20/Dic/2014 - Presente
	CMP10	15/Jun/2015 - Presente			CMP11	15/Jun/2015 - 25/Set/2015				
TA	CMP10	5/Ago/2015 - 16/Oct/2018	SPN1	5/Ago/2015 - 22/Mar/2016 27/Set/2016 - 16/Oct/2018	SPN1	5/Ago/2015 - 22/Mar/2016 27/Set/2016 - 16/Oct/2018	N/A	N/A	LI-200R	05/Ago/2015 - 16/Oct/2018
TT/PP	CMP10	23/03/2016 - 23/11/2018	SPN1	23/03/2016 - 23/11/2018	SPN1	11/07/2016 - 23/11/2018	N/A	N/A	LI-200R	23/03/2016 - 23/11/2018

Tabla B.1: Instrumental por estación, con fecha de inicio y final de la medida, para las estaciones de la RMCIS.

Es importante aclarar que debido a la exigencia de mantener los instrumentos de la RMCIS calibrados con frecuencia bianual se produce una alta rotación de los mismos.

B.6. Inspección visual de datos

En el enlace http://les.edu.uy/tesis/datos/insp_visual/ se encuentra un repositorio de imágenes que salen de la inspección visual de datos minutales en todas las estaciones relevadas, correspondientes a:

- Serie temporal minutal de irradiancia.

- Serie temporal de irradiancia coloreada, como la presentada en la Figura 3.9.
- Diagramas $f_d - k_t$ distinguiendo según condiciones de sol bajo ($\theta_z \geq 80$) y sol alto ($\theta_z < 80$).
- GHI y GTI en condiciones de cielo claro, en función del ángulo horario, mostrando posibles desalineaciones de azimut de la superficie inclinada.
- GHI2 en función de GHI1, en las estaciones que miden con SPN1.
- Serie temporal y diagrama $f_d - k_t$ a nivel minutal posterior al filtrado.
- Una carpeta con el efecto de cada uno de los filtros aplicados sobre el diagrama $f_d - k_t$.

Apéndice C

Resultados completos

En este apéndice se presentan los resultados de todas las validaciones de modelos de transposición realizadas, y se discuten algunas problemáticas con zlas medidas que no aparecen en el cuerpo de esta tesis.

Se hicieron tres validaciones con diferentes conjuntos de datos a partir de los que se calcula GTI y se la compara con el dato, por medio de los indicadores de sesgo y dispersión ya comentados en detalle. Estas validaciones son

- *Validación con difusa medida*, a partir de pares de datos (GHI, DHI). Se usa el dato de DNI en caso de que exista (estaciones LE y GO), y se lo calcula a partir de la relación de clausura (Ec. (2.6)) en el caso de que el dato de DNI no exista (estaciones AR, TA y TT/PP).
- *Validación con difusa estimada*. Datos de GHI, a partir de los que se calcula el estimativo de DHI usando el modelo de separación RA2S (Sección 2.4). DNI se calcula por clausura a partir del dato de GHI y la DHI estimada.
- *Validación con DNI clausura*, exclusiva para las estaciones LE y GO. Esta es una variante de la validación con DHI dato, donde se utiliza DNI calculada por clausura en su totalidad, en lugar del dato.

C.1. Validación con DHI medida

Modelo	LE1		LE2		TA		AR		TT		PP1		PP2	
	(30,0)	(30,-2.0)	(45,0)	(45,-1.0)	(45,0)	(45,14.5)	(30,0)	(30,6.6)	(45,0)	(45,14.2)	(45,0)	(45,40.0)	(45,0)	(45,18.3)
rMBD - 10-minutal														
ISO	-2.5	-2.6	-2.3	-2.4	-4.3	-3.5	6.7	6.3	-0.1	0.3	-2.8	1.1	1.7	2.1
HD	-1.1	-1.1	0.0	0.0	-2.7	-1.8	8.3	8.0	2.4	2.9	-1.8	2.7	3.7	4.3
TCK	0.1	0.1	1.1	1.1	-1.2	-0.4	9.8	9.5	4.0	4.5	0.0	4.5	5.5	6.0
HDKR	-0.9	-1.0	0.4	0.4	-2.3	-1.3	8.5	8.2	3.0	3.5	-1.3	3.2	4.3	4.8
PER	0.2	0.2	2.0	1.9	-0.7	0.1	9.9	9.6	4.7	5.1	0.2	4.6	6.1	6.6
rRMSD - 10-minutal														
ISO	4.7	4.6	5.6	5.6	13.5	6.7	10.0	8.8	13.2	5.3	29.6	5.0	16.8	9.0
HD	3.3	3.1	3.9	3.9	12.9	4.8	10.9	9.7	13.7	5.6	30.3	5.5	16.8	8.5
TCK	3.0	2.7	3.9	3.9	12.5	4.4	12.2	11.1	14.0	6.7	30.0	6.2	17.4	9.9
HDKR	3.2	3.0	3.9	3.9	12.8	4.6	11.0	9.8	13.9	5.9	30.4	5.7	17.0	8.8
PER	2.8	2.5	3.8	3.8	12.5	4.1	12.2	11.1	14.3	6.9	30.3	6.4	17.6	10.0
\overline{GTI}	601.3		570.6		556.2		529.4		509.5		600.1		515.4	
# datos	14722		29498		47493		19282		18005		9876		17441	
rMBD - horario														
ISO	-2.4	-2.4	-2.0	-2.0	-3.7	-3.5	6.6	6.1	0.2	0.5	-1.7	0.9	2.2	2.2
HD	-0.9	-0.9	0.5	0.4	-2.1	-1.8	8.2	7.8	2.7	3.0	-0.6	2.4	4.2	4.2
TCK	0.3	0.3	1.7	1.7	-0.5	-0.2	9.9	9.5	4.6	4.9	1.4	4.4	6.2	6.2
HDKR	-0.8	-0.8	0.9	0.8	-1.6	-1.3	8.4	8.0	3.3	3.6	0.0	.03	4.8	4.8
PER	0.4	0.4	2.4	2.4	-0.1	0.2	9.9	9.5	5.1	5.3	1.6	4.5	6.8	6.7
rRMSD- horario														
ISO	4.3	4.1	4.9	4.9	12.6	6.5	9.5	8.3	12.1	4.7	27.5	4.4	15.4	8.5
HD	2.8	2.6	3.3	3.3	11.9	4.5	10.3	9.1	12.7	5	28.2	4.9	15.4	8.0
TCK	2.6	2.3	3.6	3.6	11.6	3.9	11.7	10.7	13.0	6.4	27.9	5.7	16.1	9.5
HDKR	2.8	2.5	3.4	3.3	11.8	4.2	10.5	9.3	12.8	5.4	28.2	5.1	15.6	8.4
PER	2.5	2.2	3.7	3.7	11.6	3.8	11.8	10.7	13.4	6.8	28.2	6.1	16.4	9.8
\overline{GTI}	638.8		597.5		540.9		554.6		515.9		629.3		534.8	
# datos	1922		4138		7113		6883		2733		1467		2611	

Tabla C.1: Indicadores relativos diezminutales y horarios para la validación de los modelos con DHI medida. En la segunda fila, la pareja de números entre paréntesis representa la inclinación y el azimut, en grados, de la superficie. Valores porcentuales reportados respecto a la media de las medidas, incluidas en la tabla.

En la Tabla C.1 se muestran los sesgos y dispersiones porcentuales de los modelos de transposición, a escala horaria y diezminutal. Como ya se mencionó en el Capítulo 5, la validación se hizo suponiendo el azimut nominal $\gamma = 0$ y el valor de azimut real calculado en el Capítulo 4. Se reportan también las medias de la medida de GTI en todos los casos, quienes varían un máximo de 5% en ambas escalas; esto se debe a un leve sesgo introducido por la integración diezminutal y horaria, y se encuentra dentro de lo aceptable.

Se separaron las estaciones que presentan resultados anómalos, en particular sesgos positivos en el modelo ISO. Esto va en contra del hecho de que suponer que la difusa se distribuye isotrópicamente debe resultar en una subestimación de la GTI, debido a la existencia de la región circumsolar y el brillo del horizonte, como se explicó en detalle en el Capítulo 2. Estas estaciones coinciden con aquellas catalogadas como de tipo III de acuerdo al análisis del Capítulo 3, en base a la inspección visual minuciosa de datos crudos, el resultado del filtrado, la incerteza típica del instrumental y el desvío azimutal de las mismas. Debido a la inconsistencia de los resultados que arrojaron, no han sido tenidas en cuenta en la mayoría de los análisis realizados a posteriori.

Además, en virtud de la mejora notoria en el desempeño de los modelos al estimar GTI usando el valor de azimut real, demostrándose la validez del método de detección de azimuts, se decidió emplear únicamente dicho valor en las siguientes validaciones.

En la Figura C.1 se muestra la dispersión de la GTI modelada contra el dato, para todas las estaciones a nivel diezminutal. Se coloreó la nube de puntos de acuerdo a su densidad, por lo que la zona en amarillo representa alta proporción de puntos. Se observan claramente los sesgos positivos anómalos del modelo ISO en las estaciones tipo III, así como las mejoras en términos de la dispersión dadas por los modelos anisotrópicos.

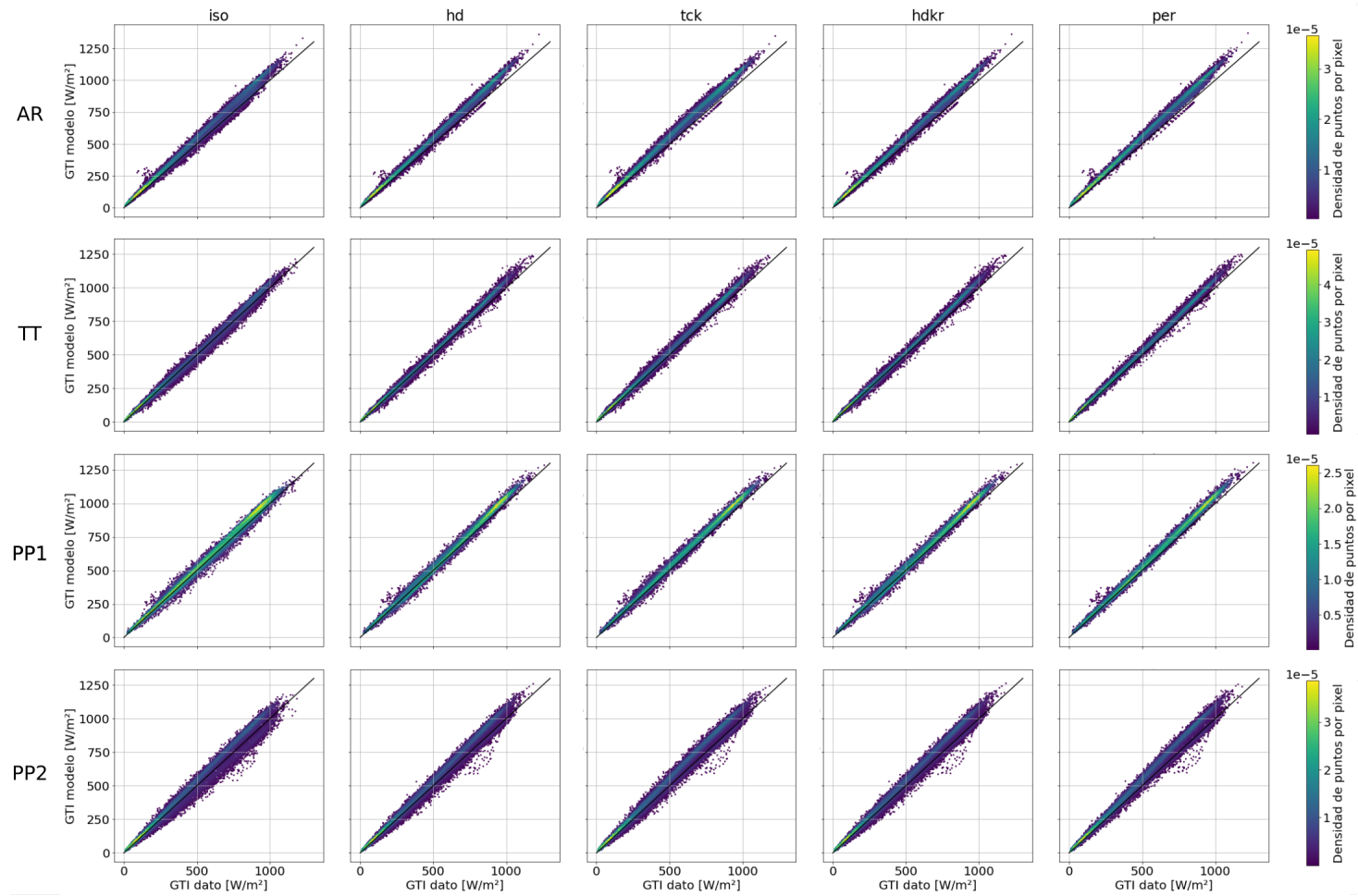


Figura C.1: GTI modelada en función del dato de GTI, para las estaciones tipo III, y coloreado por densidad de puntos.

C.1.1. Desempeño por condición de cielo

En la Tabla C.2 se presentan los indicadores absolutos y relativos, a nivel diezminutal, de la validación separando por condiciones de cielo según k_t como se explicó en la Sección 5.3.3. En la sección correspondiente se analiza en detalle el resultado de esta tabla y se la presenta de forma más visual en forma de gráfico de barras en las Figuras 5.6 y 5.7.

cat. k_t	LE1 - (30,-1.1)			LE2 - (45,-1.1)			GO - (40,180)			TA - (45,14.4)		
	NA	NP	CD	NA	NP	CD	NA	NP	CD	NA	NP	CD
Modelo	MBD (W/m²) - 10-minutal											
ISO	1.9	-18.0	-17.6	4.5	-25.0	-12.9	-1	-30.4	-27.4	1.4	-27.1	-23.3
HD	2.1	-10.8	-6.4	4.7	-12.3	4.0	-0.8	-20.6	-2.4	1.6	-17.3	-10.0
TCK	3.2	-1.3	0.7	5.2	-2.9	10.2	-0.1	-10	-1.2	3.1	-5.8	-2.2
HDKR	2.4	-9.4	-5.7	5.2	-8.6	5.8	-0.4	-17.7	-0.9	2.6	-12.7	-8.0
PER	4.1	0.3	1.4	7.7	3.9	14.6	0.8	-5.4	6.8	3.1	-2.8	1.6
	rMBD (%) - 10-minutal											
ISO	1.3	-4.4	-2.3	4.1	-6.4	-1.7	-0.8	-7.9	-3.4	1.2	-6.4	-3.0
HD	1.4	-2.6	-0.8	4.3	-3.1	0.5	-0.6	-5.4	-0.3	1.4	-4.1	-1.3
TCK	2.1	-0.3	0.1	4.8	-0.7	1.4	-0.1	-2.6	-0.2	2.7	-1.4	-0.3
HDKR	1.6	-2.3	-0.7	4.7	-2.2	0.8	-0.3	-4.6	-0.1	2.2	-3.0	-1.0
PER	2.7	0.1	0.2	7.0	1.0	2.0	0.6	-1.4	0.8	2.7	-0.7	0.2
	RMSD (W/m²) - 10-minutal											
ISO	11.6	35.0	25.8	13.3	44.8	28.5	16.0	47.0	38.4	10.9	43.7	38.5
HD	11.5	25.8	15.2	13.2	30.7	19.7	15.7	35.4	26.2	10.8	31.2	27.0
TCK	11.8	21.7	14.4	13.1	27.6	21.4	14.8	28.2	21.8	11.3	27.3	25.1
HDKR	11.6	25.2	14.9	13.4	29.3	20.0	15.5	33.3	25.7	11.1	28.9	26.1
PER	12.3	19.3	13.5	14.9	22.0	22.7	15.1	25.7	22.3	11.6	23.2	24.7
	rRMSD (%) - 10-minutal											
ISO	7.7	8.6	3.3	12.2	11.4	3.8	12.2	12.2	4.8	9.4	10.3	5.0
HD	7.6	6.3	2.0	12.1	7.8	2.6	11.9	9.2	3.3	9.3	7.4	3.5
TCK	7.8	5.3	1.9	11.9	7.0	2.9	11.3	7.3	2.7	9.7	6.4	3.3
HDKR	7.7	6.2	1.9	12.2	7.5	2.7	11.8	8.6	3.2	9.5	6.8	3.4
PER	8.1	4.7	1.7	13.6	5.6	3.0	11.5	6.7	2.8	10.0	5.5	3.2
\overline{GTI}	151.1	409.0	776.9	109.6	392.7	747.9	131.4	384.6	804.3	116.1	425.1	770.4
# datos	1765	4049	8921	4218	7410	18018	6641	9794	23768	10797	13478	25596

Tabla C.2: Validación por categorías de k_t a nivel diezminutal, para las estaciones tipo I y II.

C.2. Validación con DHI estimada

Como se discutió en la Sección 5.4, para la validación B (usando DHI estimada del modelo RA2S) previamente se validaron los propios modelos de separación, buscando el de uso más conveniente. Se ajustaron localmente los tres modelos de la familia Ruiz-Arias (RA1, RA2 y RA2S) y se los validó

localmente. El resultado para todas las estaciones de la validación se muestra en la Tabla C.3 y de ella se desprende que el modelo RA2S combina mayor simplicidad de uso y buen desempeño.

	LE		GO		TA		AR		TT		PP	
	10-minutal											
Modelo	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)
RA1	0	0.01	0	0.00	0	0.00	0	-0.08	0	0.11	0	0.03
RA2s	0	0.01	0	-0.01	0	0.01	0	-0.05	0	0.11	0	0.03
RA2	0	0.01	0	-0.01	0	0.01	0	-0.05	0	0.10	0	0.03
	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)
RA1	0.11	26.3	0.11	23.1	0.11	20.8	0.12	26.1	0.11	20.7	0.12	23.6
RA2s	0.10	23.4	0.10	21.7	0.10	18.9	0.11	23.2	0.10	19.1	0.11	21.8
RA2	0.10	23.4	0.10	21.6	0.10	18.8	0.10	23.1	0.10	19.1	0.11	21.6
\bar{f}_d	0.42		0.47		0.52		0.45		0.55		0.52	
# datos	99761		41199		56339		28709		36190		41067	
	horario											
Modelo	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	MBD (W/m ²)	rMBD (%)
RA1	0	-0.02	0	0.06	0	-0.04	0	-0.06	0	0.03	0	-0.08
RA2s	0	-0.04	0	0.08	0	-0.06	0	-0.01	0	0.02	0	-0.02
RA2	0	-0.04	0	0.09	0	-0.06	0	-0.02	0	0.02	0	-0.01
	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)
RA1	0.09	23.0	0.10	23.3	0.09	17.3	0.10	24.0	0.09	17.9	0.10	20.9
RA2s	0.08	20.4	0.10	22.8	0.08	15.4	0.09	20.8	0.08	16.3	0.09	18.7
RA2	0.08	20.4	0.10	22.6	0.08	15.4	0.09	20.8	0.08	16.2	0.09	18.7
\bar{f}_d	0.39		0.45		0.50		0.41		0.52		0.48	
# datos	14317		6767		7798		3971		5270		6031	

Tabla C.3: Indicadores absolutos y relativos (respecto a la media de la medida de f_d) para la validación de los tres modelos de separación RA evaluados en esta tesis.

Los coeficientes obtenidos a partir del ajuste local se presentan en la Tabla C.4.

En la Tabla C.5 se muestran los indicadores diezminutales en LE de tres variantes del modelo de separación RA2S: a partir de los coeficientes globales que aparecen en Ruiz-Arias et al. 2010 (columna “global RA”⁴), utilizando los coeficientes localmente ajustados para la región por Abal et al. 2017 (columna “local GA”) y por último los obtenidos por validación cruzada en este trabajo (columna “local IP”). Estos indicadores se reportan tanto para la fracción difusa como para DHI y DNI.

En la Tabla C.6 se presenta el resultado de la validación con difusa estimada (Validación B) para todas las estaciones, a nivel horario y diezminutal.

Estación	Modelo	Coeficientes						
		a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
LE	RA1	0.98	0.97	3.75	-7.51			
	RA2S	0.99	1.13	3.74	-6.13	-0.22		
	RA2	0.99	1.08	3.56	-4.64	-1.73	-0.36	0.02
GO	RA1	0.99	1.03	2.95	-5.74			
	RA2S	0.99	1.16	3.02	-4.93	-0.14		
	RA2	1.00	4.73	2.76	-4.48	2.24	-0.06	0.00
TA	RA1	0.99	1.01	3.36	-6.65			
	RA2S	0.99	1.12	3.55	-5.90	-0.20		
	RA2	0.99	1.06	3.42	-4.11	-2.13	-0.44	0.04
AR	RA1	1.00	0.98	3.67	-7.49			
	RA2S	1.00	1.07	4.04	-6.76	-0.28		
	RA2	1.00	1.05	4.13	-5.68	-1.17	-0.60	0.06
TT	RA1	0.98	0.99	3.39	-6.64			
	RA2S	0.99	1.11	3.54	-5.86	-0.19		
	RA2	0.99	1.30	3.85	-7.16	2.05	-0.27	0.02
PP	RA1	1.00	1.00	3.46	-6.86			
	RA2S	1.00	1.11	3.66	-6.04	-0.23		
	RA2	1.00	1.63	3.87	-7.65	3.18	-0.24	0.02

Tabla C.4: Coeficientes localmente ajustados de la familia de modelos de separación Ruiz-Arias.

	MBD (W/m ²)	rMBD (%)	RMSD (W/m ²)	rRMSD (%)
Coefs.	f_d (media=0.42)			
global RA	0.0	-3.1	0.1	26.3
local GA	0.0	-1.2	0.1	24.1
local IP	0.0	0.9	0.1	23.4
	DHI (media=142.1 W/m ²)			
global RA	-3.1	-2.2	61.8	43.5
local GA	-3.8	-2.7	57.5	40.5
local IP	1.9	1.3	56.5	39.8
	DNI (media=684.8 W/m ²)			
global RA	16.6	2.4	94.3	13.8
local GA	18.3	2.7	91.7	13.4
local IP	14.7	2.1	88.8	13.0

Tabla C.5: Indicadores de sesgo y dispersión del modelo de separación RA2S a partir de los datos diezminutales de LE, reportados en términos de f_d y de DHI y DNI.

LE1		LE2		GO		TA		AR		TT		PP1		PP2		
10-minutal																
Modelo	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD
ISO	-3.4	-0.6	-1.4	-0.3	-18.9	-3.3	-16.7	-3.3	30.4	5.8	4.3	0.9	6.3	1.1	11.8	2.4
HD	6.0	1.0	12.7	2.3	-1.9	-0.3	-8.1	-1.6	39.9	7.6	17.7	3.6	15.0	2.6	22.0	4.5
TCK	13.4	2.2	19.0	3.4	2.0	0.3	-0.2	0.0	46.8	8.9	24.0	4.9	25.3	4.4	30.4	6.2
HDKR	6.8	1.1	14.9	2.6	-0.2	0.0	-5.7	-1.1	40.7	7.8	20.4	4.2	18.0	3.1	24.6	5.0
PER	14.0	2.3	23.6	4.2	6.3	1.1	2.2	0.4	47.2	9.0	26.8	5.5	26.5	4.6	33.6	6.8
	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD
ISO	24.2	4.0	27.5	4.9	36.3	6.3	36.4	7.2	82.2	15.7	73.8	15.2	36.1	6.3	50.4	10.2
HD	21.3	3.6	29.4	5.2	28.2	4.9	28.2	5.6	91.9	17.5	86.8	17.9	39.6	6.9	48.2	9.8
TCK	24.4	4.1	31.7	5.6	27.4	4.8	27.0	5.3	94.2	18.0	83.7	17.2	42.5	7.4	54.4	11.0
HDKR	21.3	3.6	30.1	5.3	27.9	4.8	27.3	5.4	92.5	17.7	88.2	18.2	40.5	7.0	49.5	10.1
PER	23.9	4.0	34.3	6.1	27.7	4.8	26.4	5.2	94.7	18.1	85.6	17.6	44.3	7.7	55.2	11.2
GTI	598.6		565.4		576.1		523.5		512.5		485.9		576.3		491.9	
# datos	14424		29014		38462		19654		52733		19568		10607		18875	
Horario																
	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD	MBD	rMBD
ISO	-3.2	-0.5	-0.2	0.0	-17.5	-2.9	-16.3	-3.1	32.3	5.7	0.2	0.0	4.8	0.8	11.8	2.3
HD	6.6	1.0	14.3	2.4	0.3	0.1	-7.8	-1.5	42.1	7.5	12.9	2.6	13.9	2.3	22.2	4.3
TCK	15.2	2.4	21.7	3.6	5.8	1.0	1.1	0.2	51.0	9.0	22.2	4.4	26.7	4.3	32.7	6.3
HDKR	7.5	1.2	16.7	2.8	2.3	0.4	-5.2	-1.0	43.1	7.6	16.0	3.2	17.3	2.8	25.2	4.8
PER	15.2	2.4	25.7	4.3	9.4	1.6	2.8	0.5	50.9	9.0	24.2	4.8	27.3	4.4	35.4	6.8
	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD	RMSD	rRMSD
ISO	21.9	3.4	25.3	4.2	33.3	5.6	33.7	6.3	69.5	12.3	54.6	10.8	31.0	5.0	47.6	9.1
HD	18.4	2.9	27.5	4.6	25.8	4.3	25.3	4.8	77.2	13.7	62.2	12.3	34.4	5.6	44.5	8.5
TCK	22.6	3.5	30.5	5.1	25.8	4.3	23.2	4.4	81.9	14.5	62.4	12.3	38.1	6.2	52.2	10.0
HDKR	18.6	2.9	28.4	4.7	25.6	4.3	24.2	4.6	78.0	13.8	63.6	12.6	35.4	5.8	46.2	8.8
PER	22.1	3.5	33.6	5.6	26.8	4.5	23.3	4.4	82.9	14.7	65.2	12.9	40.8	6.6	53.4	10.2
GTI	638.9		597.2		597.9		564.2		531.8		506		615.7		522.3	
# datos	1919		4127		6238		2722		7265		2860		1522		2715	

Tabla C.6: Indicadores relativos (% respecto a la media de la medida de GTI) y absolutos (en W/m^2), diezminutales y horarios para la validación de los modelos con DHI estimada. Se utilizaron los valores de azimut real.

C.3. Validación con DNI clausura y dato

En la Figura C.2, se muestran los indicadores absolutos de sesgo y dispersión de las tres validaciones realizadas. La validación A implicaba utilizar el dato de DNI como entrada de los modelos de transposición, mientras que la A' usa DNI calculada por clausura a partir de los datos de GHI y DHI, y la B usa DNI calculada por clausura a partir del dato de GHI y el estimativo de DHI por el modelo RA2S. Obviamente esta comparación solo puede realizarse en las estaciones LE y GO, que son las únicas que cuentan con medida de DNI.

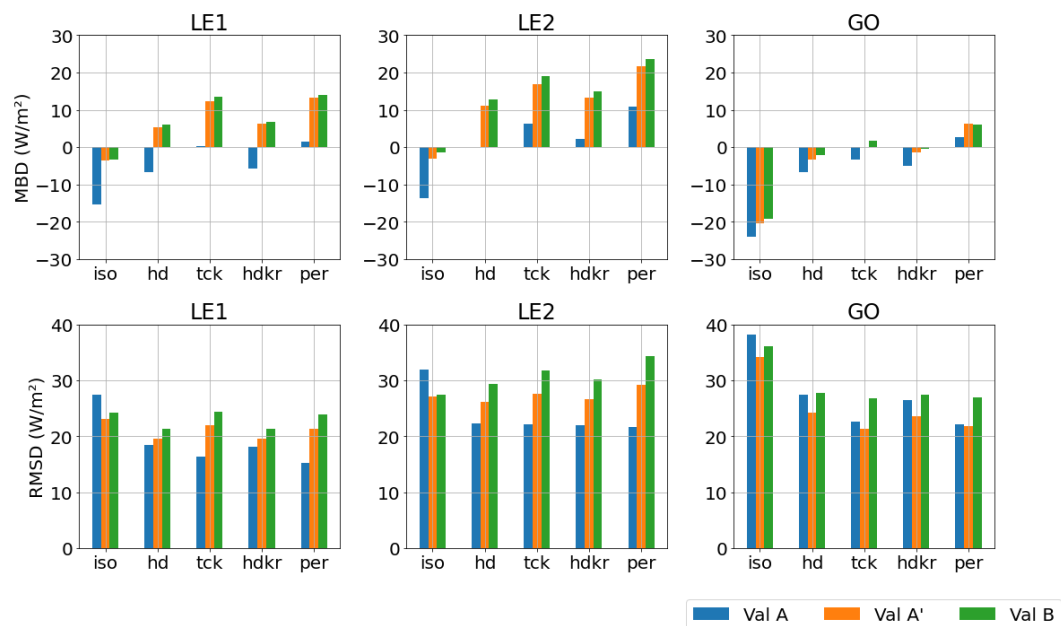
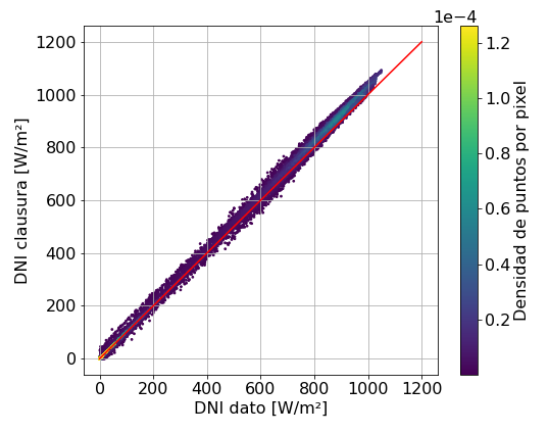
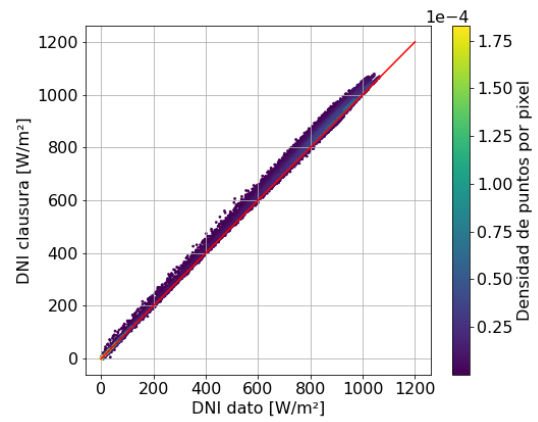


Figura C.2: Comparación de indicadores en las estaciones que cuentan con medida de DNI por medio de tres validaciones distintas.

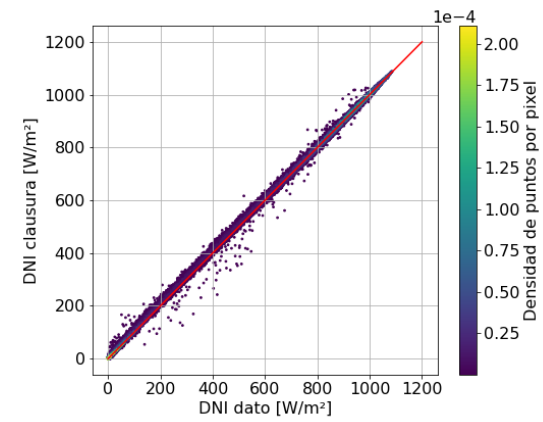
Se observa que en términos del sesgo, en GO hay poca diferencia entre el obtenido por la validación A y la A'. Esto puede interpretarse como que el impacto de usar la DNI calculada por clausura es moderado respecto al usar el dato de DNI, lo que es esperable si las ternas de medidas GHI, DHI y DNI son confiables. Incluso en términos del RMSD se observa que usar la DNI calculada es más preciso que usar el dato. Ahora bien, en LE1 y LE2 se observa la introducción de un sesgo hacia arriba en la estimación de GTI al utilizar la DNI calculada respecto al dato. Si recordamos la Ec. (2.17) que determina la GTI a partir de GHI, DHI y DNI, se ve que el primer término es dependiente de la DNI que usemos.



(a) LE1



(b) LE2



(c) GO

Figura C.3: Gráfico de dispersión entre el dato de DNI y la DNI calculada por la ecuación de clausura, en las dos estaciones que miden DNI.

En la Figuras C.3a a C.3c se grafican las DNI calculadas por clausura en función de la DNI dato, observándose un sesgo claro en LE1 y LE2 que no presenta GO, en especial para valores de DNI altos. Esto podría explicar entonces el aumento drástico en el MBD de LE1 y LE2 al pasar de la validación A a la A', que en GO es mucho menor.

Una posible explicación para el sesgo entre la DNI calculada y el dato, en favor de la primera, podría ser que dado que DNI se calcula como $DNI = (GHI - DHI) / \cos \theta_z$, exista una leve subestimación sistemática en la DHI que lleve a sobreestimar la DNI calculada. Una leve subestimación del dato de DNI tendría un efecto similar. Si observamos la serie de LE en la Figura 3.5, son evidentes las problemáticas en la medida de DNI, y ya fue puesto de manifiesto el gran descarte de DNI negativas en dicha estación¹, por lo que fue catalogada como de tipo II (a diferencia de GO que es de tipo I). Es posible entonces que problemas en la medida tanto de DHI como de DNI no detectados por el filtrado, sean las causantes de esta discrepancia.

¹Causadas por corrientes parásitas durante un período prolongado, que pueden haber afectado levemente ambas medidas, DNI y DHI.