



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería – Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con  
mención en Ingeniería Civil

## **Evaluación empírica de modelos de transposición de radiación solar difusa**



Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con  
mención en Ingeniería Civil

ÁNGEL NICOLÁS HERNÁNDEZ YÁÑEZ  
CONCEPCIÓN – CHILE  
2019

Profesor Guía: Dr. Luis Merino Quilodrán  
Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción

## RESUMEN

Para el diseño sustentable y la evaluación de la eficiencia energética de una estructura edilicia, se requiere conocer la cantidad de radiación solar que incide sobre su envolvente. Estos aportes solares se determinan con los códigos de simulación energética, los cuales utilizan los “modelos de cielo” (o de transposición) para calcular la radiación solar difusa sobre una superficie inclinada a partir de datos de radiación horizontal. Sin embargo, no existe un modelo de aplicabilidad universal aceptado por la comunidad científica, debido a la naturaleza sitio dependiente de la irradiancia solar. Utilizar un modelo inadecuado puede llevar a errores en el dimensionamiento de sistemas de captación solar y en sistemas de enfriamiento y calefacción de edificaciones, por lo tanto, es necesaria la validación empírica de los modelos en cada lugar de interés.

Para lograr los objetivos de este trabajo, se instaló una estación radiométrica en la ciudad de Chillán con la cual se caracterizó el recurso solar midiendo la componente global horizontal, difusa horizontal y directa normal de la radiación solar, a través de un piranómetro SPN1. Este instrumento es una solución económica a equipos de alto estándar. Los datos obtenidos fueron sometidos a una serie de controles de calidad para asegurar su confiabilidad. A su vez, la medición de la radiación solar en superficies verticales y orientadas hacia el Norte, Este y Oeste utilizando piranómetros CMP10, permitió la evaluación del desempeño de los modelos de cielo.

El mejor desempeño se obtuvo con un modelo semi-empírico denominado PPS, el cual considera una distribución anisotrópica de la radiación difusa en tres zonas del cielo: la vecindad del sol, en la línea del horizonte y el resto del hemisferio celeste. Un desempeño similar se obtuvo con el modelo PAW, el cual calcula la radiación difusa en cada punto del hemisferio celeste a través de una discretización del cielo. Estos modelos entregan valores muy cercanos a los medidos empíricamente, alcanzando una correlación superior al 98 %. Por lo tanto, para obtener valores confiables de radiación solar sobre superficies inclinadas se debe utilizar el modelo PPS o el modelo PAW en los códigos de simulación energética. En trabajos futuros, se debe analizar el desempeño de los modelos en un contexto urbano, en donde existen obstrucciones a la visibilidad del cielo tales como edificios, relieves naturales, etc. Además, este trabajo se debe complementar con datos de radiación solar de meses invernales cuando la trayectoria del sol es más baja.

## AGRADECIMIENTOS

Al proyecto FONDEF ID14i10208 por el financiamiento parcial para el desarrollo esta tesis.

Al proyecto Fomento Iniciativas Innovadoras con gran Potencial de Impacto (FIPI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción por financiar el equipamiento utilizado para el desarrollo de esta tesis.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción Campus Chillán, por facilitar un espacio para la instalación de la estación radiométrica y por brindar herramientas para la correcta operación de la estación.

A Luis Merino, mi profesor patrocinante, por su motivación y disposición para guiarme a lograr los objetivos de esta tesis y por facilitarme un lugar de trabajo en el Laboratorio de Construcción del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción.

A los profesores Oscar Link y Cristián Cuevas, mi comisión evaluadora, por evaluar esta tesis.

Agradezco a mis padres, por la confianza y el apoyo durante todo este proceso. A mi polola, amigos y compañeros por todo el apoyo brindado. Finalmente, a los profesores que directa o indirectamente contribuyeron en mi aprendizaje y en la culminación de esta etapa de mi carrera.

**CONTENIDO**

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación.....	1
1.2. Hipótesis de trabajo .....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.4. Metodología de trabajo .....	3
1.5. Principales resultados y conclusiones.....	4
1.6. Organización de la tesis .....	5
<b>CAPÍTULO 2 RADIACIÓN SOLAR .....</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción .....	7
2.2. Radiación solar .....	7
2.3. Radiación solar incidente sobre la superficie terrestre .....	9
2.4. Radiación directa .....	13
2.5. Radiación reflejada .....	16
2.6. Radiación solar difusa.....	17
2.7. Medición de la radiación difusa.....	21
2.7.1. Piranómetro CMP10 de Kipp and Zonen .....	22
2.7.2. Piranómetro SPN1 de Delta-T.....	24
2.7.3. Diferencias entre las mediciones del SPN1 y piranómetros Clase A.....	27
2.7.4. Fuentes de incertezas del SPN1.....	28
2.8. Evaluación empírica de los modelos de cielo para la componente difusa.....	30
2.9. Conclusiones .....	32
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA .....</b>	<b>34</b>
3.1. Introducción .....	34
3.2. Estación radiométrica .....	34

3.3. Período de medición .....	36
3.4. Control de calidad de los datos medidos .....	38
3.5. Criterios de evaluación .....	40
3.5.1. Raíz del error cuadrático medio (RMSE).....	40
3.5.2. Error de sesgo promedio (MBE) .....	41
3.5.3. Coeficiente de determinación .....	42
3.6. Conclusiones .....	42
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....</b>	<b>44</b>
4.1. Introducción .....	44
4.2. Comparación entre los modelos de cielo .....	44
4.3. Evaluación estadística de los modelos de cielo .....	46
4.4. Desviaciones entre las mediciones de los piranómetros SPN1 y CMP10 .....	56
4.5. Conclusiones .....	58
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>59</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>68</b>
Anexo 2.1. Atenuación atmosférica de la radiación solar .....	69
Anexo 2.2. Distribución de días claros y nublados .....	72
Anexo 2.3. Conceptos.....	74
Anexo 2.3.1. Constante solar.....	74
Anexo 2.3.2. Variación de la radiación extraterrestre .....	74
Anexo 2.3.3. Declinación del sol.....	76
Anexo 2.3.4. Tiempo solar .....	77
Anexo 2.3.5. Posición del sol .....	79
Anexo 2.4. Clasificación de los piranómetros .....	82

---

Anexo 2.5.	Especificaciones nominales del piranómetro CMP10 y del SPN1 .....	83
Anexo 2.6.	Modelo de cielo claro.....	84
Anexo 2.7.	Modelos de Cielo .....	86
Anexo 2.7.1.	Modelo de cielo isotrópico.....	86
Anexo 2.7.2.	Modelo de Hay-Davies .....	87
Anexo 2.7.3.	Modelo de Klucher .....	88
Anexo 2.7.4.	Modelo de Reindl.....	89
Anexo 2.7.5.	Modelo <i>Perez Point Source</i> (PPS).....	89
Anexo 2.7.6.	Modelo <i>Perez All-Weather</i> (PAW).....	92
Anexo 2.8.	Factor de vista.....	98
Anexo 2.8.1.	Factor de vista del suelo.....	100
Anexo 2.9.	Albedo.....	104
Anexo 3.1.	Análisis de regresiones .....	108
Anexo 4.1.	Comparación entre valores medidos y simulados con los modelos de cielo de acuerdo a la orientación de la superficie vertical.....	110
Anexo 4.2.	Simulación de los modelos de cielo de acuerdo a la cobertura de nubes .....	113
Anexo 4.3.	Modelo PPS con mejoras de Badosa <i>et al.</i> (2014) según la orientación.....	116

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1. Nomenclatura de los datos de radiación solar .....	11
Tabla 2.2. Tipos de modelos de cielo .....	19
Tabla 2.3. Modelos de cielo incorporados en los códigos de simulación energética .....	30
Tabla 2.4. Evaluación de modelos de cielo para la componente difusa .....	31
Tabla 3.1. Períodos de medición empleados en este estudio.....	37
Tabla 3.2. Fuentes de errores en la medición de la radiación solar .....	38
Tabla 3.3. Controles de calidad realizados a los datos medidos.....	39
Tabla 4.1. Datos Eliminados por las pruebas de calidad .....	47
Tabla 4.2. Datos totales y efectivos para la evaluación de desempeño de los modelos de cielo ..	47
Tabla A.2.1. Características operacionales de los piranómetros (ISO, 2018).....	82
Tabla A.2.2. Especificaciones nominales del CMP10 .....	83
Tabla A.2.3. Especificaciones nominales del SPN1.....	83
Tabla A.2.4. Clasificación del tipo de cielo según la claridad del cielo ( $\epsilon$ ) .....	91
Tabla A.2.5. Coeficientes de brillo de Perez et al. (1990) para cielo anisotrópico .....	91
Tabla A.2.6. Coeficientes estadísticos de Perez et al. (1993) para cielo anisotrópico .....	94
Tabla A.2.7. Estimaciones de albedo promedio encontrado en la literatura .....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Relaciones entre la Tierra y el sol. Adaptado de Iqbal (1983).....	8
Figura 2.2. Curva de irradiancia espectral adoptada por la WRC a la distancia promedio Tierra-Sol (Fuente: Duffie y Beckman, 2013).....	8
Figura 2.3. Interacción de la radiación solar en la superficie terrestre (Fuente: Stoffel, 2013) .....	9
Figura 2.4. Medición de la radiación solar en períodos despejados y cubiertos durante el 16 de Agosto de 2013 en Compiègne, Francia (adaptado de Merino, 2013) A) Radiación directa horizontal medida con un pirheliómetro B) Radiación global horizontal medida con un piranómetro C) Radiación difusa horizontal medida con un piranómetro con bola de sombra ....	10
Figura 2.5. Radiación global, difusa, directa y reflejada recibida sobre una superficie vertical orientada hacia el Oeste obtenida con un modelo de cielo claro.....	12
Figura 2.6. Geometría Solar. Adaptado de Duffie y Beckman (2013).....	13
Figura 2.7. Carta solar de Chillán (Marsh, 2018).....	14
Figura 2.8. Pirheliómetro montado sobre un seguidor solar modelo “Solys2” .....	15
Figura 2.9. Medición del albedo.....	16
Figura 2.10. Esquema de la distribución de la radiación difusa sobre el hemisferio celeste compuesta de radiación isotrópica, circunsolar y del horizonte.....	18
Figura 2.11. Vista estereográfica del cielo real y simulado con el modelo de cielo PAW para distintas condiciones de nubosidad. De izquierda a derecha: Cielo cubierto, cielo parcialmente cubierto y cielo despejado (Marsh, 2018). .....	20
Figura 2.12 Piranómetros sombreados con distintos dispositivos de sombreadamiento. A) Bola de sombra montada sobre seguidor solar Solys 2. B) Anillo de sombra.....	21
Figura 2.13. Imagen referencial del piranómetro CMP10 de Kipp and Zonen. ....	23
Figura 2.14. Medición diaria de los piranómetros CMP10 en las orientaciones Norte, Este y Oeste durante el 13/10/2018 .....	24
Figura 2.15. Fila superior: diferentes vistas del SPN1. Fila inferior: Numeración de los detectores del SPN1. Cielo visto bajo los patrones de sombra visto por el sensor 1 (izquierda), sensor 2 y 5 (medio) y sensores 3, 4, 5, 6 y 7 (derecha). Adaptado de Long <i>et al.</i> (2010) y Delta-T Devices Ltd. (2007).....	25



Figura 2.16. Medición de la componente global horizontal, difusa horizontal y directa normal medida con el SPN1 el 13/10/2018 .....	27
Figura 3.1. Lugar de emplazamiento de la estación radiométrica en Chillán. El polígono rojo representa los límites de las dependencias de la Universidad de Concepción Campus Chillán. ..	35
Figura 3.2. a) Estación radiométrica instalada en la Universidad de Concepción sede Chillán. b) Esquema de la estación radiométrica. En azul los piranómetros CMP10 y en amarillo el SPN1. .....	36
Figura 4.1. Superficies de irradiación (considerando solo la componente difusa) durante 36 días en Chillán, obtenidas con diferentes modelos de cielo.....	45
Figura 4.2. Radiación solar global medida por el CMP10 y la simulada con el modelo PPS, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Norte para un día claro, parcialmente cubierto y nublado. ....	51
Figura 4.3. Radiación solar global medida por el CMP10 y la simulada con el modelo PPS, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Este para un día claro, parcialmente cubierto y nublado. ....	52
Figura 4.4. Radiación solar global medida por el CMP10 y la simulada con el modelo PPS, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Oeste para un día claro, parcialmente cubierto y nublado. ....	53
Figura 4.5. R2 diario entre la radiación global medida y calculado por los modelos de cielo en las orientaciones Norte, Este y Oeste.....	54
Figura 4.6. R2 diario entre la radiación global medida y calculado por los modelos de cielo en las orientaciones Norte, Este y Oeste según la cobertura de nubes .....	55
Figura 4.7. Comparación de las mediciones de radiación global horizontal medidas con el CMP10 y el SPN1.....	56
Figura 4.8. Comparación entre la radiación solar simulada con el modelo PAW y la radiación medida, promediada en intervalos de 15 minutos después de aplicar factores de corrección.....	57
Figura A.2.1. Variación de la masa de aire óptica relativa con respecto al ángulo cenital del sol....	70
Figura A.2.2. Efectos de la dispersión y absorción atmosférica en la distribución espectral de la irradiancia solar. Adaptado de Iqbal (1983).....	71
Figura A.2.3. Variación del H y H2 durante el año.....	73
Figura A.2.4. Variación del KT durante el año.....	73

Figura A.2.5. Variación de radiación solar extraterrestre según la época del año .....	75
Figura A.2.6. Variación de la declinación durante el año .....	77
Figura A.2.7. Ecuación del tiempo E, en minutos en función del día del año .....	78
Figura A.2.8. Geometría solar. Adaptado de Duffie y Beckman (2013).....	79
Figura A.2.9. Radiación global horizontal para una día despejado medido con el SPN1 y simulado con el modelo de cielo claro. ....	85
Figura A.2.10. Relación entre $G_dT$ e $G_{dh}$ y su variación con respecto al ángulo de inclinación .	87
Figura A.2.11. Distribución de datos en Chillán durante un período de 180 días.....	92
Figura A.2.12. Subdivisión del hemisferio celeste en 144 parches.....	95
Figura A.2.13. Variación de la irradiación calculada durante 45 días en Chillán de acuerdo al mallado de cielo.....	96
Figura A.2.14. Definición de las variables del factor de vista para dos elementos infinitesimales de superficie.....	98
Figura A.2.15. Definición de las variables del factor de vista entre un elemento infinitesimal de superficie y una superficie delimitada.....	99
Figura A.2.16. Definición de variables de factor de vista para dos superficies delimitadas.....	99
Figura A.2.17. Variación del factor de vista del suelo con respecto al ángulo de inclinación de la superficie receptora.....	100
Figura A.2.18. Mallado del suelo (gris) en celdas de 0.5 x 0.5 m y malla de superficie vertical (rojo) de 0.1 x 0.1m ubicada a 1 m de altura ( $h=1$ m).....	101
Figura A.2.19. Factor de vista del suelo de cada parche de suelo .....	102
Figura A.2.20. Factor de vista del suelo acumulado de las regiones cercanas a la superficie receptora .....	102
Figura A.2.21. Distancia perpendicular a la superficie receptora en que se logra un FVS de 0.432 (90 % del valor teórico igual 0.5) con respecto a la altura en que se ubica.....	103
Figura A.2.22. Albedo del sitio de medición medido durante 11 días .....	105
Figura A.2.23. Albedo para cielo nublado ( $\epsilon < 2,8$ ).....	106
Figura A.2.24. Albedo para cielos claros y parcialmente cubiertos ( $\epsilon > 2,8$ ) .....	106
Figura A.4.1. Comparación entre los valores medidos por el CMP10 y los simulados con los modelos de cielo para la orientación Norte.....	110

Figura A.4.2. Comparación entre los valores medidos por el CMP10 y los simulados con los modelos de cielo para la orientación Oeste .....	111
Figura A.4.3. Comparación entre los valores medidos por el CMP10 y los simulados con los modelos de cielo para la orientación Este .....	112
Figura A.4.4. Radiación solar global, medida por el CMP10 y la simulada con los modelos de cielo, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Norte para un día claro, parcialmente cubierto y nublado.....	113
Figura A.4.5. Radiación solar global, medida por el CMP10 y la simulada con los modelos de cielo, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Este para un día claro, parcialmente cubierto y nublado.....	114
Figura A.4.6. Radiación solar global, medida por el CMP10 y la simulada con los modelos de cielo, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Oeste para un día claro, parcialmente cubierto y nublado.....	115
Figura A.4.7. Comparación entre valores medidos y simulados con el modelo PPS en la orientación Norte, Este y Oeste, tras la aplicación de los factores de corrección propuestos por Badosa et al 2014.....	116



**ALFABETO GRIEGO**

$\Phi$	Latitud
$\delta$	Declinación solar
$\omega$	Ángulo de la hora
$\omega_s$	Ángulo del atardecer
$\alpha_s$	Altura solar
$\gamma_s$	Acimut solar
$\theta$	Ángulo entre los rayos del sol y el vector normal de una superficie receptora
$\theta_z$	Ángulo cenital del sol con respecto al eje vertical
$\gamma$	Acimut de una superficie receptora
$\beta$	Inclinación de una superficie receptora
$\Delta$	Luminosidad del cielo
$\varepsilon$	Claridad del cielo
$\lambda$	Luminosidad relativa de un punto del cielo
$\xi$	Distancia angular entre el sol y algún punto del hemisferio
$\Phi$	Ángulo sólido de un parche de cielo
$\chi$	Ángulo entre el sol y un parche de cielo
$\rho$	Albedo

**NOMENCLATURA**

$G_{sc}$	Constante solar
$G_{on}$	Radiación extraterrestre
E	Ecuación del tiempo
$S_0$	Duración de asoleamiento
$K_t$	Índice de claridad
m	Masa de aire óptica relativa
n	Número del día del año
ts	Tiempo solar

$G_{gh}$	Radiación global horizontal instantánea
$G_{dh}$	Radiación difusa horizontal instantánea
$G_{bn}$	Radiación solar directa normal instantánea
$G_{bh}$	Radiación directa horizontal instantánea
$G_{gT}$	Radiación global instantánea sobre una superficie inclinada
$I_{gh}$	Radiación global horizontal integrada en una hora
$I_{dh}$	Radiación difusa horizontal integrada en una hora
$I_{bn}$	Radiación solar directa normal integrada en una hora
$I_{bh}$	Radiación directa horizontal integrada en una hora
$H_{gh}$	Radiación global horizontal integrada en un día
$H_{dh}$	Radiación difusa horizontal integrada en un día
$H_{bn}$	Radiación solar directa normal integrada en un día
$H_{bh}$	Radiación directa horizontal integrada en un día



## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

A escala mundial, el 30-40 % de la energía primaria es usada en el sector de edificación, siendo responsable del 40-50 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (Ramesh *et al.*, 2010). Es por esto que, para lograr un desarrollo sustentable, este sector requiere generar un bajo impacto ambiental, adaptando un enfoque multidisciplinario que cubra variados aspectos, tal como el uso mejorado de materiales (incluida el agua), reciclado de materiales, control de emisiones durante la construcción y el ahorro de energía durante la etapa de operación de las edificaciones. Chile ha enfrentado este desafío impulsado políticas en materia de eficiencia energética para el sector de edificación tales como los “Estándares de Construcción Sustentable para viviendas en Chile” (MINVU, 2016) y el sistema de “Calificación energética de viviendas” (MINVU, 2018). Así mismo, la Estrategia Nacional de Construcción Sustentable desarrollada por el MINVU (MINVU, 2013) en alineación con “La política Energética de Chile 2050” publicada por el Ministerio de Energía (MINENERGIA, 2015), plantean, entre otras metas, que el sector comercial, público y residencial reduzcan un 12 % de su consumo eléctrico al año 2020.

Para realizar diseños sustentables y para evaluar la eficiencia energética de una edificación se debe determinar su demanda de calefacción y de enfriamiento anual. Esto es un proceso complejo debido a la multidimensionalidad del problema, por lo que es útil realizar una simulación computacional a través de códigos de simulación energética. Dentro de los variados parámetros que entran en juego, la radiación solar es uno de los más importantes (Merino, 2013), ya que tiene implicancias directas en el consumo de energía de los edificios y en el dimensionamiento de sistemas solares activos. La radiación solar que incide sobre una superficie inclinada (por ejemplo, las fachadas y ventanas de edificaciones, y sistemas de captación de energía solar como colectores solares y paneles fotovoltaicos) se modela como la contribución de tres componentes: directa, difusa y reflejada. La radiación directa y reflejada no presentan grandes complicaciones en su cálculo, sin embargo, la radiación difusa requiere de modelos que distribuyen la radiación solar en el hemisferio celeste. Estos son los *sky models* o modelos de cielo en español (también conocidos como modelos

de transposición) que predicen la radiación solar difusa sobre superficies con cualquier inclinación y orientación a partir de datos de radiación solar registrados sobre una superficie horizontal.

Existe una amplia variedad de modelos de cielo, de naturaleza física y/o empírica, con variados grados de complejidad y sofisticación. Sin embargo, no existe un modelo establecido o aceptado por la comunidad científica que sea de aplicabilidad universal (Yang, 2016), ya que su desempeño depende de la naturaleza meteorológica y geográfica del sitio determinado. Por lo tanto, es imprescindible realizar validaciones de los modelos en lugares específicos, con el fin de encontrar el modelo óptimo que se adecúe al sitio de interés y que brinde confianza a los diseñadores y modeladores para simular la realidad. Un modelo no óptimo e incorrecto puede dirigir a errores en el dimensionamiento de sistemas de captación solar y de sistemas de climatización de edificaciones (Loutzenhiser *et al*, 2007).

Sin embargo, una limitación para realizar estas evaluaciones de los modelos de cielo es que requieren como entrada datos de radiación solar horizontal desagregada en sus componentes difusa y directa. Estos datos son medidos con instrumentos como piranómetros y pirheliómetros, los cuales poseen altos costos de adquisición y requieren de constante mantención. Sin embargo, una opción económica, que requiere poca mantención *in situ* y que entrega cada componente de la radiación solar es el piranómetro SPN1, el cual está clasificado en un rango intermedio de precisión según la ISO 9060 (2018). Por esto, este trabajo busca evaluar los modelos de cielo incorporados en los códigos de simulación energética usando datos de radiación solar horizontal obtenidos con el piranómetro SPN1 en la ciudad de Chillán.

## 1.2. Hipótesis de trabajo

Los modelos de cielo para la radiación solar difusa permiten obtener, a partir de datos de radiación horizontal medidos con el piranómetro SPN1, una alta precisión en la simulación de la radiación solar sobre superficies verticales en la ciudad de Chillán.

### 1.3. Objetivos

Evaluar el desempeño de los modelos de cielo utilizados en los códigos de simulación energética de edificaciones, en el cálculo de la radiación solar incidente sobre superficies inclinadas, a partir de datos de radiación solar horizontal medidos en la ciudad de Chillán con el piranómetro SPN1.

Para lograr el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- a) Identificar a través del estado del arte los principios teóricos y metodológicos de los modelos de transposición de radiación solar.
- b) Montar una estación radiométrica equipada con un piranómetro SPN1 montado sobre superficie horizontal para la medición de la componente global, difusa y directa de la radiación solar; y piranómetros CMP10 en posición vertical para la evaluación de los modelos de cielo.
- c) Crear una base de datos de radiación solar sobre superficie horizontal, desagregada según sus componentes, que cumplan con criterios de control de calidad.
- d) Implementar los algoritmos de cálculo de los distintos modelos de cielo en un programa desarrollado en MATLAB®.
- e) Evaluar a través de un análisis estadístico el desempeño de los modelos de cielo, al comparar los valores simulados con los datos medidos en superficies verticales orientadas hacia el Norte, Este y Oeste.

### 1.4. Metodología de trabajo

En primer lugar, se realizó una revisión del estado del arte de los modelos de cielo de la radiación solar, para identificar las formas funcionales y determinar las variables necesarias para asegurar



cierto nivel de exactitud. Luego, se diseñó e instaló una estación radiométrica para la obtención de datos de radiación solar en la Universidad de Concepción, Campus Chillán. Para ello se dispuso de cuatro sensores: un piranómetro SPN1 ubicado en posición horizontal para la medición de la radiación solar global, directa y difusa, que son los datos de entrada de los modelos de cielo; Y tres piranómetros CMP10 para la medición de la radiación solar global ubicado sobre superficies verticales orientados hacia el Norte, Este y Oeste. Las mediciones fueron realizadas entre el 4 de octubre del 2018 y el 9 de mayo del 2019. Durante una parte de este período, uno de los sensores fue ubicado mirando hacia abajo, enfrentando el suelo, con el fin de medir el albedo del lugar. Los datos fueron sometidos a un control de calidad con el fin de eliminar los datos erróneos producto de la manipulación del sensor y los inherentes a los instrumentos utilizados. Finalmente, se implementaron los algoritmos de cálculo de los distintos modelos en el programa MATLAB®, para simular la radiación solar sobre superficies verticales y compararlas con los datos medidos en las tres orientaciones. Finalmente, la evaluación del desempeño de los modelos se realizó con el análisis de indicadores estadísticos.



### 1.5. Principales resultados y conclusiones

La estación radiométrica instalada en Chillán permitió la caracterización del recurso solar y la obtención detallada de datos de radiación solar en cada una de sus componentes: global, difusa y directa. Los controles de calidad mostraron que los datos obtenidos con el piranómetro SPN1 son bastante confiables, ya que prácticamente todos los datos superaron las pruebas, siendo descartados principalmente los valores nocturnos y los cercanos al amanecer y al atardecer. Por otro lado, la estación permitió la medición del albedo *in situ*, lo que asegura un buen nivel de precisión en el cálculo de la radiación reflejada.

La implementación en MATLAB® de los algoritmos de cálculo de la radiación solar sobre superficies inclinadas permitió la evaluación estadística del desempeño de los modelos de cielo. Esto permite encontrar el modelo óptimo para obtener resultados confiables en la estimación de la radiación solar sobre superficies inclinadas y así asegurar, por ejemplo, el correcto dimensionamiento de sistemas solares activos y la determinación del ángulo de inclinación que

maximiza su captación solar, el dimensionamiento de sistemas de calefacción y enfriamiento de edificios, y el correcto diseño y evaluación del comportamiento térmico y lumínico de edificaciones para asegurar el confort de los usuarios. Varios autores han realizado validaciones de los modelos de cielo en distintos lugares del planeta, sin embargo, este trabajo presenta la primera evaluación en latitudes medias del hemisferio sur utilizando instrumentos de alto estándar.

Se encontró que el modelo PSS presenta el mejor desempeño, seguido muy estrechamente por el modelo PAW, por lo tanto, se recomienda su uso en los códigos de simulación energética. Los modelos de Hay-Davies y el de Reindl poseen en general un buen desempeño, y tienen la ventaja de ser más rápidos computacionalmente, ya que son más sencillos que los modelos PPS y PAW. Por otro lado, el peor desempeño lo obtuvo el modelo isotrópico y el modelo de Klucher.

Se debe considerar que este trabajo se realizó bajo un contexto sin obstrucciones a la visibilidad de cielo, es decir, sin superficies que bloquearan el paso directo de los rayos solares, tales como edificaciones cercanas o relieve natural. Además, la superficie de suelo circundante al lugar de medición corresponde a pasto natural, sin heterogeneidades lo que supone un ambiente distinto al contexto urbano tradicional, en donde se encuentran superficies vidriadas, planas y brillantes que pueden producir un efecto anisotrópico en la radiación refleja. Por lo anterior, es que se hace necesaria, en trabajos futuros, la evaluación de los modelos bajo un contexto urbanizado, con la presencia de obstrucciones a la visibilidad del cielo.

## **1.6. Organización de la tesis**

La tesis se organiza en cinco capítulos. En el Capítulo 2, se presentan las características y conceptos básicos de la radiación solar, además, se expone la base teórica sobre la cual se sustentan los modelos de cálculo de radiación solar sobre superficies inclinadas. Además, se presentan los equipos para la medición de la radiación solar y diversos estudios sobre la evaluación del desempeño de los modelos de cielo. El Capítulo 3 presenta la configuración experimental utilizada para la caracterización del recurso solar en la ciudad de Chillán, el control de calidad de los datos medidos y los criterios de evaluación de los modelos de cielo. En el Capítulo 4, se realiza el análisis

y la evaluación del desempeño de los modelos en base a la comparación con los datos de radiación solar medidos sobre superficies verticales orientadas hacia el Norte, Este y Oeste. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y comentarios finales.

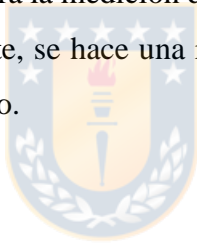


## CAPÍTULO 2      RADIACIÓN SOLAR

### 2.1.      Introducción

La radiación solar es un dato de entrada importante en los códigos de simulación energética, estos últimos permiten determinar la demanda de calefacción y/o enfriamiento de una edificación y el potencial solar para aprovechamiento activo. Los datos disponibles comúnmente corresponden a valores medidos sobre superficie horizontal, sin embargo, para una superficie inclinada (como la ventana de una casa, o paneles solares) se requiere utilizar distintos modelos que transpongan la radiación solar horizontal en radiación solar inclinada.

En este capítulo se presentan las bases metodológicas para tratar cada componente de la radiación solar que incide sobre una superficie inclinada, estas son la componente directa, difusa y reflejada. Se presentan los equipos utilizados para la medición de la radiación solar y los que se ocuparon en el contexto de este trabajo. Finalmente, se hace una revisión del estado del arte de la evaluación del desempeño de los modelos de cielo.



### 2.2.      Radiación solar

El sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de 1.39 millones de kilómetros ubicada a una distancia media de una unidad astronómica (1 UA es equivalente a 149.5 millones de kilómetros), y es orbitada por la Tierra en una trayectoria elíptica, tal como se observa en la Figura 2.1. La temperatura en su zona central es diversamente estimada desde  $8 \times 10^6$  a  $40 \times 10^6$  K y su densidad es estimada en 100 veces mayor a la del agua. El sol es, en efecto, un reactor de fusión continuo, con sus gases constitutivos funcionando como un “recipiente de contención”, el que es retenido por fuerzas gravitacionales. En el interior del sol (el núcleo) ocurren varias reacciones de termofusión. El grupo de reacciones considerada como la más importante es el ciclo de Bethe, en donde cuatro protones de hidrógeno se combinan para formar un núcleo de helio. En este proceso la materia es transformada en energía, la cual se libera a través del espacio en forma de radiación solar.

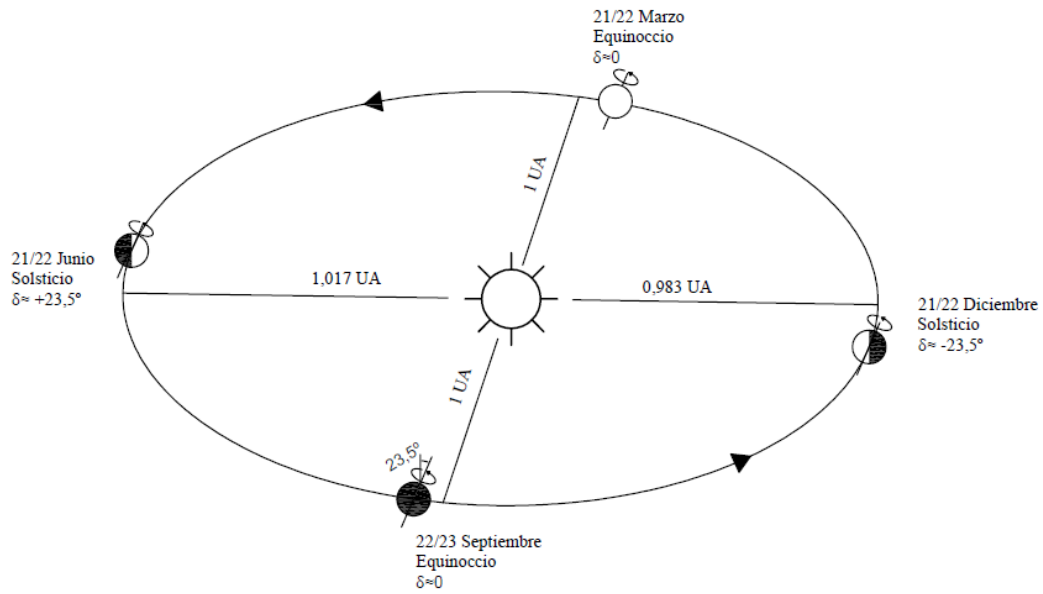


Figura 2.1. Relaciones entre la Tierra y el sol. Adaptado de Iqbal (1983)

La radiación solar se distribuye en el rango espectral de 250 a 5000 nm del espectro electromagnético. En este rango de longitudes de onda se encuentran la luz visible (39.8 % de la energía emitida por el sol), radiación ultravioleta UV (9.0 %) e infrarroja (51.2 %) (Monteith y Unsworth, 2010). En la Figura 2.2 se presenta la curva de irradiancia espectral en la parte superior de la atmósfera, basado en el estándar adoptado por el *World Radiation Center* (Centro Mundial de Radiación; WRC por sus iniciales en inglés).

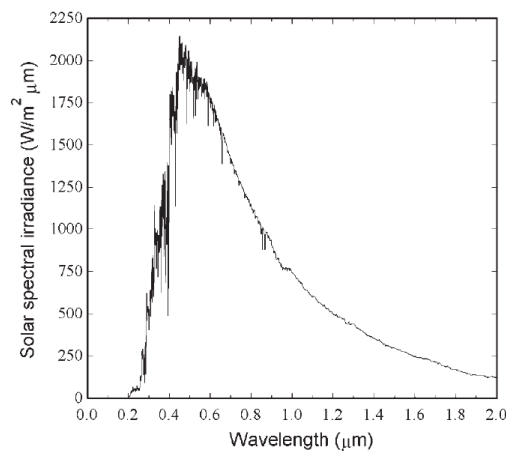


Figura 2.2. Curva de irradiancia espectral adoptada por la WRC a la distancia promedio Tierra-Sol (Fuente: Duffie y Beckman, 2013)

De la Figura 2.2, se puede observar que el valor máximo de radiación solar se alcanza en la longitud de onda de 500 nm, la cual corresponde al color verde-amarillo del espectro de la luz visible. Además, la energía acumulada hasta los 2000 nm de longitud de onda corresponde al 94.2 % de la energía total que se recibe a las afueras de la atmósfera terrestre.

### 2.3. Radiación solar incidente sobre la superficie terrestre

La radiación solar que ingresa a la superficie terrestre tiene dos componentes: la radiación directa y la radiación difusa. La radiación directa corresponde a los rayos solares que provienen del disco solar y cuya dirección no cambia hasta llegar a la superficie terrestre. Por otro lado, la radiación difusa corresponde a los rayos solares que, al interactuar con la atmósfera terrestre, cambian su dirección dispersándose en todo el hemisferio celeste. Una parte de la radiación solar es absorbida por la atmósfera, principalmente por moléculas de ozono, vapor de agua y dióxido de carbono (en el Anexo 2.1 se presentan más detalles de la dispersión y absorción atmosférica).

Una superficie inclinada recibe, además de la componente directa y difusa, una componente reflejada producto de la reflexión de la radiación solar en el suelo y el contexto cercano. La suma de la componente directa, difusa y reflejada se conoce como componente global de la radiación solar. La Figura 2.3 muestra la interacción de la radiación solar que llega a la Tierra.

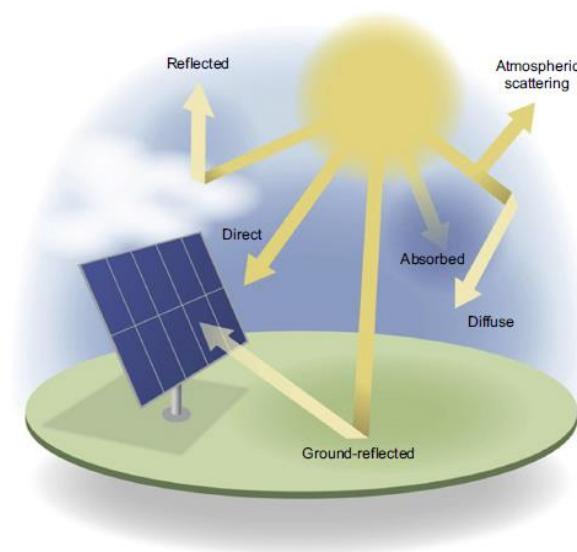


Figura 2.3. Interacción de la radiación solar en la superficie terrestre (Fuente: Stoffel, 2013)

Los instrumentos para la medición de la radiación solar son de dos tipos básicos: el pirheliómetro y el piranómetro. Un pirheliómetro es un instrumento que usa un detector colimado para medir la radiación directa del sol y una pequeña porción del cielo alrededor del sol, con incidencia normal. Por otro lado, un piranómetro es un instrumento para medir la radiación hemisférica total o componente global (directa más difusa), usualmente sobre un plano horizontal. Si la radiación directa es sombreada con un anillo o disco de sombra, un piranómetro puede medir la radiación difusa. Los sensores miden la radiación en el rango espectral de 300 a 3000 nm, el cual puede variar ligeramente dependiendo del equipo con que se mida. Este rango de medición corresponde al 97 % de la energía recibida desde el sol (WMO, 2012).

La Figura 2.4 muestra la medición de las componentes de la radiación solar a través de pirheliómetros y piranómetros durante el 16 de agosto de 2013 en Compiègne, Francia (latitud geográfica de 49.4° N, longitud geográfica de 2.81°E y altitud de 41 msnm). Se puede observar cómo varía la radiación solar de acuerdo a la nubosidad del cielo, desde un cielo despejado (desde las 7:00 hasta las 15:00), pasando por un cielo parcialmente cubierto de nubes (desde las 15:00 hasta las 17:30), hasta un cielo totalmente cubierto (desde las 17:30 hasta las 21:00). Cuando aparece nubosidad, la radiación directa disminuye mientras que la radiación difusa aumenta. Esto se observa con claridad en un cielo totalmente cubierto, donde la radiación global es mayoritariamente radiación difusa.

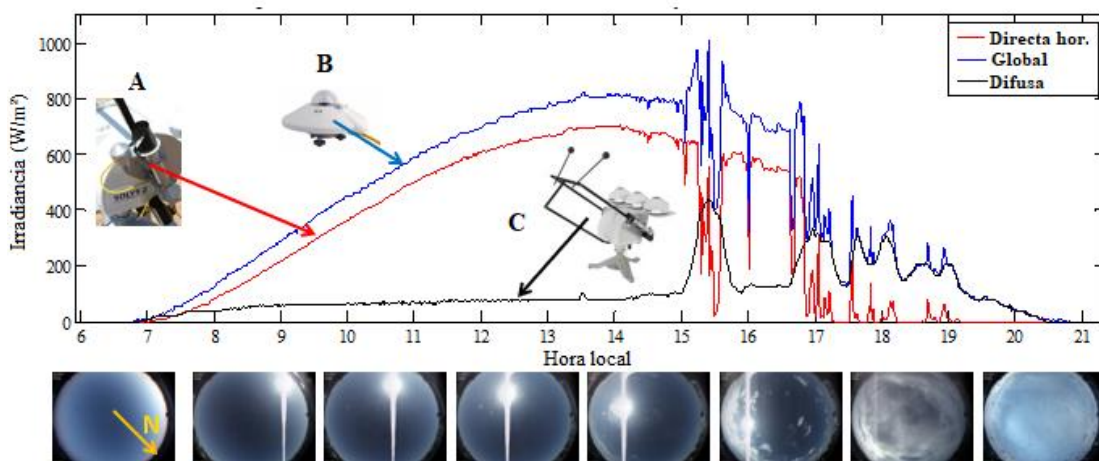


Figura 2.4. Medición de la radiación solar en períodos despejados y cubiertos durante el 16 de Agosto de 2013 en Compiègne, Francia (adaptado de Merino, 2013) A) Radiación directa horizontal medida con un pirheliómetro B) Radiación global horizontal medida con un piranómetro C) Radiación difusa horizontal medida con un piranómetro con bola de sombra

La radiación solar que ingresa a la superficie terrestre se le conoce como irradiancia, y se define como la cantidad de radiación incidente sobre una superficie por unidad de área ( $W/m^2$ ). Al integrar la irradiancia durante un período específico de tiempo, usualmente en una hora o un día, se obtiene la energía incidente por unidad de área ( $J/m^2$  o  $Wh/m^2$ ), a esta cantidad se le conoce como irradiación. Usualmente las salidas de los piranómetros y pirheliómetros corresponden a una o ambas unidades.

De esta manera, la gestión de los datos de radiación solar se puede clasificar según la agregación temporal de la siguiente manera:

- a) valores instantáneos de radiación solar ( $W/m^2$ ),
- b) valores integrados para cada hora del día ( $Wh/m^2$ ),
- c) valores integrados para cada día del año ( $Wh/m^2$ )

La letra G mayúscula se usa para la irradiancia solar designándole subíndices para radiación global (g), difusa (d), directa (b) o fuera de la atmósfera (o). Además, se utilizan índices complementarios para referirse a la radiación en una superficie horizontal (h), inclinada (T) o normal (n) a la luz solar. Para la irradiación, se utiliza la letra I para la energía recibida durante una hora, mientras que la letra H para la energía recibida durante un día, aceptándose en ambos casos los subíndices utilizados para la irradiancia. La Tabla 2.1 muestra un resumen de la nomenclatura para los datos de radiación solar.

Tabla 2.1. Nomenclatura de los datos de radiación solar

Radiación solar	Agregación temporal		
	Instantánea	Horaria	Diaria
Global	$G_{gh}$	$I_{gh}$	$H_{gh}$
Difusa	$G_{dh}$	$I_{dh}$	$H_{dh}$
Directa normal	$G_{bn}$	$I_{bn}$	$H_{bn}$
Directa horizontal	$G_{bh}$	$I_{bh}$	$H_{bh}$

Adaptación de Merino (2013)



Las bases de datos de radiación solar obtenidas con los instrumentos de medición se componen usualmente de valores medidos sobre una superficie horizontal, sin embargo, la mayoría de las aplicaciones ingenieriles requieren estimar la radiación solar sobre superficies con cualquier inclinación y orientación. Por ejemplo, un colector solar fotovoltaico ubicado en Concepción podría estar inclinado 25 grados respecto de la horizontal y orientado hacia el ecuador (o la dirección Norte) para maximizar la captación solar anualmente. Otro ejemplo típico, es una ventana de una edificación que tiene normalmente una inclinación de 90 grados respecto de la horizontal, es decir vertical y una orientación cualquiera. En estos casos, para calcular la radiación solar total incidente sobre la superficie de interés se debe determinar cada una de las componentes de la radiación solar por separado. La Figura 2.5 muestra la componente directa, difusa, y reflejada de la radiación solar que se recibe en un día teórico completamente despejado sobre una ventana orientada hacia el Oeste. Además, en la misma imagen se muestra la componente global o total que corresponde a la suma de las tres componentes mencionadas (El modelo de cielo para obtener la radiación solar en días teóricos despejados se encuentra detallado en el Anexo 2.8). Se observa que la radiación directa (en amarillo) se recibe después del mediodía solar debido a que la superficie comienza a ver el sol a partir de esa hora. Por otra parte, la radiación difusa y reflejada inciden sobre la superficie durante todo el día.

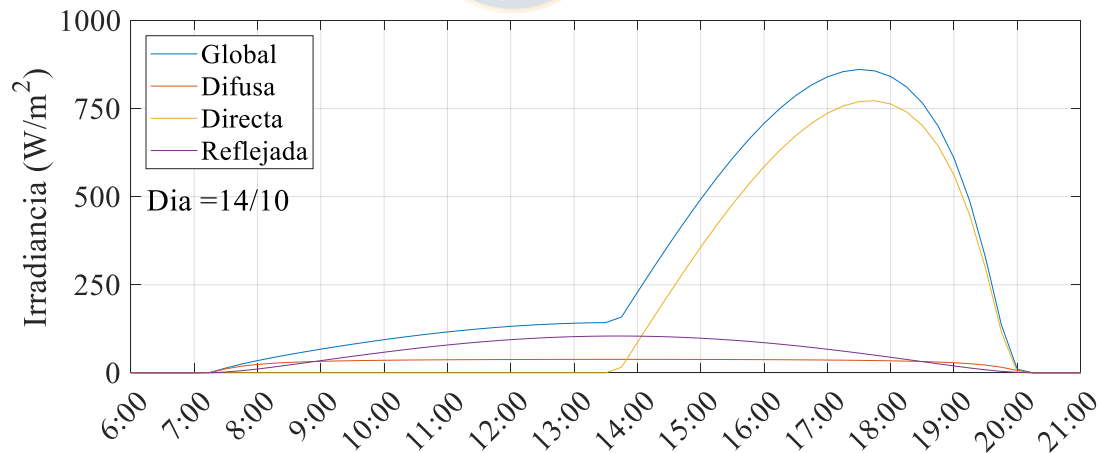


Figura 2.5. Radiación global, difusa, directa y reflejada recibida sobre una superficie vertical orientada hacia el Oeste obtenida con un modelo de cielo claro

La radiación directa se calcula de forma sencilla, ya que depende de la posición del sol y la superficie. Esto no ocurre con la componente difusa, que requiere del uso de modelos matemáticos llamados “Modelos de cielo”, o también denominados modelos de transposición. Las siguientes

secciones describen cómo trabajar con la componente directa, difusa y reflejada que incide sobre una superficie inclinada.

### 2.4. Radiación directa

La radiación directa que incide sobre una superficie con inclinación ( $I_{b,T}$ ) es igual a la componente perpendicular o normal de la radiación solar directa incidente en esta superficie. Esta descomposición vectorial de la radiación solar se calcula como el coseno del ángulo de incidencia ( $\theta$ ) entre el vector normal a la superficie y los rayos solares que inciden de forma normal según la siguiente expresión:

$$G_{b,T} = G_{bn} \cos \theta \tag{2.1}$$

El ángulo de incidencia ( $\theta$ ) es el formado entre el vector de la radiación directa y el vector normal a la superficie receptora. Para obtener el ángulo de incidencia se requiere conocer los ángulos que describen la trayectoria solar, como los que se observan en la Figura 2.6

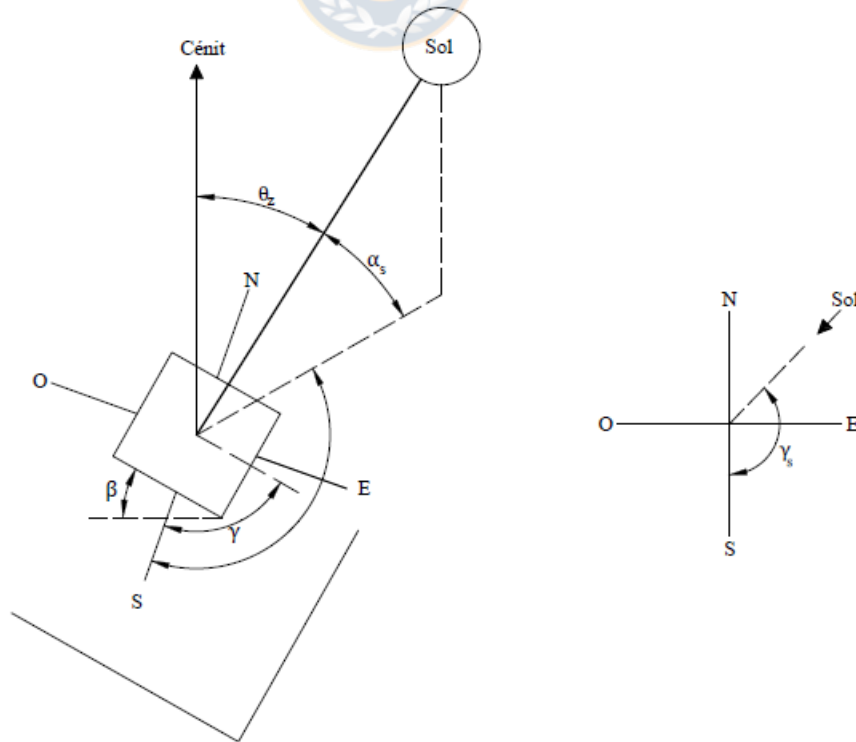


Figura 2.6. Geometría Solar. Adaptado de Duffie y Beckman (2013)

El vector de la radiación solar cambia continuamente en el día y durante el año de acuerdo a la trayectoria del sol. La trayectoria solar se puede apreciar a través de una herramienta llamada carta solar, la cual muestra la proyección estereográfica del recorrido del sol en una esfera. La carta solar de Chillán se observa en la Figura 2.7, por el eje vertical del gráfico pasan los círculos concéntricos que designan la altura solar, es decir, el ángulo de elevación del sol sobre la horizontal. En el perímetro del gráfico polar se designa el azimut solar, es decir, el desplazamiento angular de la proyección del vector del sol en un plano horizontal, medido desde el Norte.

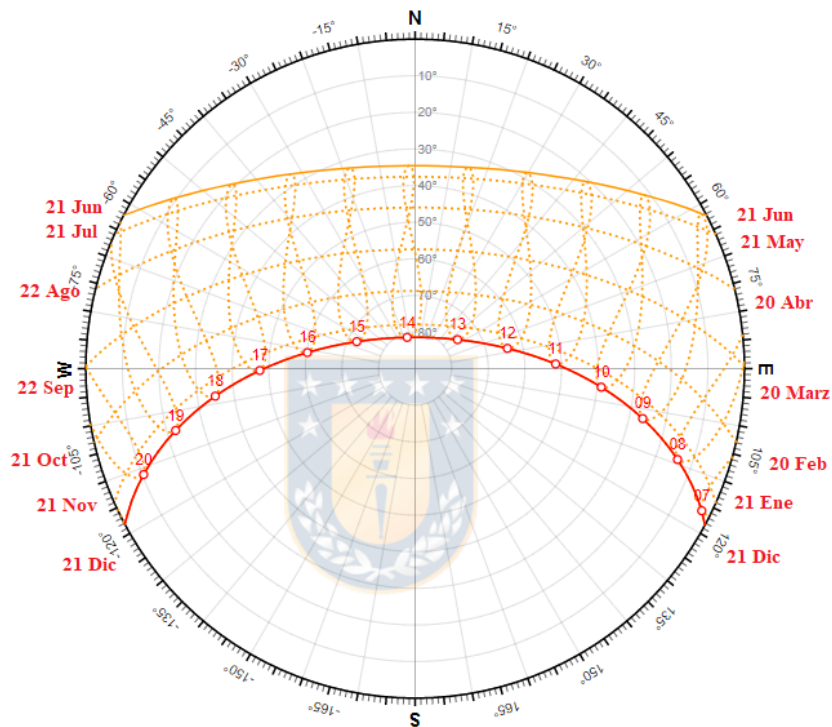


Figura 2.7. Carta solar de Chillán (Marsh, 2018)

Las curvas horizontales (en naranja) representan algunos días del año, que van desde el solsticio de invierno (21 de junio) hasta el solsticio de verano (21 de diciembre). Las curvas en verticales (con forma de analema) representan las horas del día. Se puede observar que, en el solsticio de verano la duración del día es la mayor del año, con un amanecer cercano a las 7:00 y un atardecer cercano a las 21:00. La duración del día disminuye hasta su mínimo anual en el solsticio de invierno, con un amanecer cercano a las 9:00 y atardecer cercano a las 19:00. Por otro lado, la altura solar aumenta durante el día hasta alcanzar su valor máximo en el mediodía solar (eje vertical de la carta solar). La altura solar para una hora específica también cambia durante el año, en el mediodía solar

para el solsticio de verano alcanza su máximo con  $77.4^\circ$  y va disminuyendo hasta su mínimo de  $30.6^\circ$  en el solsticio de invierno.

El ángulo ( $\theta$ ) también se puede obtener haciendo el producto escalar entre el vector de la posición del sol ( $\hat{S}$ ) y el vector normal a la superficie ( $\hat{N}$ ) de acuerdo con la Ecuación 2.2. Este producto escalar es negativo si el sol está detrás de la superficie ( $\theta > 90$ ).

$$\theta = \arccos \left( \frac{\hat{S}_s \cdot \hat{N}}{\|\hat{S}_s \cdot \hat{N}\|} \right) \quad (2.2)$$

La posición del sol y el ángulo de incidencia se pueden obtener de manera analítica a través de un conjunto de ángulos (Benford y Block, 1939). Estos ángulos están descritos en el Anexo 2.3.

Para medir la radiación directa se utiliza un instrumento llamado pirheliómetro. Este instrumento posee una apertura estrecha (generalmente entre  $5^\circ$  a  $6^\circ$  de ángulo sólido), lo que permite detectar solo la radiación directa, con alguna contribución circumsolar inadvertida de la aureola solar, pero que excluye toda la radiación difusa del resto del cielo (WMO, 2012). Los pirheliómetros deben apuntar directamente al sol y seguir su trayectoria durante el día, por lo tanto, se montan sobre un dispositivo especializado denominado seguidor solar. Los sensores del pirheliómetro están siempre normales a la radiación directa, por lo tanto, la salida de estos instrumentos corresponde a la radiación directa normal ( $G_{bn}$ ). La Figura 2.8 muestra una imagen referencial de un pirheliómetro tipo CHP1 de la marca “Kipp and Zonen” montado sobre un seguidor solar.

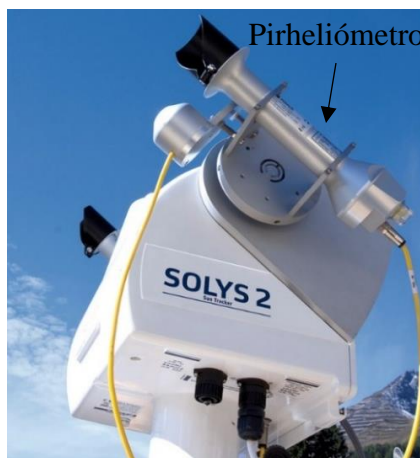


Figura 2.8. Pirheliómetro montado sobre un seguidor solar modelo “Solys2” (Kipp and Zonen, 2010)

## 2.5. Radiación reflejada

La componente reflejada corresponde a la radiación total que incide sobre el suelo y el contexto cercano que es reflejada hacia una superficie receptora. Esta componente se calcula con la siguiente expresión:

$$G_{T,g} = FVS \rho_g G_{gh} \quad (2.3)$$

En donde  $G_{gh}$  es la radiación global horizontal,  $\rho_g$  es el albedo del suelo y FVS es el factor de vista del suelo. El factor de vista del suelo es una cantidad geométrica que describe el intercambio radiativo difuso entre el suelo y una superficie de interés. El FVS para una superficie horizontal es cero, debido a que la superficie no ve el suelo, mientras que para una superficie vertical el FVS es igual a 0.5. El Anexo 2.7 profundiza acerca del factor de vista.

El albedo, también conocido como reflectividad o reflectancia, se refiere a la capacidad que tiene una superficie de reflejar la radiación solar incidente. Técnicamente es el porcentaje de radiación solar que refleja cualquier superficie respecto de la radiación total que incide sobre ella. El albedo del suelo puede ser medido usando dos piranómetros en posición horizontal (como se observa en la Figura 2.9), uno con la cara hacia arriba enfrentando el cielo midiendo la radiación global ( $G_{gh}$ ) y el otro con la cara hacia abajo enfrentando el suelo midiendo la radiación global reflejada ( $G_{Rh}$ ), y posteriormente, calculando la razón entre ambas mediciones.

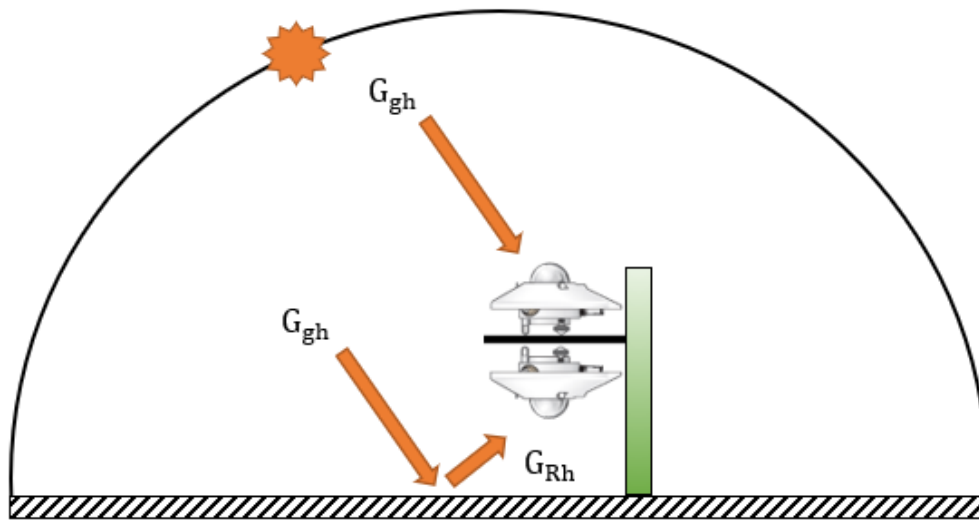


Figura 2.9. Medición del albedo

Una práctica de ingeniería típica es utilizar un valor promedio de albedo igual a 0.2 (Liu y Jordan, 1963). Sin embargo, esto puede inducir a errores en el cálculo de la radiación total que incide sobre superficies inclinadas, por lo tanto, para obtener resultados satisfactorios, es necesario usar un albedo medido *in-situ* (Ineichen *et al.*, 1987). El Anexo 2.9 presenta algunos valores típicos del albedo encontrados en la literatura, según el tipo de cobertura de suelo. Además, se muestra el albedo medido en el lugar de emplazamiento de la estación radiométrica ocupada en esta tesis.

## 2.6. Radiación difusa

Los rayos solares provenientes del sol al ingresar a la atmósfera son absorbidos, transmitidos y dispersados por las partículas presentes en ella. Este último fenómeno consiste en un redireccionamiento de los rayos solares, lo que genera la propagación de estos en múltiples direcciones. Así, un objeto receptor de este tipo de radiación sobre la superficie terrestre consideraría que el cielo, modelado como un hemisferio, emite radiación solar difusa.

El modelo más sencillo de distribución de la radiación solar difusa sobre el hemisferio del cielo es el isotrópico, es decir que cualquier parte del hemisferio emite la misma radiación (Liu y Jordan, 1960). Mediciones empíricas de la radiación solar difusa emitida por el hemisferio del cielo han arrojado que éste no se comporta de manera isotrópica. Incluso bajo condiciones de nubosidad perfecta, la radiación emitida por la bóveda celeste se incrementa desde el horizonte hacia el cénit (Moon y Spencer, 1942). Por otro lado, en condiciones de cielo completamente despejado, existe una zona en la vecindad del sol (circunsolar) y otra en la línea del horizonte donde se concentra la radiación solar difusa. La Figura 2.10 presenta un esquema de la distribución de la radiación difusa sobre el hemisferio celeste compuesta de radiación difusa isotrópica, circunsolar y del horizonte.

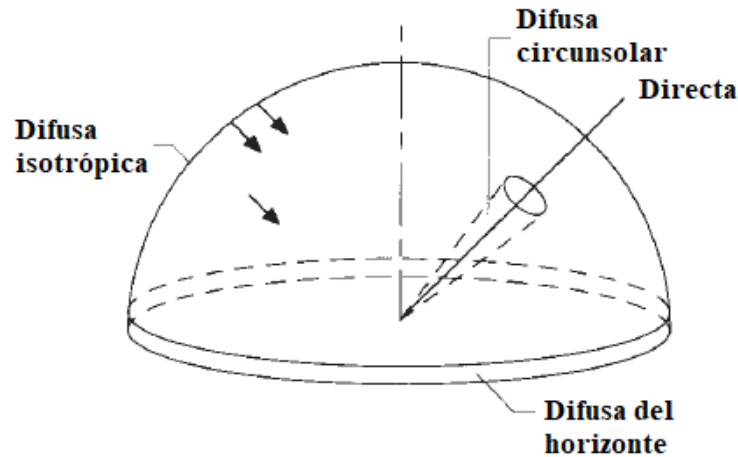


Figura 2.10. Esquema de la distribución de la radiación difusa sobre el hemisferio celeste compuesta de radiación isotrópica, circumsolar y del horizonte (Adaptado de Duffie y Beckman, 2013)

La distribución de la radiación solar difusa sobre el hemisferio de la bóveda celeste bajo distintas condiciones de nubosidad se determina con modelos de cielo. Éstos difieren entre sí en la manera en que incorporan las componentes anisotrópicas, encontrándose modelos de una componente (isotrópica), de dos componentes (isotrópica + circumsolar) y de tres componentes (isotrópica + circumsolar + horizonte).

Además, existen modelos de cielo desarrollados para aplicaciones de simulación de luz natural que, a diferencia de los modelos por componentes que determinan la radiación solar por zonas de la bóveda celeste, describen la radiación solar difusa que emite cualquier punto del hemisferio celeste. Por esta razón reciben el nombre de modelos de distribución continua. La Tabla 2.2 muestra algunos modelos de cielo clasificados según la manera en que distribuyen la radiación solar difusa. Para una lista más extensa de los tipos de modelo de cielo, se puede consultar los trabajos de Merino (2013), Demain *et al* (2013) y Yang (2016).

Tabla 2.2. Tipos de modelos de cielo

Modelos de cielo	Componentes de anisotropía incorporadas			Distribución continua
	Isotrópico	Circunsolar	Horizonte	
Liu y Jordan (1960)	•			
Koronakis (1986)	•			
Bugler (1977)	•	•		
Steven y Unsworth (1980)	•	•		
Hay y Davies (1980)	•	•		
Willmott (1982)	•	•		
Temps y Coulson (1977)	•	•	•	
Klucher (1979)	•	•	•	
Skartveit y Olsen (1986)	•	•	•	
Perez <i>et al.</i> (1990)	•	•	•	
Muneer (1990)	•	•	•	
Reindl <i>et al.</i> (1990)	•	•	•	
Brunger y Hooper (1993)				•
Perez <i>et al.</i> (1993)				•
Igawa <i>et al.</i> (2004)				•

Para los propósitos de este trabajo, se eligieron seis de los modelos de cielo más utilizados, y que se encuentran implementados en la mayoría de los códigos de simulación energética: el isotrópico (Liu y Jordan, 1960), Klucher (1979), Hay y Davies (1980), Reindl (1990), *Perez Point Souce* (PPS por sus iniciales en inglés) desarrollado por Perez *et al.* (1990) y *Perez All-Weather* (PAW por sus iniciales en inglés) desarrollado por Perez *et al.* (1993). La formulación matemática y los algoritmos de cálculo que permiten implementar estos modelos se encuentran detallados en el Anexo 2.7.

La Figura 2.11 muestra la distribución anisotrópica de la radiación solar difusa obtenida con el modelo PAW para distintas condiciones de cielo. El hemisferio celeste está discretizado en parches (parte inferior de la figura), en donde cada uno de ellos está emitiendo radiación difusa en distintas



intensidades. Los colores cálidos corresponden a zonas del cielo que emiten más radiación difusa y los colores fríos corresponden a zonas que emiten menos radiación.

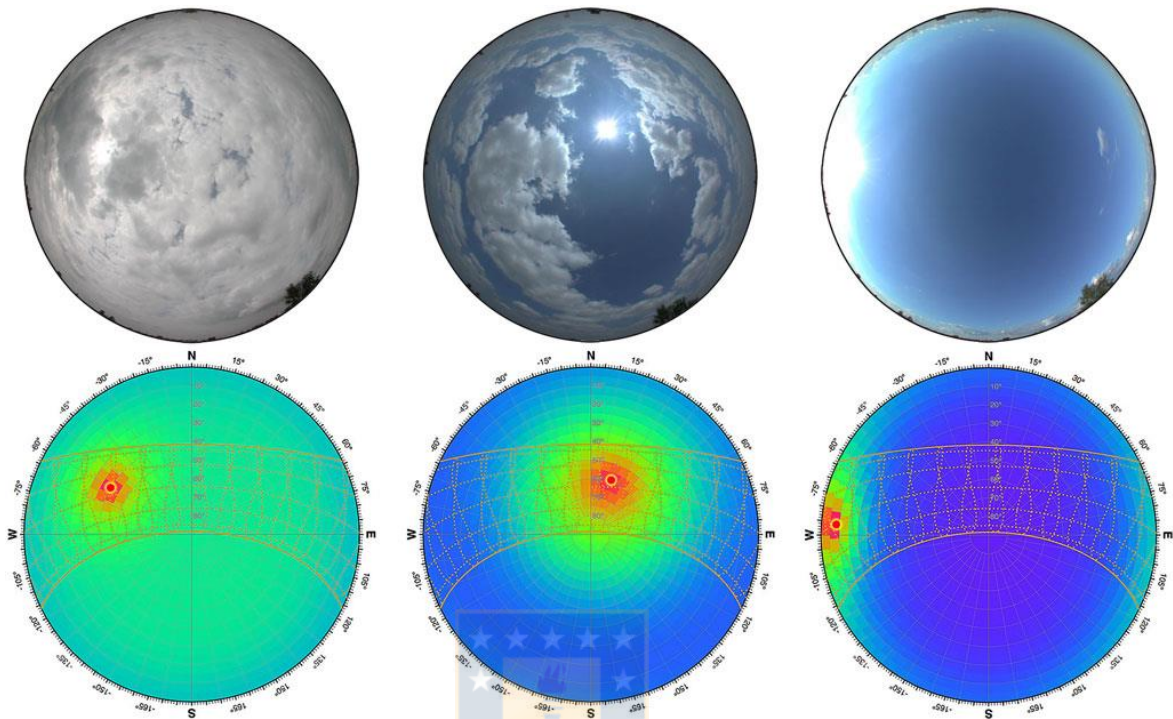


Figura 2.11. Vista estereográfica del cielo real y simulado con el modelo de cielo PAW para distintas condiciones de nubosidad. De izquierda a derecha: Cielo cubierto, cielo parcialmente cubierto y cielo despejado (Marsh, 2018).

La radiación difusa emitida es mayor en las vecindades del sol, incluso cuando el cielo está cubierto de nubes (izquierda de la figura). Para cielos nublados, la distribución de la radiación es más homogénea que en otras condiciones de cielo. Para días completamente despejados (derecha de la figura), se puede observar una contribución más alta de radiación difusa en las zonas cercanas al horizonte en comparación con la zona cenital. Mediciones empíricas muestran que este comportamiento se acentúa al amanecer y atardecer o cuando el sol está cerca del horizonte (Temps y Coulsen, 1977).

## 2.7. Medición de la radiación difusa

La radiación solar se mide usando un instrumento llamado piranómetro que mide su intensidad, para esto tiene un campo de visión de  $180^\circ$  en todas las direcciones, es decir hemisférica. Este campo de visión inherente del instrumento no debe confundirse con el campo libre de visión que depende del lugar de instalación y de las obstrucciones presentes en el entorno.

El piranómetro mide la intensidad de toda la energía solar incidente sobre él sin discriminar entre los tipos de radiación: directa, difusa y reflejada. Por lo tanto, para medir la radiación solar difusa se debe bloquear la radiación directa del sol con un dispositivo especializado, el cual puede ser una bola o una banda sombreadoras. La bola sombreadora es un dispositivo esférico que sombrea la radiación proveniente del disco solar, por lo tanto, debe estar montada sobre un seguidor solar que apunte hacia la posición del sol durante cada instante del día. La Figura 2.12 muestra un piranómetro sombreado con una bola de sombra, montado sobre un seguidor solar tipo Solys 2 de la marca “Kipp and Zonen”. Por otro lado, las bandas fijas son una solución económica, ya que no necesitan estar montadas sobre un seguidor solar. Sin embargo, la banda sombreadora entrega mayores errores que la bola sombreadora, ya que cubre toda una zona del cielo. Por lo tanto, sólo los métodos de sombreado con seguimiento solar son usados en las estaciones radiométricas con fines de investigación (Gueymard y Myers, 2008).

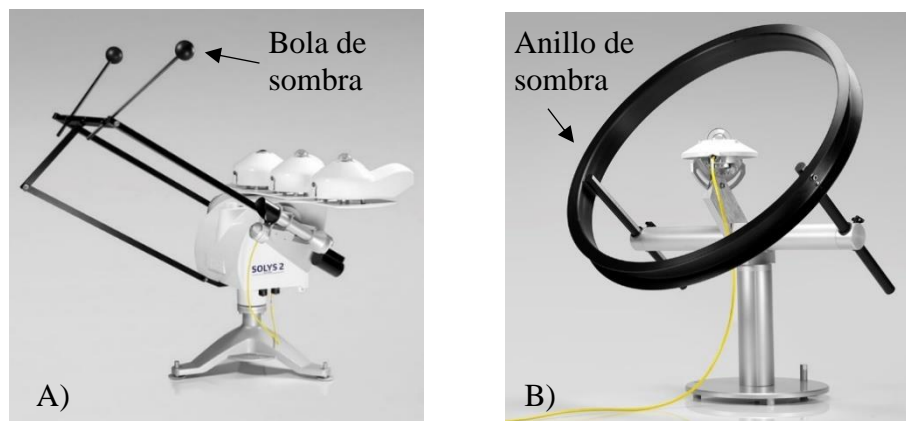
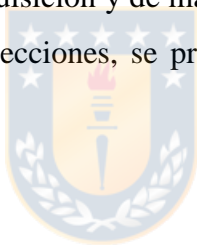


Figura 2.12 Piranómetros sombreados con distintos dispositivos de sombreadamiento. A) Bola de sombra montada sobre seguidor solar Solys 2 (Kipp and Zonen, 2017a). B) Anillo de sombra (Kipp and Zonen, 2017b)

El WMO ha definido tres niveles de calidad para clasificar los piranómetros: calidad alta, calidad buena y calidad moderada, que se son equivalentes a las categorías definidas en la ISO 9060 (ISO, 2018) como Clase A, Clase B y Clase C, respectivamente. La Tabla A.2.4.1 del Anexo 2.4 adaptada de la ISO (2018) describe las características de los piranómetros según sus niveles de rendimiento, con las incertidumbres que pueden lograrse con instalaciones adecuadas, personal bien capacitado y buen control de calidad (WMO, 2012).

Los piranómetros Clase A son los adecuados cuando se requiere una alta precisión de la radiación medida, tal como el uso en investigación, pruebas de colectores solares (fotovoltaicos) y cuantificación del potencial solar en plantas solares. En estos casos, se necesita mantenciones periódicas y personal capacitado. Los piranómetros Clase B son aceptables para registrar radiación solar en redes de estaciones para hidrología o agricultura. Los Clase C son soluciones económicas para mediciones de rutina en estaciones meteorológicas. El problema de los piranómetros Clase A es que poseen costos elevados de adquisición y de mantención (calibración y frecuencia diaria de limpieza *in situ*). En las siguientes secciones, se presentan los piranómetros utilizados en este trabajo.



### **2.7.1. Piranómetro CMP10 de Kipp and Zonen**

El piranómetro CMP10 de la marca “Kipp and Zonen” es un equipo que mide la radiación solar global en el rango espectral de 285 a 2800 nm y está clasificado como Clase A según la ISO 9060 (o calidad alta según WMO). El fabricante lo recomienda en aplicaciones como redes meteorológicas, prueba de paneles fotovoltaicos y colectores solares. Éste posee un doble domo vidriado para evitar el calentamiento y enfriamiento interno, lo que limita los problemas de condensación. El CMP10 requiere poca mantención *in situ* para medir radiación global. La Figura 2.13 muestra una imagen referencial de este equipo de medición.



Figura 2.13. Imagen referencial del piranómetro CMP10 (Kipp and Zonen, 2016)

La Figura 2.14 muestra los datos de radiación global medidos sobre superficies verticales orientadas hacia el Norte, Este y Oeste utilizando piranómetros CMP10. Los valores corresponden al promedio de las mediciones en un intervalo de 15 minutos. El gráfico muestra las mediciones del día 13 de octubre del 2018, el cual presentó un cielo despejado ( $K_T=0.734$ ). Se puede observar que las orientaciones Este y Oeste reciben una cantidad más grande de radiación solar en comparación con la orientación Norte. Como el cielo está despejado, la contribución más importante de la radiación solar es debido a la componente directa, la cual es proporcional al coseno del ángulo de incidencia formado por el vector de los rayos solares y el vector normal a la superficie receptora. Mientras más pequeño sea el ángulo de incidencia, mayor es el aporte solar de la componente directa que recibe dicha superficie. Para las orientaciones Este y Oeste, el ángulo de incidencia es bajo, ya que ven el sol de forma casi perpendicular durante las mañanas y las tardes, respectivamente. Por el contrario, para la orientación Norte, el ángulo de incidencia es siempre grande (por lo que la contribución solar directa es menor), incluso durante en el mediodía solar ya que el sol está muy alto en el cielo.

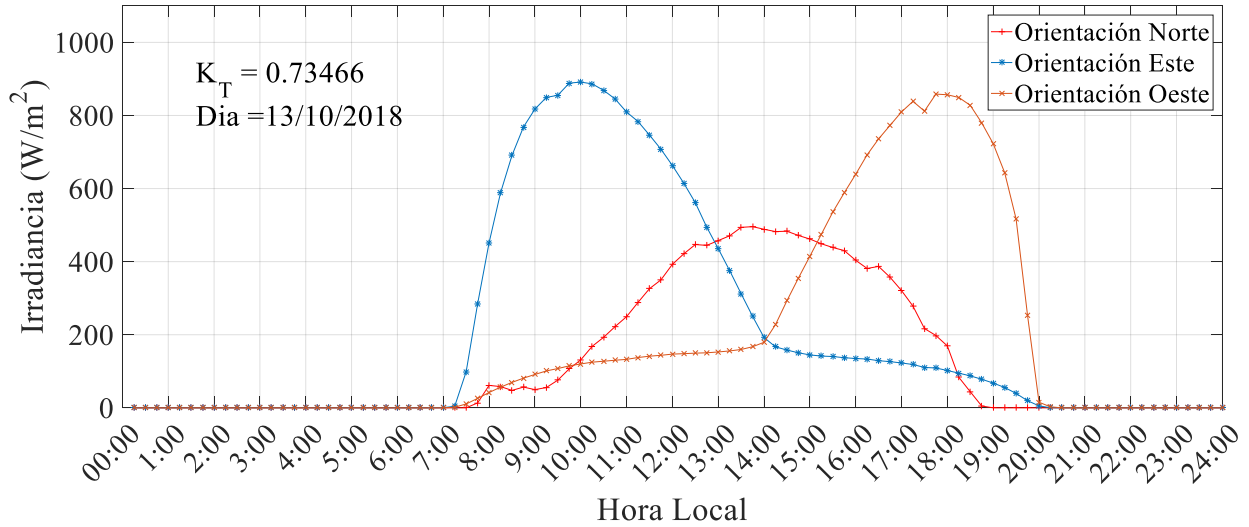


Figura 2.14. Medición diaria de los piranómetros CMP10 en las orientaciones Norte, Este y Oeste durante el 13/10/2018

### 2.7.2. Piranómetro SPN1 de Delta-T

El SPN1 (Wood, 1999) es un radiómetro que mide la radiación solar en el rango de 400 a 2700nm, además, entrega las horas de asoleamiento diario. Mide directamente la radiación global horizontal y la radiación difusa horizontal, y permite obtener indirectamente la radiación directa, restando la radiación difusa a la radiación global. Los fabricantes especifican una precisión general para  $G_{gh}$  y  $G_{dh}$  de  $\pm 8\%$  ( $\pm 10\text{ W/m}^2$ ) en mediciones individuales, con lo cual se está muy cerca de la clasificación Clase B de la ISO 9060 (o clasificación de Buena Calidad de la WMO). Si bien no se encuentra en la clasificación más alta, el SPN1 se ha ocupado en variadas investigaciones debido a su buena precisión y bajos costos de mantención, como en publicaciones realizadas por varias revistas científicas (Por ejemplo: Dammeier *et al.*, (2017), Kurtz y Kleissl (2017), Lai *et al.*, (2017), Liu *et al.*, (2017), Mateus *et al.*, (2014), Piratheepan y Anderson (2017), Royapoor y Roskilly (2015), Shahrestani *et al.*, (2017), Vallance *et al.*, (2017), Xiong y Tzempelikos (2016)). El SPN1 posee la ventaja de no tener partes móviles, por lo cual se transforma en una alternativa económica en términos de mantención, ya que no necesita de personal especializado ni ajustes y alineaciones constantes en terreno. La Tabla A.2.3 del Anexo 2.5 resume las especificaciones dadas por el fabricante (Delta-T Devices Ltda, 2007).

El SPN1 fue diseñado con siete termopilas: seis sensores ubicados en una grilla hexagonal y un sensor en el centro, bajo una compleja máscara de sombreado estática, de tal manera que en cualquier momento, y en cualquier localidad se cumplen las siguientes condiciones:

- al menos un sensor esta siempre expuesto a la radiación directa en su totalidad.
- al menos un sensor está siempre completamente sombreado.
- el ángulo sólido de la máscara de sombra es igual a  $\pi$ , lo cual corresponde a la mitad del ángulo sólido hemisférico.

Bajo el supuesto de cielo difuso isotrópico, la tercera propiedad, relacionada a la máscara de sombra implica que todos los sensores reciben una cantidad igual (50 %) de la radiación difusa del hemisferio celeste. La Figura 2.15 muestra las partes de la bóveda celeste vista por los diferentes sensores, graficados usando una proyección equiangular donde la distancia radial en las imágenes representa en ángulo cenital en el hemisferio (Long *et al.*, 2010).

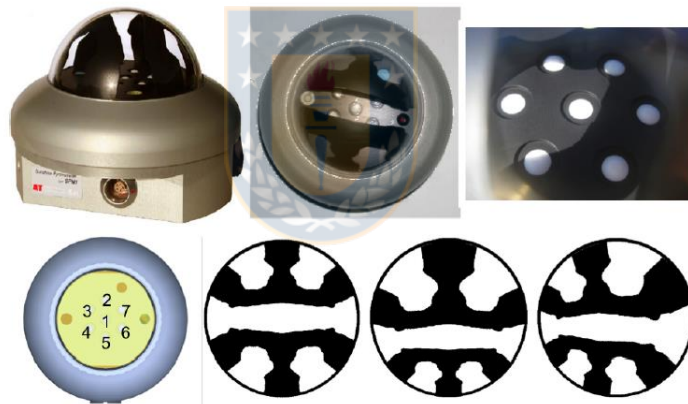


Figura 2.15. Fila superior: diferentes vistas del SPN1. Fila inferior: Numeración de los detectores del SPN1. Cielo visto bajo los patrones de sombra visto por el sensor 1 (izquierda), sensor 2 y 5 (medio) y sensores 3, 4, 5, 6 y 7 (derecha). Adaptado de Long *et al.* (2010) y Delta-T Devices Ltd. (2007)

Las mediciones de la radiación difusa horizontal y de la radiación global horizontal son calculadas usando un principio simple. En cada momento de medición, se determina la lectura máxima y mínima de las señales medidas en los siete sensores, designándoles el valor MAX y MIN, respectivamente. Para la componente difusa, el procesamiento del SPN1 asume que la mitad del

cielo que no es vista por cada sensor es exactamente la misma que la mitad que si la ve. A partir de esto de obtienen las siguientes expresiones:

$$G_{dh} = 2 \times \text{MIN} \quad (2.4)$$

$$G_{bh} = (\text{MAX} - \text{MIN}) \quad (2.5)$$

$$G_{gh} = G_{bh} + G_{dh} = \text{MAX} + \text{MIN} \quad (2.6)$$

Después de esto, se hacen algunas otras calibraciones basadas en ajustes lineales que pueden ser vistos en el manual de usuario del SPN1 (Delta-T Devices Ltd, 2007). A partir de las expresiones anteriores, se puede obtener la radiación directa normal a través de la siguiente expresión:

$$G_{bn} = \frac{G_{gh} - G_{dh}}{\cos \theta_z} \quad (2.7)$$

El SNP1 apareció hace cerca de una década, y desde entonces su uso para la evaluación del recurso solar y su presencia en redes de medición de radiación ha ido creciendo notablemente para las industrias de la energía solar (Badosa *et al.*, 2014).

La Figura 2.16 muestra los valores de radiación global horizontal ( $G_{gh}$ ) y radiación difusa horizontal ( $G_{dh}$ ) obtenidos con las mediciones del SPN1; Y los valores de radiación directa horizontal ( $G_{bh}$ ) calculada como la diferencia entre  $G_{gh}$  y  $G_{dh}$ . Los valores corresponden al promedio de las mediciones instantáneas en un intervalo de 15 minutos. El gráfico muestra las mediciones del día 13 de octubre del 2018, que presentó un cielo claro con un  $K_T=0.73$ . Se puede observar que la componente difusa para un día despejado es menor a las otras componentes y que la componente global posee pequeñas fluctuaciones debido a la presencia de nubes débiles y delgadas.

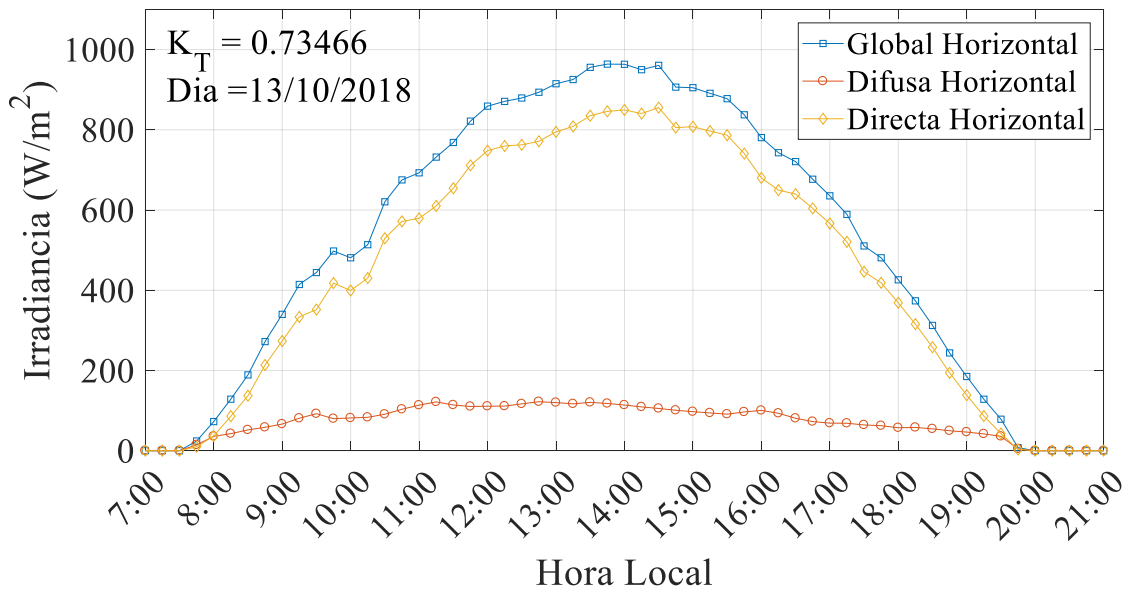


Figura 2.16. Medición de la componente global horizontal, difusa horizontal y directa normal medida con el SPN1 el 13/10/2018

### 2.7.3. Diferencias entre las mediciones del SPN1 y piranómetros Clase A

La primera aparición del SPN1 remonta a 20 años atrás, y desde entonces, su uso para la evaluación *in situ* del recurso solar y su presencia en redes de medición de radiación solar ha ido creciendo notablemente. Como consecuencia, un número importante de estudios usando, evaluando y comparando este sensor con otros tipos de instrumentos está continuamente creciendo (Badosa *et al.*, 2014). Psiloglou *et al.* (2013) comparó las mediciones de radiación global horizontal ( $G_{gh}$ ) y de radiación difusa horizontal ( $G_{dh}$ ) del SPN1, con las mediciones de un piranómetro con de anillo de sombra en Pentelli, Grecia, durante el verano del 2011. Encontraron que las precisiones fueron fácilmente verificadas para mediciones de  $G_{gh}$  con frecuencia de 1 min, con un error cuadrático medio (RMSE) variando entre 2.6 y 3.6 % mientras que para la  $G_{dh}$ , el RMSE observado (10.8 – 17 %) no era compatible con las exactitudes establecidas por los fabricantes. Ellos propusieron nuevos valores de incertezas para la componente difusa y sugirieron que debería usarse un factor de corrección para mejorar estas incertezas.



Myers y Wilcox (2009) presentaron los resultados de un estudio de comparación de diversos radiómetros en el Laboratorio de Investigación de Radiación Solar (SRRL, por sus siglas en inglés), del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés), en Golden, Colorado. Calcularon los sesgos de las comparaciones, los cuales fueron descritos como función del ángulo cenital del sol ( $\theta_z$ ). Para  $G_{gh}$ , se encontró un sesgo entre -3.7 y -0.7 %, pero para  $G_{dh}$  se observó un sesgo aún mayor, entre -13.8 y 4.3 %. Myers (2010) encontró que las diferencias en las mediciones de la radiación directa normal ( $G_{bn}$ ) del SPN1 (con respecto al  $G_{bn}$  de referencia) es de  $\pm 15$  a 20 %, especialmente para  $G_{bn}$  menor a  $400 \text{ W/m}^2$ . A mayores  $G_{bn}$ , sobre los  $600 \text{ W/m}^2$  (útiles para aplicaciones de concentración solar) el SPN1 produce estimaciones del  $G_{bn}$  con incertezas comparables a los radiómetros de banda rotatoria (RSR) estimados en  $\pm 10$  % para datos promediados para 1 min y horariamente.

Badosa *et al.* (2014) compara las mediciones de  $G_{gh}$ ,  $G_{dh}$  y  $G_{bn}$  del SPN1 con mediciones basadas en seguimiento solar con piranómetros y pirheliómetros de clase A (también conocidos como TMB). Estas mediciones se realizaron en 6 contextos geográficos distintos: 4 sitios de latitudes medias y 2 sitios con climas tropicales, durante más de un año. Los resultados muestran una variación entre 3.4 a 4.5 % para el  $G_{gh}$ , 7.4 a 9.3 % para el  $G_{dh}$  y un 8.7 a un 14 % para el  $G_{bn}$ , se observa también que para todos los sitios medidos el  $G_{gh}$  es sistemáticamente subestimado y en consecuencia el  $G_{bn}$  es sobreestimado.

#### 2.7.4. Fuentes de incertezas del SPN1

Badosa *et al.* (2014) analizaron en detalle las diferencias entre las mediciones del SPN1 y los TBM para identificar y definir las fuentes de incerteza que afectan la comparación. Se encontraron dos principales categorías de fuentes de incertezas diferenciadas según su origen: relacionadas a la radiación directa, y a la difusa y circunsolar.

Dentro de las incertezas de la radiación directa, uno de los factores claves que la afectan es la respuesta al coseno. Las pruebas de laboratorio muestran que la respuesta es buena hasta los  $65^\circ$  de ángulo cenital del sol ( $\theta_z$ ), y va disminuyendo en estabilidad hasta los  $80^\circ$  en donde cae

bruscamente. Esto es debido a la forma geométrica de los difusores de termopila. También existen diferencias pequeñas para  $\theta_z < 15$ , debido a que para valores pequeños de  $\theta_z$  el ángulo de apertura efectivo es siempre grande, mientras que para valores de  $\theta_z$  grandes, el ángulo de apertura varía de mayor a menor con respecto al ángulo del acimut solar. Esto se traduce en que para valores pequeños de  $\theta_z$ , el  $G_{bn}$  siempre incluye una parte de la aureola solar, mientras que para valores mayores del  $\theta_z$  la contribución de las aureolas es menor cuando es promediada en el rango del acimut solar. Otra fuente importante de incertezas son los efectos de lente en la cúpula del SPN1, que desvía de manera asimétrica los rayos del sol hacia los distintos difusores que se encuentran lejos del centro del domo de vidrio, esta incerteza alcanza un valor de  $\pm 15 \text{ W/m}^2$  en lecturas de radiación horizontal para días soleados. Por último, pueden existir incertezas debido a desajustes de los detectores, como una incorrecta calibración, montaje horizontal imperfecto de los difusores u otras variaciones de manufactura, que no son predecibles en detalle.

Dentro de las incertezas en la radiación difusa, se encuentran dos contribuciones principales: La respuesta espectral y la distribución no isotrópica de la radiación difusa. La respuesta espectral del SPN1 cae abruptamente en el borde azul del espectro, esto hace que la salida de  $G_{dh}$  sea típicamente menor que en el TMB en días con cielos despejados y azules, debido al predominante ponderación del azul del espectro. Por otro lado, en la parte cercana al infrarrojo (NIR, por sus siglas en inglés), el SPN1 tiene una mayor sensibilidad en comparación con los TBM, esto implica que bajo condiciones de cielo muy nublado, tanto el  $G_{gh}$  como el  $G_{dh}$ , son menores en comparación con los TBM debido a que parte cercana al infrarrojo en el espectro solar (donde la respuesta espectral del SPN1 es mayor) es preferentemente absorbida por nubes gruesas. La segunda contribución a la incerteza a la medición de la radiación difusa se debe a que la apertura efectiva para la medición del  $G_{bn}$  cambia con la posición relativa del sol con respecto a la máscara de sombra del SPN1, pero es siempre al menos  $\pm 5^\circ$ , que es significativamente mayor que un pirheliómetro de estándar secundario ( $\pm 2^\circ$ ). Esto implica que las mediciones de  $G_{bn}$  del SPN1 incluyen una parte grande de la componente circunsolar en comparación con los TBM, lo que se traducen en una sobreestimación del  $G_{bn}$  y una subestimación del  $G_{dh}$ .

**2.8. Evaluación empírica de los modelos de cielo para la componente difusa**

Las bases de datos de radiación solar registrados con los equipos de medición están compuestas de valores obtenidos sobre superficies horizontales. Pero en las aplicaciones de energía solar, es necesario calcular la radiación sobre superficies inclinadas (por ejemplo, ventanas y colectores solares), las cuales pueden tener cualquier inclinación y orientación. Para simular la radiación solar en estas condiciones, es usual utilizar códigos de simulación energética.

La Tabla 2.3 muestra algunos de los códigos de simulación energética más utilizados, con los modelos de cielo que tienen incorporados. Estos códigos de simulación son los recomendados por el manual de Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile (MINVU, 2018).

Tabla 2.3. Modelos de cielo incorporados en los códigos de simulación energética

Códigos de simulación energética	Isotrópico (ISO)	Klucher (KLC)	Hay y Davies (HYD)	Reindl (REIN)	PPS	PAW
EnergyPlus (2018)					•	
TRNSYS (2009)	•		•	•	•	
ESP-r (2019)	•	•			•	
RADIANCE (2016)						•

Debido a la variedad de modelos disponibles en estos códigos de simulación, es necesario evaluar su desempeño en los lugares de interés. Esto permite una elección adecuada del modelo a utilizar para asegurar la confiabilidad de los valores simulados sobre superficies verticales. Varios autores han evaluado los modelos de predicción de la radiación solar incidente en superficies inclinadas, con datos de localidades geográficamente dispersas. La Tabla 2.4 presenta algunas investigaciones en las que se realizaron evaluaciones del desempeño de los modelos de cielo utilizando equipos de medición clase A y clase B. La tabla muestra los lugares de medición, el período de medición y las orientaciones en las que se realizó la evaluación. Esta lista está lejos de ser completa, una más extensa se puede encontrar en Yang (2016).

Tabla 2.4. Evaluación de modelos de cielo para la componente difusa

	<b>Autor</b>	<b>Lugar de medición</b>	<b>Coordenadas geográficas</b>	<b>Período de medición e inclinación de la superficie</b>	<b>Modelos evaluados</b>
1	Behr (1997)	Hamburgo, Alemania	E: 10°07' N: 53°39' e: 49 msnm	Período de medición entre el 1981 y 1992. La dirección es Sur con distintas inclinaciones: 30°, 53.6° y 90°	PPS.
2	Kamali <i>et al.</i> , (2006)	Karaj, Iran	N: 35°55' E: 50°56' e: 1312 msnm	Junio a octubre del 2002. Orientada hacia el Sur y Oeste con inclinación de 45°, respectivamente.	ISO, HYD, REIN.
3	Loutzenhiser <i>et al.</i> (2007)	Duebendorf, Suiza	N: 47° 24' E 8°36' e: 430 msnm	Primer período desde el 2 al 26 de octubre 2004 y segundo período desde el 22 de marzo al 16 de abril 2005. Dirección 29° al Oeste del Sur con superficie vertical.	ISO, KLC, HYD, REIN, PPS.
4	Kastendeuch y Najjar (2009)	Strasbourg, Francia	N 48° 34' E 7° 45' e: 143 msnm	Medición entre el 13 al 19 de agosto 2002. Superficie vertical orientada 55° al Oeste del Norte y 55° al Este del Sur.	PAW.
5	Gueymard, (2009)	Colorado, EE. UU.	N: 39.74° O: 105.18° e: 1829 msnm	Septiembre 2006 a agosto 2007. Superficie vertical orientada hacia el Sur con inclinación de 40°.	ISO, KLC, HYD, REIN, PPS.
6	Padoval y Del Col (2010)	Padua, Italia	N: 45° 24' E: 11° 52' e: 12 msnm	Seis bases de datos entre septiembre de 2007 a agosto de 2009: Superficie orientada hacia el Sur con inclinaciones de 20 y 30°, y superficies orientadas hacia el Oeste con inclinaciones de 45 y 65°	ISO, KLC, REIN, PPS.
7	Demain <i>et al.</i> (2013)	Brussels, Bélgica	N: 50.76 E: 4.35 e: 101 msnm	01 abril a 30 noviembre, 2011. Superficie orientada hacia el Sur con inclinación de 50°.	ISO, KLC, HYD, REIN, PPS.
8	Orehounig <i>et al.</i> (2014)	Viena, Austria	N: 48° 12' E: 16° 22' e: 218 msnm	1 enero al 31 de diciembre del 2009. Superficie vertical orientada hacia el Sur, Oeste, Este y Norte.	REIN, PPS, PAW.
9	Pandey y Katiyar (2014)	Uttar-Pradesh, India	N 26,75° E 80.85° e : 120 msnm	Enero a diciembre, 2007. Superficie orientada hacia el Sur con inclinación de 15°, 30°, 45° y 60°.	ISO, HYD y KLU.
10	Khalil y Shaffie (2016)	El Cairo, Egipto	N: 30° 05' E: 31° 15' E: 23 msnm	Enero 1984 a diciembre 2014. Superficie orientada hacia el Sur y Oeste en posición vertical, respectivamente,	ISO, KLC, HYD, REIN, PPS.
11	Yang <i>et al.</i> (2016)	a) Eugene b) Oldenburg c) Singapur d) Golden	a) 44 N,127 O, 150 msnm b) 39 N, 105 O, 1829 msnm c) 53 N, 8.17 E, 40 msnm d) 1.3N,103 E, 40 msnm	a)2015. Orientada al Sur con inclinación de 30 y 90°. b)2014. Orientada al Sur con inclinación 40 y 90°, Este y Oeste vertical. c)2014. Orientada al Sur con inclinación de 45°, Este con inclinación 45° d)2013.Orientada 64° al Noreste con inclinación de 10°, 20°, 30° y 40°. Vertical hacia el Norte, Sur, Este y Oeste.	ISO, KLC, HYD, REIN, PPS, PAW.

A pesar de la existencia de una gran variedad de modelos de cielo, no existe uno de aplicabilidad universal establecido y aceptado por la comunidad científica (Yang, 2016) debido a que el

fenómeno de la irradiancia depende de las características *in situ* de un lugar determinado. Los factores más influyentes son el contexto meteorológico tales como la composición y espesor atmosférica y la presencia de aerosoles que producen fenómenos de absorción y dispersión de la radiación solar (más detalles se encuentran en el Anexo 2.1). Otro factor importante es el contexto geográfico como la latitud y altitud, que determinarán la intensidad de la radiación solar, así como la presencia de relieves naturales cercanos que pueden obstruir la radiación directa o producir un efecto reflectivo importante (por ejemplo, una montaña nevada). Por lo tanto, es necesaria la validación de los modelos en cada lugar de interés.

Como se observa en la Tabla 2.4, la mayoría de las validaciones de los modelos de cielo se han realizado en el hemisferio Norte, utilizando preferentemente mediciones de radiación solar sobre superficies inclinadas orientadas hacia el Ecuador. Por lo tanto, es necesario evaluar el desempeño de los distintos modelos de cielo para la componente difusa usando mediciones de radiación solar sobre superficies orientadas hacia el ecuador, en el hemisferio Sur.



## 2.9. Conclusiones

En este capítulo se entregaron las bases metodológicas para estimar la radiación solar que incide sobre superficies verticales, tratando cada componente de la radiación solar de forma particular. Se presentaron las ecuaciones que describen la posición del sol durante todo el año, las cuales son las bases para determinar la radiación directa. Se presentó el tratamiento de la radiación reflejada, que depende del factor de vista del suelo de la superficie receptora y del albedo de la región circundante. Se presentaron los modelos para determinar la radiación difusa, llamados también modelos de cielo o de transposición. Existe un amplio abanico de modelos de cielo, con diferentes formas funcionales y complejidad, sin embargo, no existe un modelo de aplicabilidad universal aceptado por la comunidad científica, ya que su desempeño depende de la naturaleza meteorológica y geográfica del sitio determinado. Por esto, se deben realizar validaciones para distintos climas y latitudes del globo terrestre y en cada sitio de interés.

Las validaciones de los modelos de cielo se deben realizar con datos medidos *in situ*. En el mercado existen variados instrumentos para la medición de la radiación solar, sin embargo, para obtener datos de alta confiabilidad es necesario la utilización de instrumentos de Clase A o de clase B (según la clasificación ISO9060). Estos instrumentos poseen altos costos de adquisición y de mantención, sumado a la alta complejidad de operación. Sin embargo, han aparecido equipos de menor costo y sin partes móviles que permiten obtener mediciones detalladas y de buena calidad, como el piranómetro SPN1.



## **CAPÍTULO 3            METODOLOGÍA**

### **3.1.            Introducción**

En este capítulo se presentan las características de la estación radiométrica que se instaló en la ciudad de Chillán, con la cual se registró cada una de las componentes de la radiación solar. Además, se describen las pruebas de calidad que se aplicaron a los datos medidos, para asegurar su confiabilidad. Finalmente, se muestran los indicadores estadísticos utilizados para la evaluación del desempeño de los modelos de cielo.

### **3.2.            Estación radiométrica**

La evaluación de los modelos de transposición de la componente difusa o modelos de cielo requiere una base de datos compuesta por cada una de las componentes de la radiación solar recibidas sobre una superficie horizontal, y también la radiación solar total incidente sobre superficies con alguna inclinación y orientación fija. Por este motivo, se instaló una estación radiométrica en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, sede Chillán (Latitud  $36.59^\circ$  Sur, Longitud:  $72.07^\circ$  Oeste y elevación 138 metros sobre el nivel del mar). La Figura 3.1 muestra la ubicación geográfica del emplazamiento de la estación radiométrica.

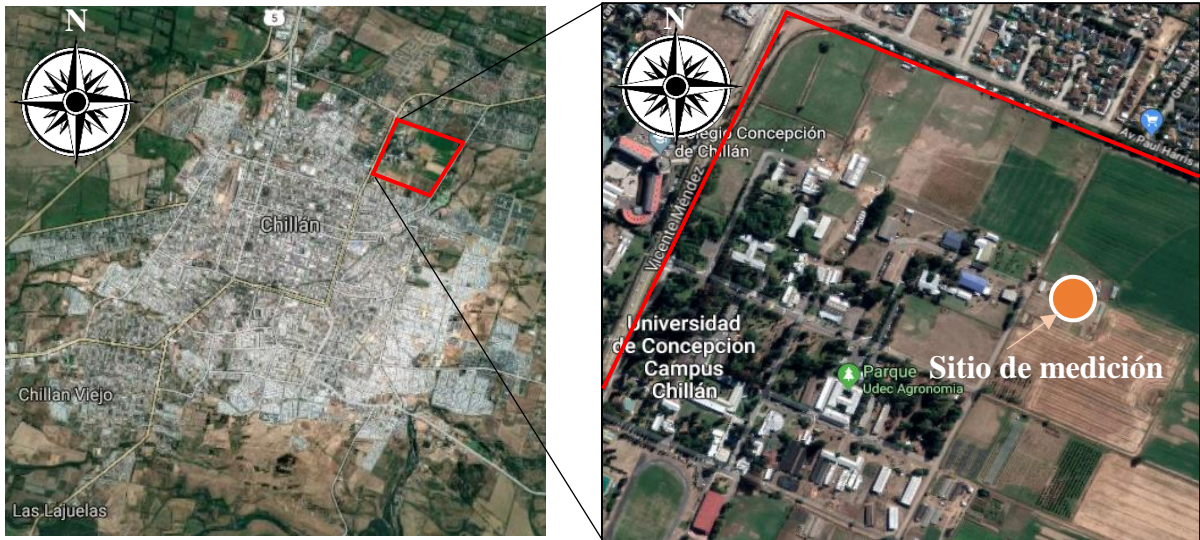


Figura 3.1. Lugar de emplazamiento de la estación radiométrica en Chillán. El polígono rojo representa los límites de las dependencias de la Universidad de Concepción Campus Chillán.

Esta estación permitió la medición de la radiación global horizontal ( $G_{gh}$ ), la radiación difusa horizontal ( $G_{dh}$ ) y el cálculo, por diferencia, de la radiación directa normal ( $G_{bn}$ ), usando el piranómetro SPN1. Para evaluar el desempeño de los modelos de cielo se instalaron tres piranómetros CMP10 que midieron la radiación global sobre superficies inclinadas en  $90^\circ$  ( $G_{gT}$ ) orientadas hacia tres puntos cardinales respectivamente: Norte, Este y Oeste. Se escogieron estas orientaciones e inclinaciones para representar las condiciones típicas de elementos de la envolvente de una edificación, tal como una ventana en alguna de las tres orientaciones seleccionadas. Cabe destacar, que las combinaciones de orientación e inclinación son múltiples y variarán en función del tipo de aplicación que se desee validar. Por ejemplo, una superficie inclinada en 25 grados respecto a la horizontal y mirando hacia el ecuador puede representar un colector solar. La Figura 2.13 muestra un esquema de la estación radiométrica.



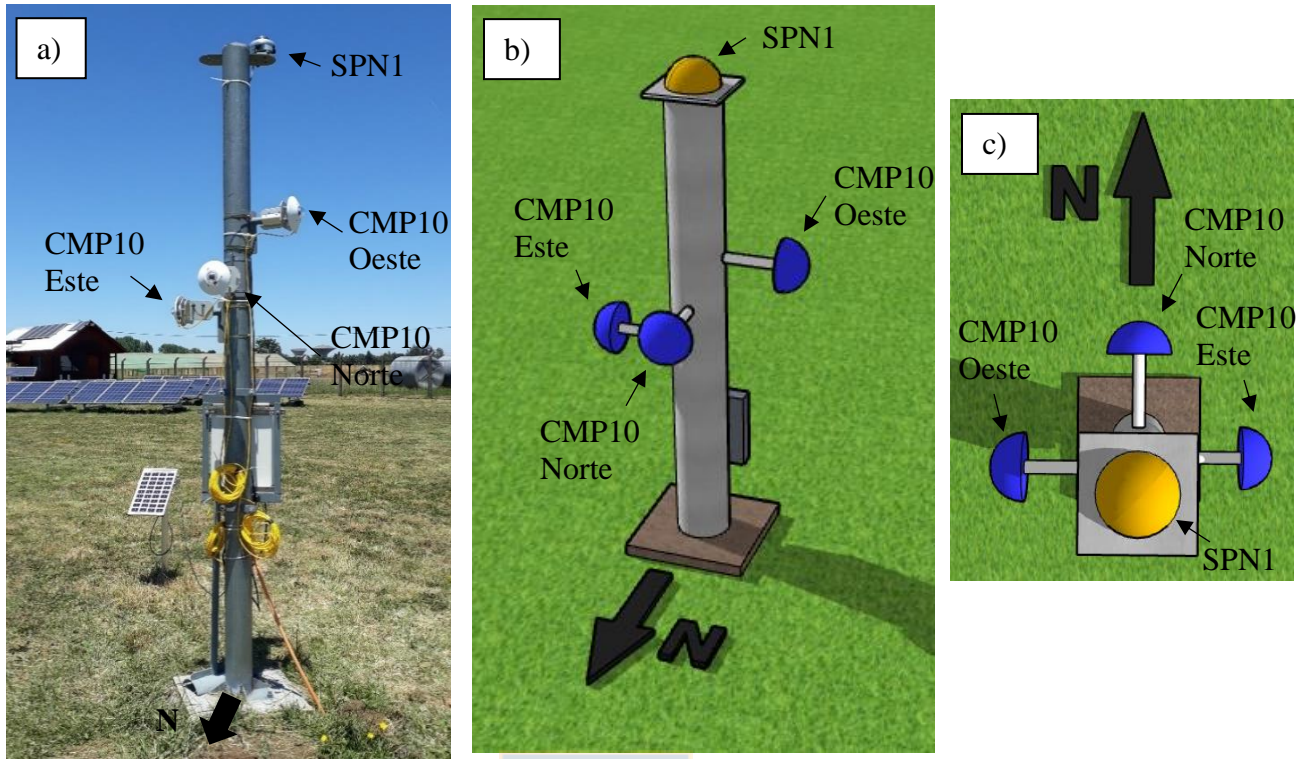


Figura 3.2. a) Estación radiométrica instalada en la Universidad de Concepción sede Chillán.  
 b) Esquema de la estación radiométrica. En azul los piranómetros CMP10 y en amarillo el SPN1.  
 C) Vista aérea de los piranómetros CMP10 dirigidos hacia el Norte, Este y Oeste

Los datos fueron medidos con una frecuencia de 10 segundos y se registró el valor promedio cada un minuto. Las mediciones continuas del SPN1 se grabaron en el registrador de datos GP1 de la marca “Delta T”, mientras que las de CMP10 se registraron en el registrador CR300 de la marca “Campbell Scientific”.

### 3.3. Período de medición

Se realizaron tres períodos de medición: el primero corresponde al situado entre el 5 de octubre del 2018 al 29 de noviembre del 2018 (25 días). Durante este período se realizaron mediciones de radiación horizontal con el piranómetro SPN1 y de radiación total sobre una superficie vertical en la orientación Norte, Oeste y Este con los piranómetros CMP10. El segundo período corresponde al situado entre el 16 de noviembre del 2018 y el 20 de diciembre del 2018 (35 días), en el cual se

midió la radiación horizontal con el SPN1 y la radiación vertical sólo en las orientaciones Norte y Este. Por otro lado, con el fin de determinar sesgos o errores sistemáticos de medición del sensor SPN1, se midió paralelamente la radiación solar global recibida sobre una superficie horizontal con el sensor CMP10 durante 28 días. El tercer período comprende desde el 22 de diciembre del 2018 hasta el 9 de mayo del 2019. Durante este período se midió la radiación horizontal con el SPN1 y la radiación global sobre superficies verticales orientadas hacia el Norte, Este y Oeste con el CMP10.

Durante el segundo período, se midió también la radiación reflejada por el suelo durante un período de 10 días, situando un piranómetro CMP10 en posición horizontal mirando hacia abajo. Con esto se obtuvo el albedo del suelo circundante al lugar de medición que se usó para determinar la radiación solar reflejada. La Tabla 3.1 resume las variables medidas y su período de medición. Las mediciones instantáneas se realizaron cada 10 s y se registraron los datos como promedio cada 1 minuto.

Tabla 3.1. Períodos de medición empleados en este estudio

<b>Variabes medidas</b>	<b>Sensor</b>	<b>Período 1</b>	<b>Período 2</b>	<b>Período 3</b>
$G_{gh}$ , $G_{dh}$ y $G_{bn}$	SPN1	5 de octubre al 29 de noviembre (25 días)	16 de noviembre al 20 de diciembre (35 días)	22 de diciembre al 9 de mayo (138 días)
$G_{gT}$ orientación Norte	CMP10	5 de octubre al 29 de noviembre (25 días)	16 de noviembre al 9 de diciembre (24 días)	22 de diciembre al 9 de mayo (138 días)
$G_{gT}$ orientación Este	CMP10	5 de octubre al 29 de noviembre (25 días)	1 de diciembre al 20 de diciembre (20 días)	22 de diciembre al 9 de mayo (138 días)
$G_{gT}$ orientación Oeste	CMP10	5 de octubre al 29 de noviembre (25 días)	Sin medición	22 de diciembre al 9 de mayo (138 días)
$G_{gh}$ mirando hacia abajo	CMP10	Sin medición	11 de diciembre al 20 de diciembre (10 días).	
$G_{gh}$	CMP10	Sin medición	23 de noviembre al 20 de diciembre (28 días)	

### 3.4. Control de calidad de los datos medidos

La medición de la radiación solar presenta mayor dificultad que la medición de otras variables meteorológicas, lo que conlleva a problemas y errores que se pueden clasificar en dos categorías: falla del equipo técnico y problemas de operación (Moradi, 2009). A su vez, estos errores pueden ser sistemáticos y/o aleatorios. Los errores sistemáticos se deben a los propios equipos de medición, su construcción y calibración (Younes *et al.*, 2005). Sin embargo, el error más importante es aleatorio y se debe a la operación, mantenimiento y manipulación de los equipos. La Tabla 3.2 muestra las fuentes de error típicas.

Tabla 3.2. Fuentes de errores en la medición de la radiación solar

<p><b>Errores e incertidumbres del sensor</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Respuesta al coseno</li> <li>• Respuesta al acimut</li> <li>• Respuesta a la temperatura</li> <li>• Selectividad espectral</li> <li>• Estabilidad</li> <li>• No linealidad</li> </ul>
<p><b>Errores de operación</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polvo, nieve, rocío, gotas de agua, heces de aves, etc.</li> <li>• Nivelación incorrecta del sensor</li> <li>• Sombras debido a las estructuras creadas por el hombre</li> <li>• Campos eléctricos cerca de los cables del sensor</li> <li>• Carga de los cables del sensor</li> <li>• Falla de la estación</li> </ul>

(Muneer y Fairouz ,2002)

Por lo tanto, para garantizar la calidad de los datos medidos, se deben someter a un control de calidad que elimine aquellos que son defectuosos. Existen varias metodologías para realizar controles de calidad, como las propuestas por la *Baseline Surface Research Network* (Red de Base de Investigación de Superficie; BSRN por sus siglas en inglés), el cual es un programa mundial de investigación realizado por la WMO. Otros sets de test conocidos son los realizados por el programa NREL's SERI QC (NREL, 1993), así como los propuestos por Long y Shi (2008), la *Commission Internationale de l'Eclairage* (Comisión internacional de Iluminación; CII por sus siglas en inglés) (Kendrick *et al.*, 1994), Moradi (2009), el *Royal Meteorological Institute of Belgium* (Real Instituto de Meteorología de Bélgica; RMI por sus siglas en inglés), Gueymard y Ruiz Arias (2016), entre otros. Sin embargo, no hay un procedimiento definitivo, ideal o

ampliamente aceptado para un control óptimo *a posteriori* (Gueymard y Ruiz Arias ,2016). Cada institución desarrolla sus propios métodos, lo que implica que algunos pueden ser más estrictos que otros. A continuación, se presentan algunas de las pruebas dispuestas por Merino (2013) que se basan en las utilizadas por Dumortier (1995) y por Muneer y Fairouz (2002).

a) Prueba de altura solar

La primera prueba aplicada a los datos de radiación solar elimina los obtenidos cuando el ángulo de elevación del sol con respecto a la horizontal es inferior a 5°, es decir, aquellos que son cercanos al amanecer y al atardecer. Durante estas horas la radiación solar está muy dispersada por la atmósfera y genera errores en la medición. Por otro lado, al eliminar todas las mediciones por debajo de este límite, se excluyen también los valores nocturnos, es decir, los anteriores al amanecer y los posteriores al atardecer.

b) Prueba de consistencia de la radiación solar

Muneer y Fairouz (2002) propone tres pruebas de consistencia. El primero compara la radiación solar global ( $G_{gh}$ ) y la radiación solar horizontal fuera de la atmósfera ( $G_{oh}$ ). El segundo compara el componente horizontal difuso ( $G_{dh}$ ) con respecto a la radiación global ( $G_{gh}$ ). Finalmente, la radiación global ( $G_{gh}$ ) debe ser igual a la adición de la componente difusa horizontal ( $G_{bh}$ ) y la directa horizontal ( $G_{bh}$ ).

La Tabla 3.3 muestra los criterios utilizados en ambas pruebas de calidad.

Tabla 3.3. Controles de calidad realizados a los datos medidos

Pruebas	Criterios
a) Prueba de altura solar	$\alpha_s \leq 5^\circ$
b) Prueba de consistencia	$G_{gh} < G_{oh}$ $G_{dh} < G_{gh}$ $G_{gh} \leq G_{dh} + G_{bh}$

Se observa que las dos primeras pruebas de consistencia son equivalentes a la comparación del índice de claridad del cielo ( $k_t = G_{gh}/G_{oh}$ ) y la relación difusa ( $k_d = G_{dh}/G_{gh}$ ) con respecto a sus valores máximos.

### 3.5. Criterios de evaluación

Para evaluar el desempeño de los modelos se debe hacer una comparación entre los valores simulados a través de los modelos de cielo y los valores reales medidos sobre las superficies verticales orientadas hacia el Norte, Este y Oeste. Con ello se puede determinar el grado de ajuste de los valores simulados con los datos medidos, y determinar su error. Se utilizó un análisis estadístico ocupando algunos de los indicadores más utilizados en la evaluación de modelos de radiación solar (Khalil y Shaffie, 2016): el RMSE (raíz del error cuadrático medio, por sus siglas en inglés) y el MBE (error de sesgo medio, por sus siglas en inglés). Estos indicadores expresan que tanto se alejan los valores simulados de los medidos, es decir, miden el error. Además, se utilizó el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ), el cual determina el porcentaje de la variabilidad de los datos explicados por los modelos. Los datos utilizados corresponden a los que cumplieron con las pruebas de calidad descritas en la sección anterior.

#### 3.5.1. Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

El RMSE representa la raíz del promedio de los errores al cuadrado. El valor de RMSE es siempre positivo, entregando el valor cero en el caso ideal cuando lo medido es exactamente igual a lo calculado. A continuación, se presenta la expresión para determinar el RMSE.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{1}^n (G_{i,\text{Calc}} - G_{i,\text{Med}})^2} \quad (3.1)$$

En el contexto del presente trabajo, el subíndice  $i$  corresponde al  $i$ -ésimo valor de la radiación solar total incidente en una superficie inclinada y  $n$  corresponde a la cantidad total de pares de datos. Los subíndices “Calc” y “Med” corresponden a la radiación calculada y medida, respectivamente.

Mientras menor sea el valor de RMSE, el desempeño del modelo es mejor. El efecto de cada error sobre el RMSE es proporcional al tamaño de la raíz del error, por lo que errores grandes tienen un efecto desproporcionalmente grande sobre el RMSE, en consecuencia, es sensible a los *outliers*. Por otro lado, para obtener el RMSE en términos porcentuales, se procede a normalizar por el promedio de los datos medidos según la siguiente expresión:

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_1^n G_{i,Med}} \times 100 \% \quad (3.2)$$

Valores bajos del nRMSE indican una baja varianza de los residuos.



### 3.5.2. Error de sesgo promedio (MBE)

El MBE es un indicador estadístico utilizado para obtener la desviación promedio de los valores simulados y describe la dirección del sesgo. Su valor está referido a la magnitud de los valores bajo investigación y se obtiene con la siguiente expresión.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_1^n (G_{i,Calc} - G_{i,Med}) \quad (3.3)$$

Un valor positivo de MBE indica una sobreestimación en la radiación solar estimada con los modelos de cielo, y viceversa. Para obtener el MBE en términos porcentuales, se normaliza con el promedio de los datos medidos según la siguiente expresión:

$$nMBE = \frac{MBE}{\frac{1}{n} \sum_1^n G_{i,Med}} \times 100 \% \quad (3.4)$$

### 3.5.3. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación es la proporción de la variabilidad en un set de datos que es contabilizado por un modelo estadístico, donde la variabilidad es medida cuantitativamente como la suma de las desviaciones al cuadrado. La expresión siguiente describe el  $R^2$ :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (G_{i,Med} - G_{i,Calc})^2}{\sum_1^n (G_{i,Med} - \bar{G}_{i,Med})^2} \quad (3.5)$$

El  $R^2$  es un estadístico que da información sobre la bondad de ajuste de los modelos. En regresiones, el  $R^2$  es una medición estadística de cuán bien la regresión lineal se aproxima a los valores reales. Un valor de  $R^2$  igual a 1 indica que la regresión se ajusta de forma perfectamente lineal a los datos, por lo tanto, para una modelación de alta precisión el  $R^2$  debe ser cercano 1. Sin embargo, presenta el problema de que no penaliza la inclusión de variables explicativas no significativas, por lo que, al aumentar variables en una regresión el coeficiente de determinación tiende a aumentar. Por esto, se utiliza el coeficiente de determinación ajustado, el cual expresa el porcentaje de variación de la variable dependiente explicado por todas las variables independientes. Para encontrar el coeficiente de determinación ajustado se utiliza la siguiente expresión:

$$R_a^2 = 1 - \left[ \frac{n-1}{n-k-1} \right] * (1 - R^2) \quad (3.6)$$

En donde  $R^2$  corresponde al coeficiente de determinación,  $n$  es el número de observaciones de la muestra y  $k$  corresponde al número de variables independientes.

### 3.6. Conclusiones

Para obtener los datos de radiación solar para la evaluación de los modelos de cielo, se instaló una estación radiométrica en la ciudad de Chillán. La estación está equipada con un piranómetro SPN1 ubicado en posición horizontal, el cual entrega la radiación solar global, difusa. A partir de estas componentes de la radiación solar se puede calcular por diferencia la componente directa.

Estos datos son la entrada de los modelos de cielo, los cuales permiten obtener la radiación vertical en cualquier inclinación y orientación a través de simulación numérica. Los valores simulados se comparan con los valores medidos por tres piranómetros CMP10 ubicados en posición vertical que están orientados hacia tres puntos cardinales: Norte, Este y Oeste. La evaluación de los modelos de transposición contempla el análisis de indicadores estadísticos, tal como el RMSE, el MBE y el  $R^2$ .

El período de medición contempla tres ventanas temporales: la primera comprende desde el 5 de octubre al 20 de octubre del 2018 (25 días), la segunda desde el 16 de noviembre al 20 de diciembre del 2018 (35 días) y la tercera va desde el 22 de diciembre al 9 de mayo del 2019 (138 días). Durante el segundo período se midió el coeficiente de reflexión del suelo o albedo. Además, todos los datos obtenidos fueron sometidos a un conjunto de pruebas de calidad para asegurar su confiabilidad.





## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

### 4.1. Introducción

El desempeño de los modelos de cielo depende fuertemente del clima y las características *in situ* del lugar de medición. En el contexto de esta tesis, la evaluación se realiza sobre un clima templado con estación seca durante el verano y lluvioso semejante con influencia continental. Conocer el grado de exactitud de los modelos permite estimar el nivel de subestimación o sobreestimación de la energía solar calculada con los códigos de simulación energética, así como determinar el grado de seguridad en las predicciones.

En este capítulo se presenta la evaluación de los distintos modelos de cielo incorporados en los códigos de simulación energética más usados actualmente. Se compararon sus formas funcionales para establecer el grado de interpretación física que presentan los modelos. Por otro lado, a través de indicadores estadísticos, se comparan las diferencias entre los datos medidos sobre superficies verticales con los simulados por los modelos de cielo. Finalmente, se evalúan los factores de corrección propuestos en la literatura para los datos de radiación horizontal medidos por el piranómetro SPN1.

### 4.2. Comparación entre los modelos de cielo

Un enfoque útil para la comparación visual de las formas funcionales de los modelos de cielo es generar gráficos de superficies de irradiación (Robinson, 2004). Estos gráficos se basan en la irradiación (considerando solo la componente difusa) recibida por una superficie, para distintas inclinaciones y orientaciones de ésta durante un período de tiempo determinado.

La

Figura 4.1 muestra las superficies de irradiación obtenidas con los modelos de cielo durante un período 36 días de medición (278 al 302 y del 335 al 354 del calendario), calculado en intervalos de 5° de inclinación y de azimut de la superficie receptora.

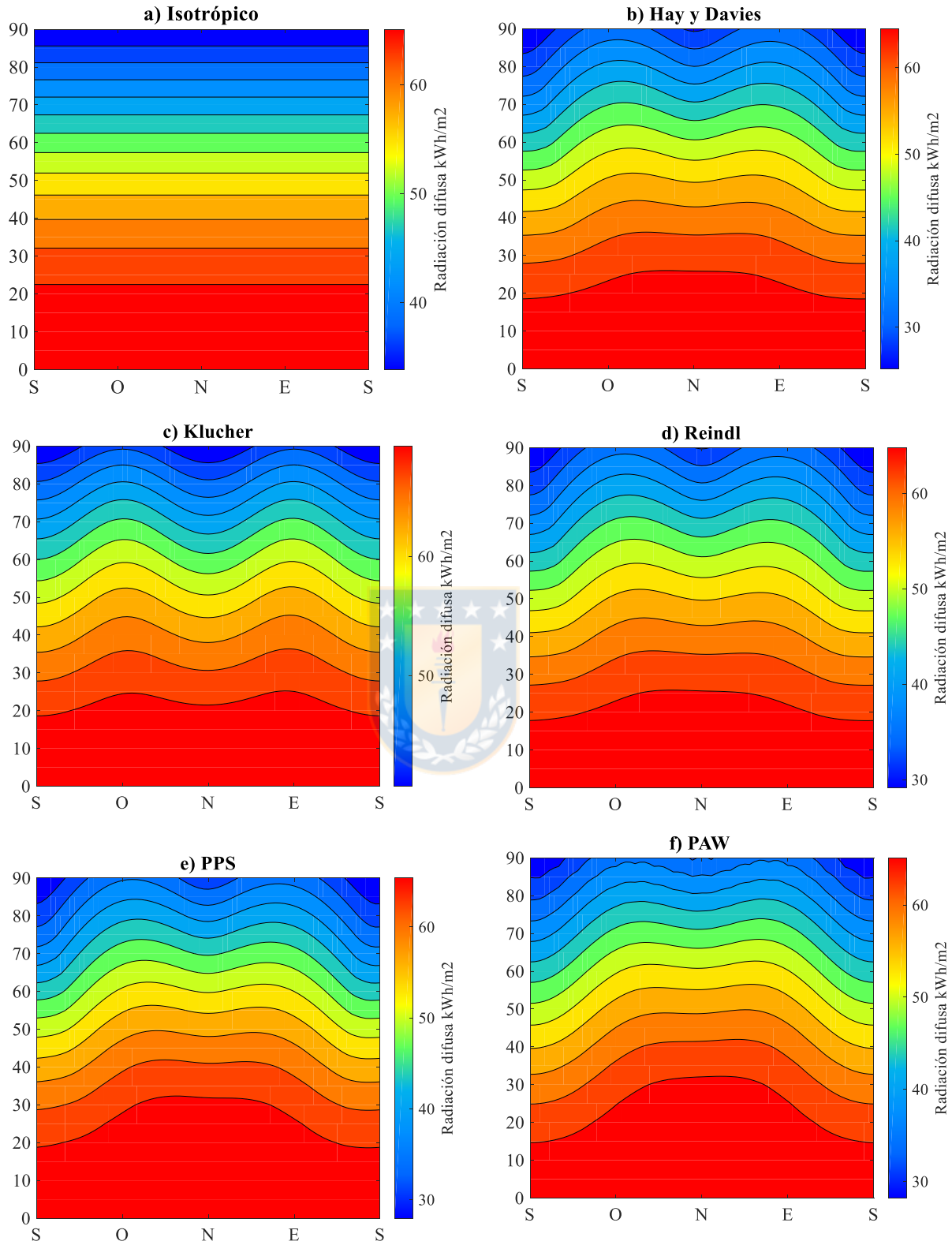


Figura 4.1. Superficies de irradiación (considerando solo la componente difusa) durante 36 días en Chillán, obtenidas con diferentes modelos de cielo

El eje vertical de los gráficos corresponde a la inclinación de la superficie respecto de la horizontal y el eje horizontal corresponde a su orientación. De la figura anterior, se puede observar que el modelo isotrópico (Figura 4.1-a) entrega la misma intensidad de energía solar difusa para una inclinación fija independiente de su orientación. Por otro lado, para inclinaciones menores a  $40^\circ$  los modelos PPS (Figura 4.1-e) y PAW (Figura 4.1-f) describen una concentración de energía hacia la orientación Norte. Lo mismo ocurre con los modelos Hay-Davies (Figura 4.1-b) y Reindl (Figura 4.1-d) para inclinaciones menores a  $35^\circ$ . Al aumentar la inclinación de la superficie, la concentración de energía recibida se hace mayor para las orientaciones Este y Oeste, debido a la trayectoria solar durante el período de medición. Este comportamiento se hace más evidente para el modelo de Klucher (Figura 4.1-c) en donde se puede observar a partir de inclinaciones mayores a  $20^\circ$ .

Se puede observar también que los modelos de Hay-Davies y de Reindl se parecen bastante entre sí, ya que se diferencian únicamente en la componente del brillo del horizonte, que está incorporada en el modelo de Reindl. Sin embargo, esta contribución del horizonte es baja en comparación con la contribución circunsolar e isotrópica para el período de medición.

### **4.3. Evaluación estadística de los modelos de cielo**

Se utilizaron los datos que cumplieron con los controles de calidad del Capítulo 3. Durante el período de medición se presentaron diversas condiciones de cobertura de cielo, pasando por cielos nublados e intermedios a cielos claros y azules, con un  $K_T$  que varía desde 0.129 (nublado) hasta 0.778 (despejado). Se realizó una inspección visual de los datos y se eliminaron los registros de los días en que se presentaron mediciones defectuosas, debido a mediciones atípicas del sensor y los días en que se hizo limpieza y mantención de los equipos. La base de datos se redujo en 3 días para la orientación este, y en 12 días para la orientación Norte.

Se obtuvo un total de 170 días de medición de radiación vertical para la orientación norte, 180 días para la orientación este y 163 días para la orientación Oeste, equivalentes a 16320 datos promediados en un intervalo de 15 minutos para la orientación Norte, 17280 para la orientación

Este y 15648 para la Oeste. Así mismo, en cada orientación se obtuvo la misma cantidad de datos de radiación global horizontal ( $G_{gh}$ ), radiación difusa horizontal ( $G_{dh}$ ) y radiación directa normal ( $G_{bn}$ ) obtenidos con el piranómetro SPN1. Por otro lado, las pruebas de calidad eliminaron los datos defectuosos correspondientes principalmente a los valores nocturnos y errores de medición. La prueba de consistencia no filtro ningún dato medido por el SPN1, lo que muestra la buena calidad de sus mediciones. En la Tabla 4.1 se muestra la cantidad de datos eliminados por las pruebas de calidad.

Tabla 4.1. Datos Eliminados por las pruebas de calidad

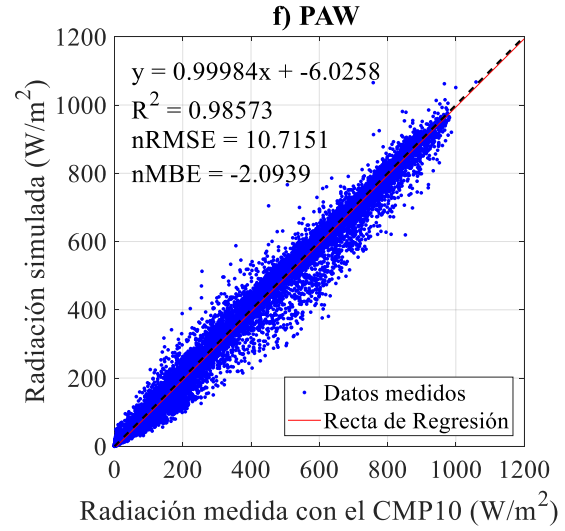
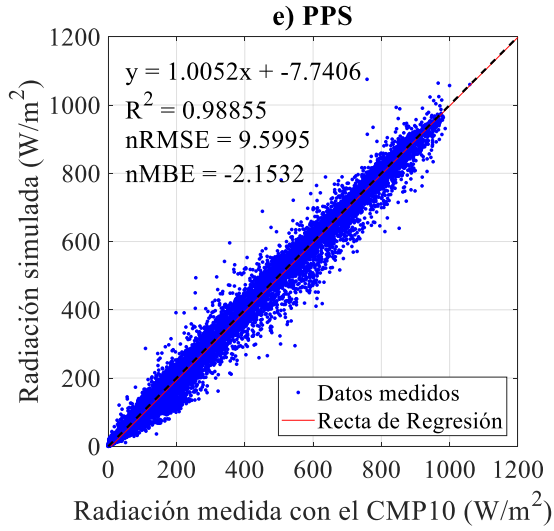
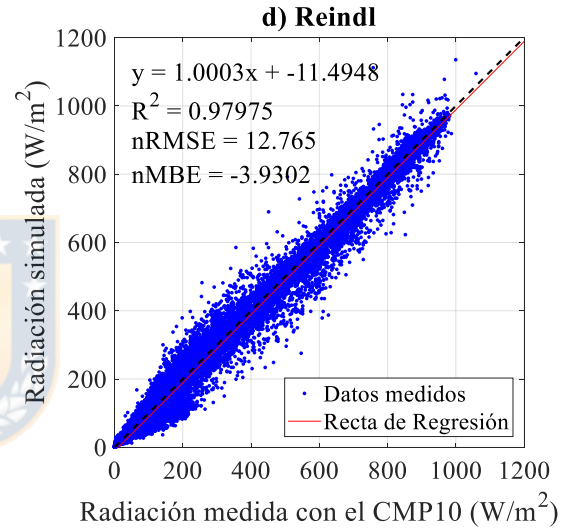
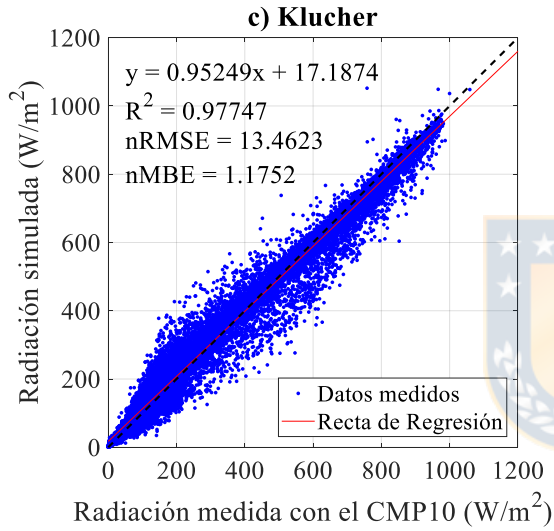
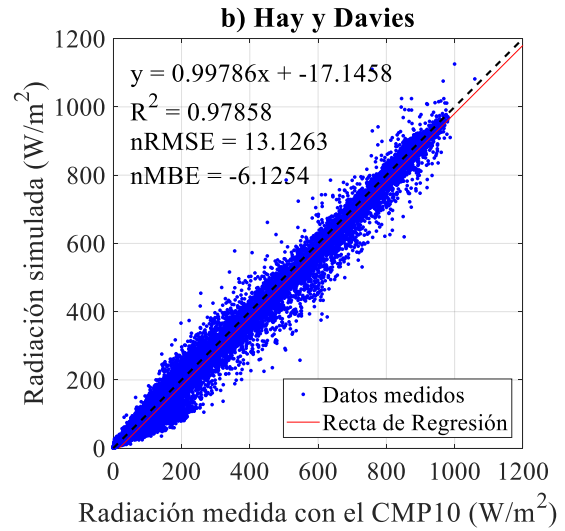
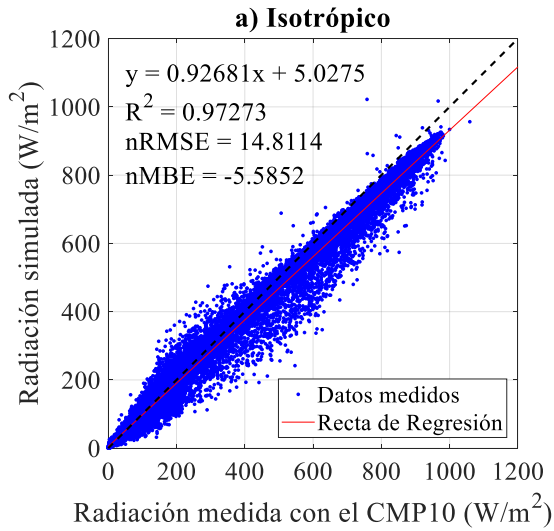
Pruebas	CMP10			SPN1		
	Norte	Oeste	Este	Norte	Oeste	Este
Prueba altura solar	8155	7940	8643	8155	7940	8643
Consistencia	0	0	0	-	-	-
Valores defectuosos	5	2	5	21	13	24
<b>Total</b>	<b>8160</b>	<b>7942</b>	<b>8648</b>	<b>8177</b>	<b>7954</b>	<b>8668</b>

Tras las pruebas de calidad, se obtuvo 8143 datos válidos de radiación vertical promediada en intervalos de 15 minutos para la orientación Norte, 8612 para la orientación Este y 7694 para la orientación Oeste, lo que en total significa 24928 de datos válidos. Con el SPN1, se obtuvo la respectiva cantidad de datos de radiación horizontal para cada orientación. La Tabla 4.2 resume la base de datos total, y los datos válidos para la evaluación de los modelos, obtenidos tras pasar por los controles de calidad.

Tabla 4.2. Datos totales y efectivos para la evaluación de desempeño de los modelos de cielo

Orientación	Datos iniciales	Datos efectivos
Norte	16320	8143
Este	17280	8612
Oeste	15648	7694

Una vez obtenidos los datos validos se procede a realizar la evaluación del desempeño de los modelos de cielo. La figura 4.7 muestra una comparación entre los valores simulados usando cada modelo de cielo y los valores medidos promediados cada 15 minutos. Cabe destacar que cada uno de los seis gráficos se generó usando la totalidad de los datos simulados y medidos en las tres orientaciones verticales. En el Anexo 4.1 se presentan estos gráficos de comparación para cada orientación.



En la figura anterior, se observa una alta correlación en todos los casos con coeficientes de determinación superiores a 0.97. En cada uno de los seis gráficos, se estimó una recta de regresión lineal con el método de los mínimos cuadrados para determinar las desviaciones de la pendiente de la recta obtenidas con respecto a la pendiente de 45 grados.

Las rectas, en general, presentan una pendiente cercana a la pendiente ideal igual a 1.00, que corresponde al caso ideal donde los valores simulados son iguales a los medidos. Los modelos PPS y PAW presentan rectas con pendientes de 1.005 y 0.999, respectivamente, con un término independiente de la recta cercana al valor de error de medición del piranómetro SPN1, con -7.74 y -6.03, respectivamente. Por otro lado, el modelo de Hay y Davies y en el Reindl presentan pendientes cercanas a 1 con valores de 0.997 y de 1.000, respectivamente. Sin embargo, el modelo de Hay y Davies posee un valor alto del término independiente, alcanzado - 15.95 W/m<sup>2</sup>. El modelo isotrópico y el Klucher, presentan las rectas con pendientes más bajas con valores de 0.926 y 0.952, respectivamente y sus términos independientes alcanzan valores de 5.03 y 17.18 W/m<sup>2</sup>, siendo este último el término independiente más alto de todos los modelos.

Los modelos PPS y PAW presentan el valor más bajo de nRMSE con un 9.60 % y 10.72 % respectivamente, lo que indica una dispersión baja entre los valores medidos y simulados. Los modelos de Hay-Davies y Reindl presentan un nRMSE un poco más grande, con valores de 13.12 % y 12.76 %, respectivamente. El nRMSE más alto lo presenta el modelo isotrópico y el de Klucher con un 14.81 % y un 13.46 % respectivamente.

En cuanto al estadístico MBE, el modelo de Klucher, PPS y PAW presentan los valores más bajos, con un 1.17%, -2.15 % y un -2.09 % respectivamente, mientras que el de Reindl alcanza un -3.93 %. Los modelos de Hay-Davies e isotrópico poseen el mayor nMBE con un -6.12 y -5.58 % respectivamente. Los valores negativos implican una subestimación de los valores predichos por los modelos mientras que los valores positivos indican una sobreestimación de los valores modelados.

Las Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4 muestran la radiación solar global medida por los piranómetros CMP10 en posición vertical y la simulada por el modelo PPS en la orientación Norte, Este y Oeste, respectivamente, durante algunos días representativos con distintas condiciones de cielo utilizando datos promediados en un paso de tiempo de 15 minutos. Para clasificar el tipo de cielo, se utiliza el índice de claridad del cielo ( $K_t$ ) definido como el cociente entre la radiación solar global recibida en una superficie horizontal y la radiación recibida fuera de la atmósfera en una superficie horizontal (tal como se describe en el Anexo 2.2). Así se tienen días claros ( $K_t \geq 0.65$ ), días parcialmente cubiertos de nubes ( $0.3 < K_t < 0.65$ ) y días nublados ( $K_t \leq 0.3$ ). El Anexo 4.2 muestra estos días representativos con los valores simulados con los seis modelos de cielo.



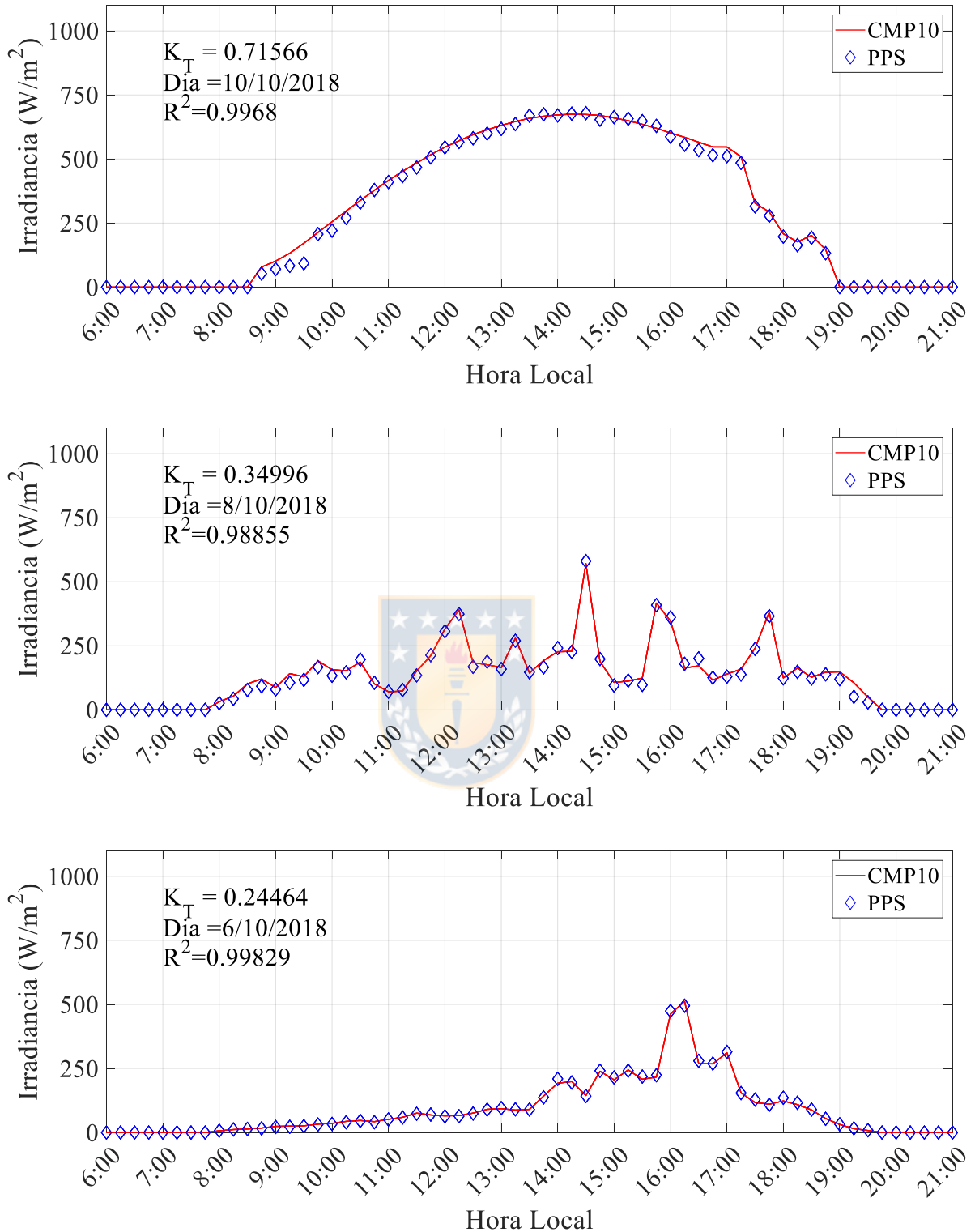


Figura 4.2. Radiación solar global medida por el CMP10 y la simulada con el modelo PPS, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Norte para un día claro, parcialmente cubierto y nublado.



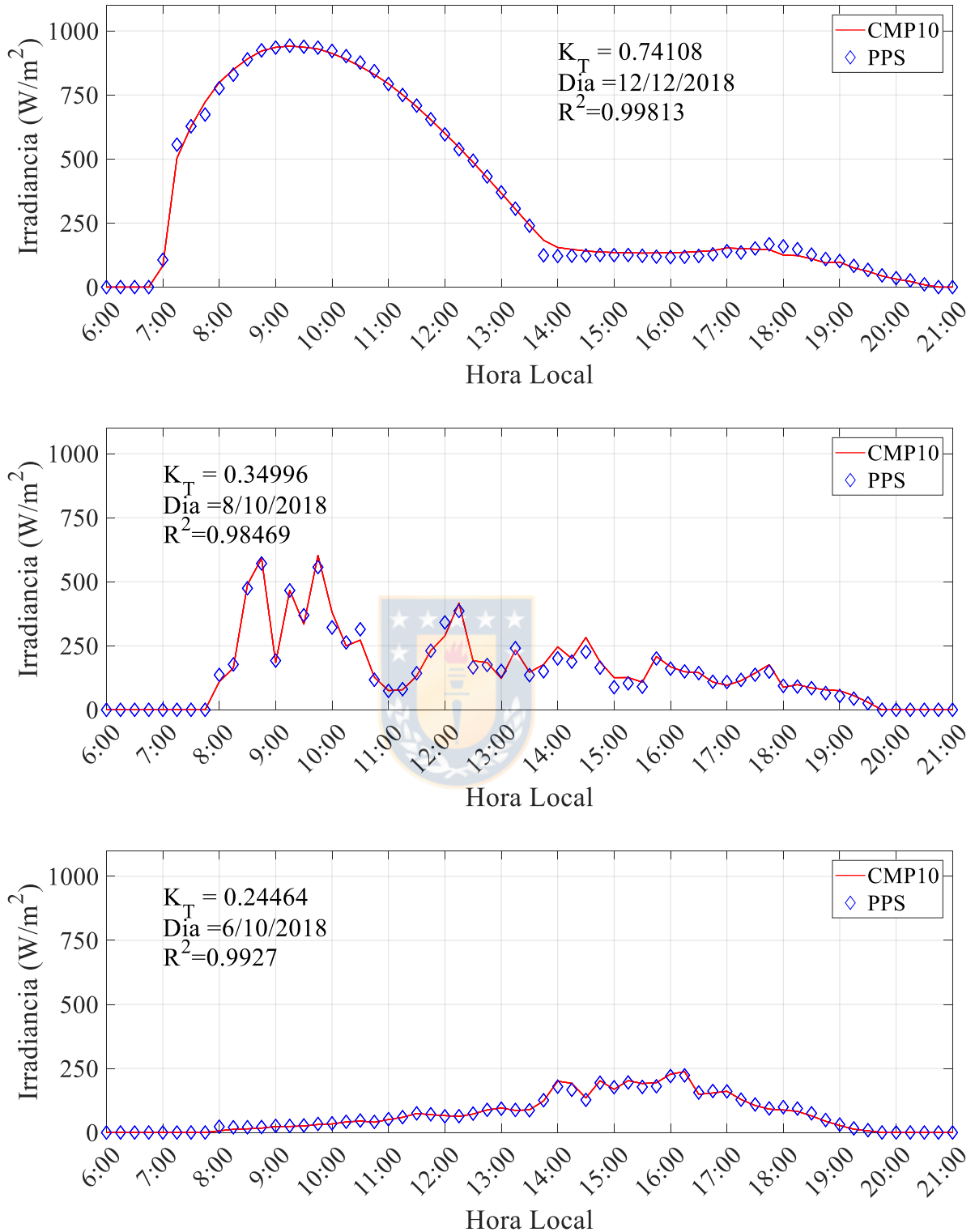


Figura 4.3. Radiación solar global medida por el CMP10 y la simulada con el modelo PPS, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Este para un día claro, parcialmente cubierto y nublado.

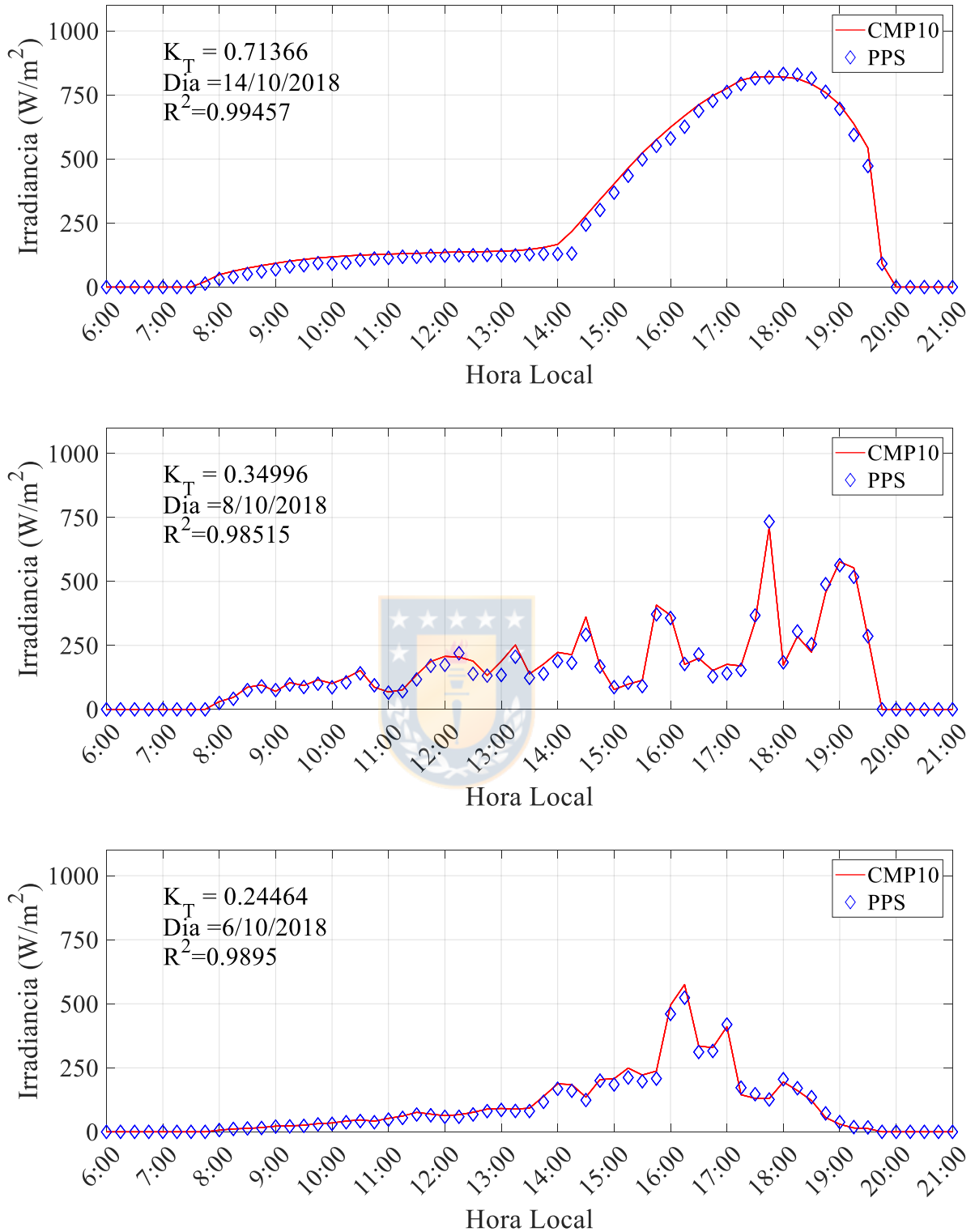


Figura 4.4. Radiación solar global medida por el CMP10 y la simulada con el modelo PPS, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Oeste para un día claro, parcialmente cubierto y nublado.

Como se observa en las figuras anteriores, los valores simulados de la radiación global sobre superficies verticales se ajustan bien a las mediciones realizadas por los piranómetros CMP10 en las tres orientaciones, con valores de coeficiente de determinación cercanos a 1.0 para tres condiciones de cielo distinta.

Un análisis diario del ajuste de los modelos se observa en la Figura 4.5, donde se muestra el  $R^2$  de cada día durante el período de medición en las 3 orientaciones (170 días para la orientación Norte, 180 para la Este y 163 para la Oeste). En color azul se observan los valores diarios de  $R^2$ , mientras que en rojo se representa el valor promedio.

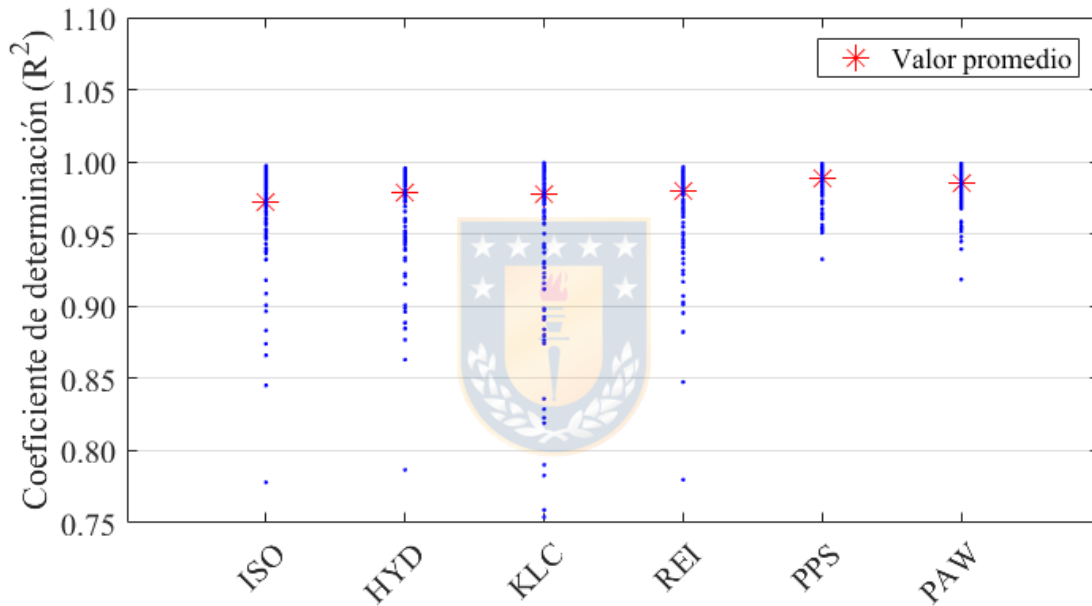


Figura 4.5.  $R^2$  diario entre la radiación global medida y calculado por los modelos de cielo en las orientaciones Norte, Este y Oeste

Los valores calculados muestran una muy buena correlación con los valores medidos, con un  $R^2$  promedio superior a 0.970 para todos los modelos. Los modelos PPS y PAW alcanzan los valores mayores de  $R^2$  con 0.989 y 0.986 respectivamente, seguido por el modelo de Reindl ( $R^2=0.979$ ) y el modelo de Hay y Davies ( $R^2=0.978$ ). Por otro lado, el modelo de Klucher e isotrópico presentan los valores más bajos, con  $R^2$  de 0.974 y 0.973, respectivamente. Un análisis desagregado del  $R^2$  según la cobertura de nubes se puede observar en la Figura 4.6, en azul se muestran los días nublados, en verde los días parcialmente cubiertos de nubes y en rojo los días claros.

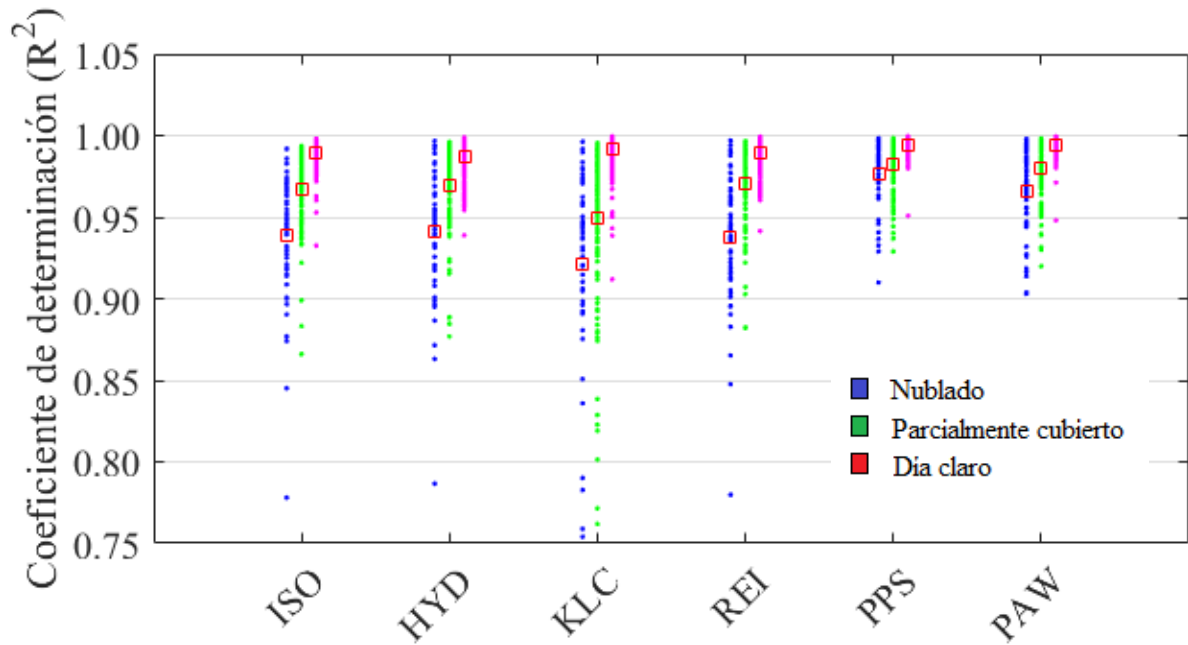


Figura 4.6.  $R^2$  diario entre la radiación global medida y calculado por los modelos de cielo en las orientaciones Norte, Este y Oeste según la cobertura de nubes

La base de datos contempla 18 días nublados, 46 días parcialmente cubiertos de nubes y 116 días claros. Se puede observar que para días claros todos los modelos superan el  $R^2$  igual a 0.98. Sin embargo, disminuyen su bondad de ajustes para días intermedios debido a la variabilidad de los datos y los tiempos de respuesta de los sensores. En días nublados, se encuentran valores más bajos de  $R^2$ . Esto se debe a que bajo estas condiciones de cielo, los valores de radiación solar sobre superficie vertical son bajos en magnitud y el  $R^2$  es más sensible a las diferencias entre lo medido y simulado.

El análisis estadístico sugiere que el mejor desempeño se obtiene utilizando los modelos PPS y PAW, siendo el modelo PPS ligeramente superior al tener un menor nRMSE y mayor  $R^2$ . El modelo Hay-Davies y el de Reindl poseen un desempeño moderado, posicionándose por detrás de los modelos PPS y PAW y con la ventaja de poseer una fácil implementación computacional. Los modelos de Klucher e isotrópico poseen el peor desempeño.

#### 4.4. Desviaciones entre las mediciones de los piranómetros SPN1 y CMP10

Para analizar la eficacia de las mediciones del SPN1 en el clima particular del lugar de medición, correspondiente a un clima templado continentalizado (Csa según la escala Koppen), se analizan las diferencias entre la radiación horizontal global medida por este instrumento y las mediciones del piranómetro CMP10. En este caso, se usa el CMP10 como patrón, ya que éste corresponde a un piranómetro de Clase A recientemente calibrado (ver Anexo 2.4). La Figura 4.7 presenta los 1775 pares de datos (1775 datos de radiación global obtenida con el SPN1 y 1775 datos de radiación global obtenido con el CMP10) obtenidos durante un período de 35 días (30 de noviembre al 21 de diciembre), los cuales cumplen con los controles de calidad descrito en secciones anteriores. Estos datos representan valores instantáneos de radiación solar global recibida sobre una superficie horizontal obtenidos como un promedio de las mediciones en un intervalo de tiempo de 5 minutos.

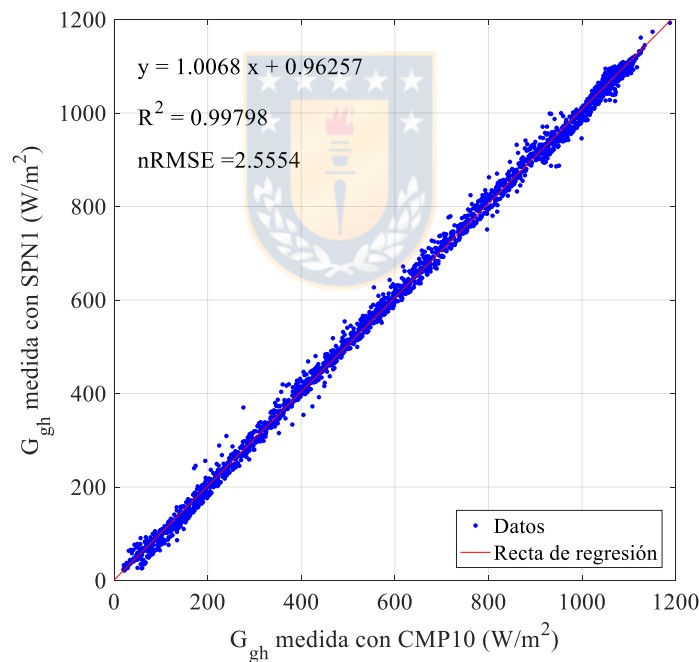


Figura 4.7. Comparación de las mediciones de radiación global horizontal medidas con el CMP10 y el SPN1.

De la Figura anterior, se puede observar una alta correlación con un coeficiente de determinación ajustado superior a 0.997. La recta de regresión está calculada utilizando el método de los mínimos cuadrados y presenta una pendiente de 1.0068. El nRMSE alrededor de la línea de regresión (como

porcentaje con respecto a la media de los valores medidos por el CMP10) es de 2.55 %, valor concordante a los encontrados por Badosa *et al.* (2014), y Myers (2010) para latitudes medias.

Siguiendo las recomendaciones de Badosa *et al.* (2014), se corrigieron los datos de radiación global horizontal dividiendo cada medición por el valor de la pendiente de la recta de regresión (1.0068). Por otro lado, las mediciones de la radiación solar difusa horizontal se corrigieron aplicando el factor de corrección de 1.05 sugerido por Badosa *et al.* (2014) para latitudes medias.

Tras la corrección de los datos, se simula la radiación global en las tres superficies inclinadas, orientadas hacia el Norte, Este y Oeste. El modelo escogido es el PPS, debido a que presentó el mejor desempeño. La Figura 4.8 muestra los valores simulados tras la corrección de los datos.

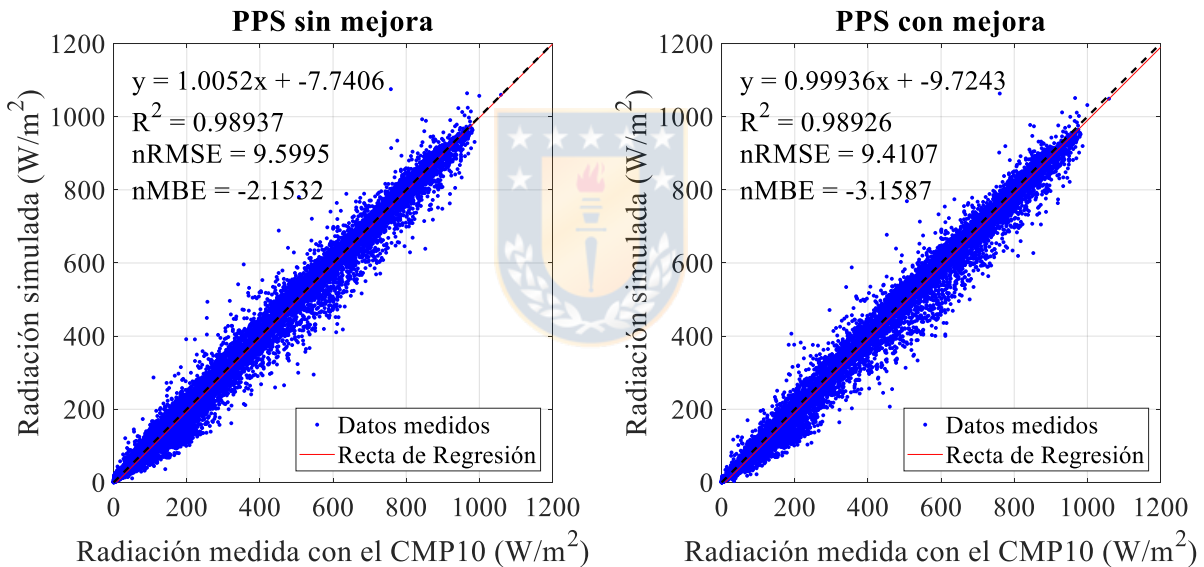


Figura 4.8. Comparación entre la radiación solar simulada con el modelo PPS y la radiación medida, promediada en intervalos de 15 minutos después de aplicar factores de corrección

Como se observa, el nRMSE es menor que el caso sin corrección, sin embargo, el MBE aumenta alcanzando un valor de -3.15 % y la recta de regresión mantiene prácticamente igual. Esto indica que tras la corrección el desempeño general del modelo no mejora debido a que los factores de corrección no se ajustan al clima particular de medición. Se debería aplicar factores de corrección *in situ* tras la medición de la radiación difusa horizontal y directa normal con instrumentos de medición Clase A.

#### 4.5. Conclusiones

A través del análisis estadístico y el uso de indicadores como el nRMSE, el nMBE, el  $R^2$  y rectas de regresión, se determinó que el mejor desempeño para simular la radiación solar sobre superficie inclinada lo presentan los modelos PPS y PAW, siendo el primero ligeramente superior. El modelo Hay-Davies y Reindl, poseen un desempeño más bajo, pero con la ventaja de poseer una fácil implementación computacional y tiempos cortos de simulación. El modelo isotrópico y de Klucher presentan el desempeño más bajo y subestiman significativamente los valores de radiación solar sobre superficies inclinadas.

Las mediciones de radiación global horizontal del piranómetro SPN1, durante un período de 35 días, poseen una buena correlación con los datos obtenidos por el piranómetro CMP10 en posición horizontal, presentando un nRMSE de 2.55 %. Este sesgo concuerda con los valores encontrados en la literatura, los cuales no superan el 4.50 % (Badosa *et al.*, 2014).

El factor de corrección de 1.05 propuesto por Badosa *et al.* (2014) sobre los datos de radiación difusa horizontal para latitudes medias no mejora el desempeño del modelo PPS. Esto se debe a la naturaleza sitio dependiente de la radiación solar, por lo tanto, para obtener un factor de corrección útil se debe medir *in situ* la radiación difusa horizontal con instrumentos Clase A.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Existe una amplia gama de modelos de cielo que transforman la radiación solar recibida sobre una superficie horizontal en radiación solar sobre una superficie inclinada. Es esencial utilizar un modelo adecuado para el correcto dimensionamiento de sistemas solares activos y la determinación del ángulo de inclinación que maximiza su captación solar, el dimensionamiento de sistemas de calefacción y enfriamiento de edificios, y para el diseño y evaluación del comportamiento térmico y lumínico de edificaciones para asegurar el confort de los usuarios. A pesar de la disponibilidad de variados modelos, no existe un modelo de aplicabilidad universal aceptado por la comunidad científica, ya que su desempeño depende de la naturaleza meteorológica (composición y espesor de la atmósfera, presencia de aerosoles, etc) y geográfica (latitud, altitud y relieves naturales cercanos) del sitio determinado. Por esto, se deben realizar validaciones para distintos climas y latitudes del globo terrestre. Por otro lado, los datos necesarios como entrada para los modelos no son de fácil acceso ni tampoco gratuitos y están disponibles en muy pocos lugares. Por lo tanto, esta tesis evaluó el desempeño de los modelos de cielo incorporados en los códigos de simulación energética utilizando datos medidos *in situ* en la zona central de la región del Biobío, durante el período de verano.

Una parte importante de este trabajo consistió en la instalación y operación de una estación radiométrica con su consiguiente adquisición de datos de radiación solar en sus componentes global, directa y difusa. Uno de los objetivos de esta estación es caracterizar el recurso solar en la zona central de la región del Biobío, la cual posee un clima mediterráneo continentalizado. Para lograr esto se utilizó el piranómetro SPN1, el cual es un instrumento sin partes móviles, que a diferencia de los pirheliómetros montados sobre seguidores solares y los piranómetros con bolas o bandas de sombra que poseen partes móviles que deben ser continuamente alineadas, no incurren en grandes costos de capital, ni de mantención y no requiere operación humana compleja en el lugar. Esta ventaja se ve contrastada por una degradación en la precisión de los datos. El segundo objetivo es la evaluación del desempeño de los modelos de cielo, para ello se utilizaron piranómetros CMP10 sobre superficies verticales orientadas hacia el Norte, Este y Oeste.



Los controles de calidad aplicados sobre los datos obtenidos por el SPN1 mostraron que las mediciones son bastante confiables, ya que prácticamente todos los datos superaron las pruebas de calidad, siendo principalmente descartados los valores nocturnos y los cercanos al amanecer y al atardecer. Por otro lado, la flexibilidad de la estación permitió la medición del albedo *in situ*, lo que se asegura precisión en el cálculo de la componente reflejada. Se obtuvo un valor promedio de albedo igual a 0.21. Además, se observó la naturaleza anisotrópica del albedo para días claros, con un notorio aumento de su valor para las horas cercanas al atardecer y el amanecer.

Se generó un código en MATLAB que tiene la flexibilidad de calcular la radiación solar incidente sobre superficies inclinadas con cualquier orientación. El código posee módulos de cálculo para la componente directa, difusa y reflejada; y utiliza parámetros con un nivel de precisión adecuado para aplicaciones ingenieriles. Las variables de entrada corresponden a datos de radiación solar horizontal medidos por la estación radiométrica. Además, permite la incorporación de los modelos de cielo para la posterior evaluación estadística de sus desempeños.

A través de indicadores estadísticos como el nRMSE, el nMBE y el  $R^2$ , se encontró que el mejor desempeño lo presentan el modelo PPS (Perez *et al.*, 1990) y el modelo PAW (Perez *et al.*, 1993), siendo el primero ligeramente superior. Los valores simulados con el modelo PPS presentaron un nRMSE de 9,59 %, un nMBE de -2.15 % y un  $R^2$  de 0.989 con respecto a los datos medidos, lo que demuestra la alta precisión alcanzada en la simulación de la radiación solar sobre superficies verticales, a partir de datos obtenidos con el piranómetro SPN1. Por lo tanto, se valida la hipótesis planteada. Por otro lado, el modelo de Hay y Davies (1980) y el de Reindl *et al.* (1990) tienen una precisión más baja, pero poseen la ventaja de una fácil implementación computacional. Finalmente, el modelo isotrópico (Liu y Jordan, 1963) y el de Klucher (1979) presentan el desempeño más bajo.

La comparación de las mediciones de la radiación global horizontal entre los piranómetros SPN1 y CMP10 muestra que los valores están muy correlacionados, con un alto nivel de ajuste a la recta de regresión ideal (pendiente de  $45^\circ$ ) y con un error bajo, similar al encontrado en la literatura (nRMSE igual a 2.55 %). Por otro lado, el uso del factor de corrección propuesto por Badosa *et al.* (2014) a las mediciones del SPN1 no mejoran el desempeño de los modelos durante el período de medición. Por lo tanto, sería interesante analizar estos factores para un set más amplio de datos y/o

obtener factores de corrección *in situ*, a partir de mediciones de la radiación difusa horizontal y de la radiación directa normal con instrumentos de Clase A.

La evaluación de los modelos de cielo se realizó en una escena sin obstrucciones físicas del cielo, es decir, el caso en que no existen edificaciones o relieves cercanos que bloqueen la radiación solar (directa y/o difusa) durante algunas horas o todo el día. Además, la superficie de suelo circundante corresponde a pasto natural, sin la presencia de heterogeneidades. Esto supone un entorno inmediato alejado del contexto urbano normal, en donde existe la presencia de variadas superficies tales como calles o superficies brillantes como ventanas, que pueden presentar propiedades reflectivas heterogéneas. Trabajos futuros deberían estudiar el desempeño de los modelos bajo un contexto urbano, a través de un experimento adaptado a tales circunstancias. Además, se debe complementar este trabajo con el análisis de un período invernal.



**REFERENCIAS**

Aguiar, R., y J. Page (1999) **European Solar Radiation Atlas**. Springer Verlag. Brussels, Belgium.

ASTM (2006) **Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables**. American Society for Testing and Materials. EE.UU.

Badosa, J., J. Wood, P. Blanc, C.N. Long, L. Vuilleumier, D. Demengel y M. Haeffelin (2014) Solar irradiances measured using SPN1 radiometers: uncertainties and clues for development. **Atmospheric Measurement Techniques**, **7**. 4267-4283.

Beckers, B. (2012) **Solar Energy at Urban Scale**. STE-Wiley. London

Benford, F., y J. E. Bock. (1939) Time Analysis of Sunshine. **Transactions of the Illuminating Engineering Society**, **34**. 200.

Bourges, B. (1985) Improvement in solar declination computation. **Solar Energy**, **35(4)**. 367-369.

Campbell, G., y J. Norman (1998) **An introduction to environmental biophysics**. Springer-Verlag. New York.

Cooper, P. I. (1969) The absorption of radiation in solar stills. **Solar Energy**, **12(3)**. 333-346.

Dammeier, F., G. Happle y J. Rohrer 2017. The contribution of water surface Fresnel reflection to BIPV yield. **Solar Energy**, **155**. 951-962.

Delta T - Devices. (2016) **User Manual for the Sunshine Pyranometer type SPN1 UM v4.1**, Cambridge, UK.

Drummond, A. R. (1956) On the Measurement of Sky Radiation. **Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie**, **7**. 413.

Duffie, J., y W. Beckman ( 2013) **Solar Engineering of Thermal Processes**. Jhon Wiley & Sons. New Jersey.

Dumortier, D. (1995) **Mesure, Analyse et Modélisation du gisement lumineux: Application à l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments**. Université de Savoie. Francia

Gates, D. M. (1980). **Biophysical Ecology**. Springer Verlag. New York

Gringorten, I. I., y P. Yepez (1992) **The division of a circle or spherical surface into equal-area cells or pixels**. Air Force Geophysics Laboratory. Massachusetts, EE. UU.

Gueymard, C. (1986) An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. **Solar Energy**, **38(5)**. 367-386.

Gueymard, C. A. (2009) Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted rradiance for solar engineering applications. **Solar Energy**, **83**. 432-444.

- Gueymard, C., y D. Myers (2008) Validation and Ranking Methodologies for Solar Radiation Models. En C. Gueymard y D. Myeres (eds). **Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface**. Springer Verlag.
- Gueymard, C., y J. Ruiz-Arias (2016) Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance. **Solar Energy**, **128**. 1-30.
- Hay, J., y J. Davies (1980) **Calculation of the solar irradiance incident on an inclined surface**. First Canadian Solar Radiation Data Workshop. Toronto, Ontario, Canada.
- Ineichen, P., O. Guisan y R. Perez (1990) Ground-reflected radiation and albedo. **Solar Energy**, **44(4)**. 207-214.
- Ineichen, P., R. Perez y R. Seals (1987) The importance of correct albedo determination for adequately modeling energy received by tilted surfaces. **Solar Energy**, **39(4)**. 301-305.
- Iqbal, M. (1983) **An introduction to solar radiation**. (A. Press, éd.). Toronto, Canadá
- ISO (2018) **Solar energy -- Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation**. International Organization for Standardization. EE.UU.
- Kasten, F., y A. Young (1989) Revised optical air mass tables and approximation formula. **Applied Optics**, **28(22)**. 4735-4738.
- Kendrick, D. (1994) **Guide to recommended practice of daylight measurement**. International Commission on Illumination. Wien, Austria.
- Khalil, S. A., y A. M. Shuffle (2016) Evaluation of transposition models of solar irradiance over Egypt. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. **66**. 105-119.
- Kipp and Zonen (2010) **Kipp & Zonen SOLYS 2 Sun Tracker with Pyrheliometer**. Ilustración. <https://www.flickr.com/photos/kippzonen/5528938224>. Visitado el 13/03/2018.
- Kipp and Zonen (2016) **Instruction Manual. CMP series - Pyranometer**. Delft, Holanda.
- Kipp and Zonen (2017a) **Instruction Manual. Solys2**. Delft, Holanda.
- Kipp and Zonen (2017b) **CM 121 Shadow Ring for the measurement of diffuse radiation**. Brochure. Delft, Holanda.
- Klucher, T. (1979) Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, **23**. 111-114.
- Kondratyev, K. Y., y M. P. Manolova (1960) The radiation balance of slopes. **Solar Energy**, **4(1)**. 14-19.
- Kurtz, B., y J. Kleissl (2017) Measuring diffuse, direct, and global irradiance using a sky imager. **Solar Energy**, **141**. 311-322.

- Lai D., X. Zhou y Q. Chen (2017) Modelling dynamic thermal sensation of human subjects in outdoor environments. **Energy and Buildings**, **149**. 16-25.
- Littlefair, P. (1994) A comparison of sky luminance models with measured data from Garston, United Kingdom. **Solar Energy**, **4**. 1-19.
- Liu, B., y R. Jordan (1993) The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors. **Solar Energy**, **7(2)**. 53-74.
- Liu, B., y R. Jordan (1960) The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, **4**. 1-19.
- Liu, B., R. Stouffs, A. Tablada, N. Wong y J. Zhang (2017) Comparing micro-scale weather data to building energy consumption in Singapore. **Energy y Buildings**, **152**. 776-791.
- Long, C. N., Bucholtz, A., Jonsson, H., Schmid, B., Vogelmann, A. M., y J. Wood (2010) A Method of Correcting for Tilt from Horizontal in Downwelling Shortwave Irradiance Measurements on Moving Platforms. **Atmospheric Measurement Techniques**, **4**. 78-87.
- Long, C., y Y. Shi (2008). An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. **Open Atmospheric Science Journal**, **2**. 23-37.
- Loutzenhiser, P. G., H. Manz, C. Felmann, P.A. Strachan, T. Frank y G.M. Maxwell (2007) Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. **Solar Energy** , **81**. 254-267.
- Mardaljevic, J. (1995) Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. **Lighting Research and Technology**, **27(4)**. 181-188.
- Myers, D. R., y S.M. Wilcox (2009) **Relative accuracy of 1-minute and daily total solar radiation data for 12 global and 4 direct beam solar radiometers**. American Solar Energy Society Annual Conference. Buffalo, New York
- Mateus, N., A. Pinto y G. Carrilho da Graca (2014) Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. **Energy and Buildings**, **75**. 511-522.
- McCullough, E. C., y W. P. Porter (1971) Computing clear day solar radiation spectra for the terrestrial ecological environment. **Ecology**, **52**. 1008-1015.
- Merino, L. (2013) **Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation thermique en milieu urbain**. Université de Technologie de Compiègne. Compiègne, Francia.
- MINENERGIA (2015) **Energía 2050. Política Energética de Chile**. Ministerio de Energía. Santiago.
- MINVU (2013) **Estrategia Nacional de Construcción Sustentable**. Ministerio de vivienda y urbanismo. Santiago.

- MINVU (2016) **Estándares de Construcción Sustentable para viviendas en Chile**. Ministerio de vivienda y urbanismo. Santiago.
- MINVU (2018) **Manual de procedimientos calificación energética de viviendas en Chile**. Ministerio de vivienda y urbanismo. Santiago.
- Monteith, J., y M. U. (2010) **Principle of Environmental Physics**. Academic Press. Burlington, USA.
- Moon, P., y D. Spencer (1942) Illumination from non-uniform sky. **Illuminating Engineering**, **37(10)**. 707-726.
- Moradi, I. (2009) Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. **Energy**, **34**. 1-6.
- Muneer, T., y F. Fairouz (2002) Quality control of solar radiation and sunshine measurements lessons learnt from processing worldwide databases. **Building Services Engineering and Research and Technology**, **23(3)**. 151-166
- Myers, D. R. (2010) **Comparison of direct normal irradiance derived from silicon and thermopile global hemispherical radiation detectors**. SPIE Solar Energy C Technology. International Society for Optics and Photonics.
- NASA (1971) **Solar Electromagnetic Radiation**. National Aeronautics and Space Administration. USA.
- Nkendirim, L. C. (1972) A note on the albedo of surfaces. **Journal of Applied Meteorology**, **11**. 867-874.
- Notton, G., C. Cristofari, y P. Poggi (2006) Performance evaluation of various hourly slope irradiation models using Mediterranean experimental data of Ajaccio. **Energy Conversation and Management**, **47**. 147-173.
- NREL (1993) **User's Manual for SERI\_QC Software - Assessing the Quality of Solar Radiation Data**. NREL/TP-463-5608. National Renewable Energy. Golden, Colorado.
- Padovan, A., y D. Del Col (2010) Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes. **Solar Energy**, **84**. 2068-2084.
- Peña Sanchez, D. (2001) Deducción de distribuciones: el método de Monte Carlo. En: **Fundamentos de Estadística**. Alianza Editorial. Madrid, España.
- Perez, R., P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky y R. Stewart (1990) Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. **Solar Energy**, **44**. 271.
- Perez, R., R. Seal y J. Michalsky (1993) All-weather model for sky luminance distribution- Preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, **50(3)**. 235-245.
- Piratheepan, M., y T. Anderson (2017) Performance of a building integrated photovoltaic/thermal concentrator for facade applications. **Solar Energy**, **153**. 562-573.

- Psilouglou, B., S. Lykoudis y D. Kouvas (2013). Performance Assessment of an Integrated Sensor for Simultaneous Measurements of Global and Diffuse Radiation Components at Athens Area. En C. Helmis y P. Nastos. **Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics**. Springer-Verlag.
- Ramesh, T., R. Prakash y K. Shukla (2010) Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Building**, **42**. 1592-1600.
- Reindl, D., W. Beckman y J. Duffie (1990) Evaluation of hourly tilted surface radiation models. **Solar Energy** , **45**. 9-17.
- Robinson, D., y A. Stone (2004) Solar radiation modelling in the urban context. **Solar Energy**, **77**. 295-309.
- Royapoor, M., y T. Roskilly (2015) Building model calibration using energy and environmental data. **Energy and Buildings**, **94**. 109-120.
- Scharmer, K., y J. Greif (2000) **European Solar Radiation Atlas: Fundamentals**. Ecole des Mines de Paris, Paris.
- Shahrestani M., R. Yao, E. Essah, L. Shao, A. Oliveira, A. Hepbasli, E. Biyik, T. Del Caño, E. Rico y J. L. Lechón (2017) Experimental and numerical studies to assess the energy performance of naturally ventilated PV façade systems. **Solar Energy**, **147**. 37-51.
- Sillion, F. y C. Puech (1994) **Radiosity and global illumination**. Morgan Kaufmann Publishers, Inc. San Francisco, California.
- Spencer, J. W. (1971) Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, **2(5)**. 172.
- Sproul, A. (2007) Derivation of the solar geometric relationships using vector analysis. **Renewable Energy**, **32(7)**. 1187-1205.
- Steven, M.; y M. H. Unsworth (1979) The diffuse solar irradiance of slopes under cloudless skies. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, **105**. 593-602.
- Thevenard, D., y K. Haddad (2006) Ground reflectivity in the context of building energy simulation. **Energy and Buildings**, **38**. 972-980.
- Utrillas M. P., J. A. Martinez-Lozano y A.J. Casanovas (1991) Evaluation of models for estimating solar irradiation on vertical surfaces at Valencia, Spain. **Solar Energy**, **47(3)**. 223-229.
- Vallance L., B. Charbonnier, N. Paul, S. Dubost y P. Blanc (2017) Towards a standardized procedure to assess solar forecast accuracy: A new ramp and time alignment metric. **Solar Energy**, **150**. 408-422.
- Walraven, R. (1978) Calculating the sun position. **Solar Energy**, **20(5)** 393-397.
- WMO (2018) **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. WMO-No. 8. World meteorological organization. Geneva, Suiza.
- Wood, J. (1999) **Solar radiation sensor**. Patente nº WO 99/13359.

Xiong, J., y A. Tzempelikos (2016) Model-based shading and lighting controls considering visual comfort and energy use. **Solar Energy**, **134**. 416-428.

Yang, D., (2016) Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks. **Solar Energy**, **136**. 288-302.

Younes, S., R. Claywell y T. Muneer (2005) Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. **Energy**, **30**. 1533-1549.

Young, A., (1994) Air mass and refraction. **Applied Optics**, **33(6)**. 1108-1110.







**ANEXOS**

### Anexo 2.1. Atenuación atmosférica de la radiación solar

La radiación solar recibida en la superficie terrestre está sujeta a variaciones producidas por dos fenómenos físicos: la difusión atmosférica producida por las moléculas de aire y agua, y por las partículas de polvo; y absorción atmosférica producidos principalmente por ozono ( $O_3$ ), agua ( $H_2O$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

La dispersión atmosférica de la radiación a medida que atraviesa la atmósfera es causada por su interacción (colisión) con las moléculas de aire, agua (vapor y gotas) y partículas de polvo. Esta colisión desvía la radiación de su trayectoria. El grado en que actúa este fenómeno depende de la densidad y el tamaño de las partículas y las moléculas atmosféricas en relación con la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación y el grosor de la capa atmosférica que se debe atravesar, lo cual es una cantidad sitio dependiente y que varían en el tiempo. Este espesor, llamado la longitud de la ruta de radiación a través de las moléculas de aire, se describe por la masa óptica de aire.

La masa de aire óptica relativa ( $m$ ) es la relación de la cantidad de masa de aire que atraviesa la luz solar para llegar a la superficie de la Tierra y la masa de aire atravesada de los rayos para alcanzar la superficie de la Tierra si el sol estuviera en el cenit. La masa de aire siempre es mayor o igual (sol en el cenit) a la unidad. Si no se considera la curvatura de la tierra y una masa homogénea de aire o densidad constante  $m$  puede calcularse como

$$m = \sec \theta_z \quad (\text{A.2.1})$$

Si se considera solo la curvatura de la Tierra, esta expresión tiene un error del 2 % para  $\theta_z = 80^\circ$  y el error aumenta a 7.15 % para  $\theta_z = 85^\circ$ . Por lo tanto, se tiene una expresión para calcular  $m$  que da buenos resultados para ángulos cenitales menores a  $80^\circ$ . El efecto de la curvatura de la superficie de la tierra es muy importante cuando el ángulo del cenit aumenta ( $\theta_z > 80^\circ$ ) y debe tenerse en cuenta. Sin embargo, la densidad del aire disminuye con la altitud.

Para superar este problema (la curvatura de la tierra y la densidad no uniforme), se han propuesto varias expresiones (Kasten y Young 1989, Young 1994) que conducen a resultados buenos. Para ángulos cenitales superiores a  $80^\circ$ , se ha escogido la expresión propuesta por Kasten y

Young (1989) que es de uso generalizado. Esta aproximación depende de la altitud ( $z$ ) del lugar para calcular  $m$ :

$$m = \frac{\exp(-0.0001184 z)}{\cos \theta_z + 0.5057(96.07995 - \theta_z)^{-1.634}} \quad (\text{A.1.2})$$

Esta expresión que toma en cuenta la curvatura de la tierra y la densidad variable del aire, entrega un valor de  $m = 37.91$  para  $z = 0$  metros y  $\theta_z = 90^\circ$ , es decir, un valor muy diferente por relación con la expresión que no tiene en cuenta la curvatura de la tierra ( $m = \infty$ ). Con el aumento en  $m$ , el espectro ultravioleta y visible sufre una disminución mucho más fuerte que el espectro infrarrojo debido a la dispersión y absorción.

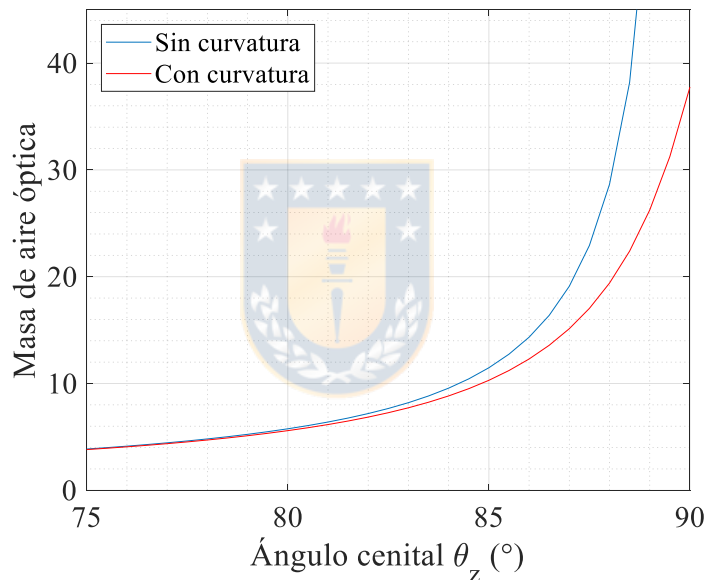


Figura A.2.1. Variación de la masa de aire óptica relativa con respecto al ángulo cenital del sol

La **absorción** de la radiación solar por la atmósfera terrestre se debe en gran medida al ozono para el espectro ultravioleta, y al vapor de agua y al dióxido de carbono para el infrarrojo. Este fenómeno implica una transferencia de energía entre las moléculas y la radiación lo que consecuentemente conduce a una atenuación de la radiación solar. La absorción es casi completa para la radiación de onda corta ( $\lambda < 290$  nm) debido al ozono en la atmósfera superior y disminuye a medida que  $\lambda$  aumenta por encima de 290 nm hasta los 350 nm donde no hay absorción., pero hay una baja absorción de ozono en las cercanías de la banda  $\lambda = 600$  nm. El vapor de agua se absorbe fuertemente en el infrarrojo. Las bandas de absorción más grandes se colocan cerca de  $\lambda = 1000$ ,  $\lambda$

= 1400 y  $\lambda = 1800$  nm. Por encima de 2500 nm, la transmisión de la atmósfera es débil debido a la absorción producida por el  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ . La energía fuera de la atmósfera después de los 2500 nm es menor del 5 % del espectro total.

Los efectos de la dispersión por moléculas de aire y la absorción por  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$  en la distribución espectral de la radiación solar se observan en la Figura A.2.2.

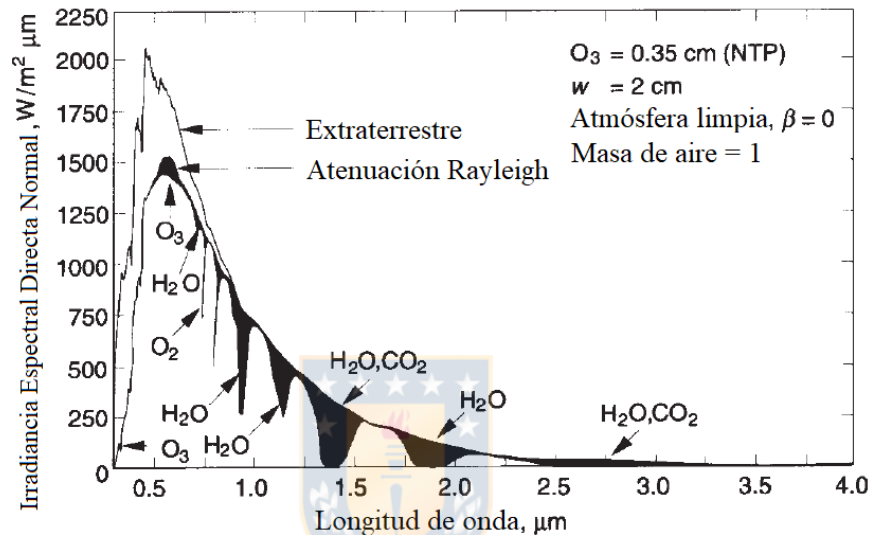


Figura A.2.2. Efectos de la dispersión y absorción atmosférica en la distribución espectral de la irradiancia solar. Adaptado de Iqbal (1983)

Los rayos-x y otras formas de radiación de onda muy corta del espectro solar son altamente absorbidas en la ionósfera por el nitrógeno, oxígeno y otros componentes atmosféricos. Para las longitudes de onda mayores a 2500 nm, una combinación entre baja radiación extraterrestre y una fuerte absorción por el  $\text{CO}_2$ , hacen que muy poca energía llegue a la superficie terrestre.

## Anexo 2.2. Distribución de días claros y nublados

Es posible determinar el grado de nubosidad de un día específico a través de índice de claridad ( $K_T$ ), el cual mide la claridad de la atmósfera. Es la fracción la radiación solar que es transmitida por la atmósfera que llega a la superficie terrestre, comparada con la radiación extraterrestre. El índice de claridad puede ser definido de manera instantánea, horaria y mensual. Para obtenerla de forma diaria se utiliza la siguiente expresión:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (\text{A.2.2})$$

Donde  $H$  es la radiación horizontal integrada en el período de tiempo de un día, es decir es la energía diaria recibida en la superficie terrestre en unidades de  $\text{Wh/m}^2$ . Mientras que  $H_0$  es la radiación extraterrestre integrada en un día, y se obtiene de la siguiente expresión.

$$H_0 = \frac{24}{\pi} G_{\text{on}} \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (\text{A.2.3})$$

Los valores típicos del índice de claridad del cielo varían desde  $K_T = 0.20$  para días muy nublados hasta  $K_T = 0.75$  para días muy claros y soleados. La Figura A.2.3 muestra la variación de  $H$  y  $H_0$  durante el año en la ciudad de Concepción. Este gráfico se construyó utilizando datos anuales obtenidos de un año meteorológico típico<sup>1</sup> (*Typical Meteorological Year*; TMY por sus iniciales en inglés). La Figura A.2.4 muestra la variación del  $K_T$  durante el año, construida a partir de los valores de  $H$  y  $H_0$ .

---

<sup>1</sup> El año meteorológico típico (TMY por sus iniciales en inglés) es una recopilación de datos meteorológicos representativos de una localidad específica. Se construye en base a una metodología estadística de selección que utiliza datos históricos registrados para representar el promedio a largo plazo de cada parámetro climatológico requerido.

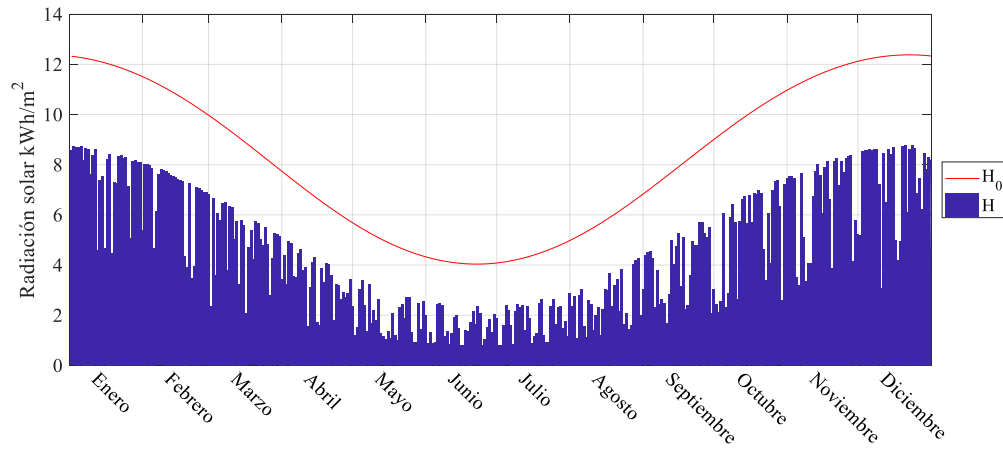


Figura A.2.3. Variación del H y H<sub>2</sub> durante el año

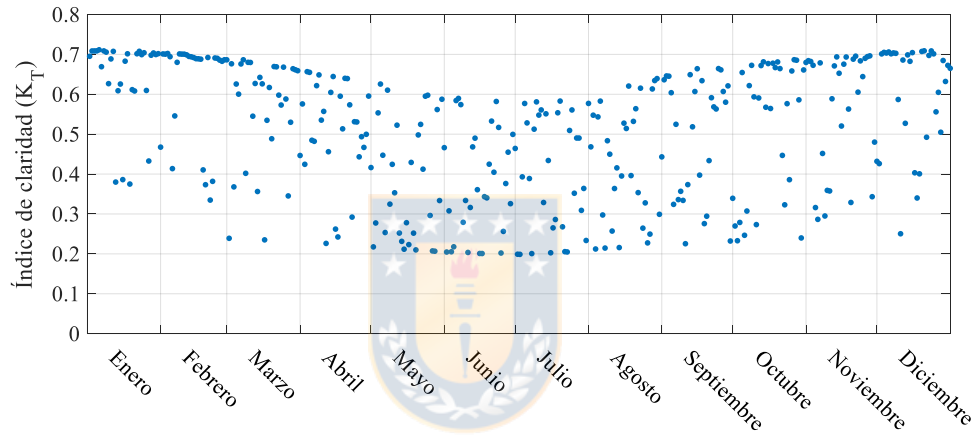


Figura A.2.4. Variación del K<sub>T</sub> durante el año

En la Figura A.2.4 se puede observar que en meses de verano los valores de K<sub>T</sub> son más altos debido a la presencia de mayor cantidad de días claros y con pocos días de días cubiertos. En invierno se observan los valores más bajos de K<sub>T</sub> cuando los días son muy nublados.

## **Anexo 2.3. Conceptos**

### **Anexo 2.3.1. Constante solar**

La radiación emitida por el sol y su relación espacial con la tierra resulta es una intensidad casi fija de radiación solar en las afueras de la atmosfera terrestre. La constante solar  $G_{sc}$  es la energía proveniente del sol por unidad de tiempo recibida en una unidad de superficie que es perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, a una distancia promedio del sol ubicada fuera de la atmosfera terrestre.

Con la disponibilidad de aviones, globos y naves espaciales se permitió la medición directa de la radiación solar fuera de la atmósfera. Estas mediciones se hicieron con variados instrumentos en nueve programas experimentales separados (Duffie and Beckman, 2013), los cuales resultaron en un valor de  $G_{sc}$  de  $1353 \text{ W/m}^2$  con un error estimado de  $\pm 1.5 \%$ . Este valor es el aceptado por la NASA (1971) y por la Sociedad Americana de Testeo y Materiales (ASTM, 2006). El WRC ha adoptado un valor de  $1367 \text{ W/m}^2$ , con una incerteza de  $\pm 1.0 \%$ . Este valor tiene pequeñas variaciones anuales y semanales producto de la variación en la distancia tierra-sol y la actividad solar (manchas solares). Para los cálculos de este trabajo se ha tomado el valor adoptado por la WRC de  $1367 \text{ W/m}^2$ .

### **Anexo 2.3.2. Variación de la radiación extraterrestre**

Existen dos fuentes de variación en la radiación extraterrestre. La primera es la variación de la radiación emitida por el sol que es menor a  $\pm 1.5 \%$  con distintas periodicidades y está asociada a las llamaradas solares. Sin embargo, para propósitos ingenieriles, en vista de las incertezas y variabilidad de la transmisión atmosférica, la energía emitida por el sol puede ser considera como constante (Duffie and Beckman, 2013).

La segunda corresponde a la variación de la distancia entre el sol y la Tierra durante el movimiento de traslación, la cual produce una variación de  $\pm 3.3 \%$ . La radiación solar extraterrestre ( $G_{on}$ ) varía

durante el año encontrándose su mínimo en el afelio, cuando la tierra está orbitando en el punto más alejado al sol, en el solsticio de invierno (entre el 21 y 22 de junio). Mientras que el máximo ocurre cuando el Tierra está en el perihelio o el punto orbital más cercano al sol, en el solsticio de verano (entre el 21 y 22 de diciembre).

Una ecuación simple con certeza adecuada para la mayoría de las aplicaciones ingenieriles está dada por la Ecuación A.2.4 (Duffie and Beckman, 2013). Spencer (1971), como se cita en Iqbal (1983), entrega una ecuación más precisa ( $\pm 0.01\%$ ), obtenido por desarrollo en series de Fourier, en la forma de la Ecuación A.2.5.

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \left( B + \frac{360}{365} \right) \right) \quad (\text{A.2.4})$$

$$G_{on} = G_{sc} (1.000110 + 0.034221 \cos(B) + 0.001280 \sin(B) + 0.000719 \cos(2B) + 0.000077 \sin(2B)) \quad (\text{A.2.5})$$

Donde  $G_{on}$  es la radiación extraterrestre incidente en un plano normal a la radiación en el día  $n$  del año, que varía desde el 1 para el primero de enero hasta el 365 para el 31 de diciembre. Febrero se considera de 28 días y los años bisiestos no son considerados.  $B$  está dado por la Ecuación A.2.6.

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (\text{A.2.6})$$

La Figura A.2.5 muestra la variación de las Ecuaciones A.2.4 y A.2.5 durante el año.

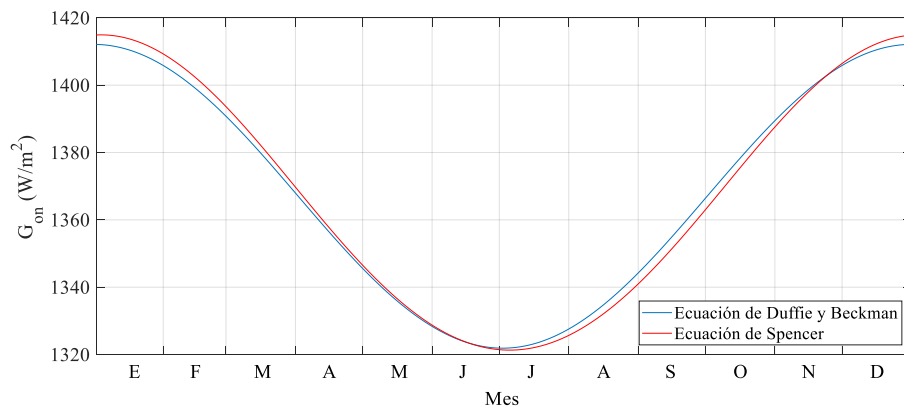


Figura A.2.5. Variación de radiación solar extraterrestre según la época del año



Merino (2013) muestra que las diferencias entre las expresiones anteriores son insignificantes (menos del 0.3 %). Por lo tanto, para los propósitos de esta tesis, se utilizará la expresión simplificada propuesta por Duffie and Beckman (2013).

### Anexo 2.3.3. Declinación del sol

La declinación del sol ( $\delta$ ) representa la posición angular del sol al mediodía solar (es decir, cuando el sol está sobre el meridiano de algún lugar determinado) con respecto al plano ecuatorial de la Tierra. Durante el año, la declinación varía desde  $-23.45^\circ$  en el solsticio de verano hasta  $23.45^\circ$  en el solsticio de invierno. Su variación máxima durante un día dado es menor a  $0,5^\circ$  y ocurre en el equinoccio. Por lo tanto, para fines ingenieriles se puede suponer una declinación constante para un día dado (Iqbal, 1983). Se han desarrollado varias expresiones matemáticas para calcular la declinación del sol con diferentes niveles de precisión. Cooper (1969) propone la Ecuación A.2.7 para determinar ( $\delta$ ) en radianes:

$$\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365} (n + 284)\right) \quad (A.2.7)$$



En donde n corresponde al día del año. Por otro lado, Spencer (1971), como se cita en Iqbal (1983), propone una ecuación más precisa (con un error menor a 0.035 %):

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos(B) + 0.070257 \sin(B) - 0.006758 \cos(2B) \\ & + 0.000907 \sin(2B) - 0.002697 \cos(3B) + 0.00148 \sin(3B) \end{aligned} \quad (A.2.8)$$

La expresión anterior tiene un error máximo de  $0.0343^\circ$  (0.0006 rad), y si se omiten los dos últimos términos, el error máximo aumenta a  $0.2^\circ$  (0.0035 rad). Se han desarrollado otras expresiones con distintos grados de precisión como la propuesta por Walraven (1978) y Bourges (1985). Merino (2013) compara cada expresión para los años 2010, 2011, 2012 y 2013, encontrando que la expresión de Cooper entrega los peores resultados, y tiende a subestimar el valor de la declinación solar hasta en  $1.1^\circ$  en el año bisiesto del 2012. La fórmula de Spencer tiene una desviación menor a  $0,5^\circ$  y el peor desempeño se obtiene durante el año bisiesto

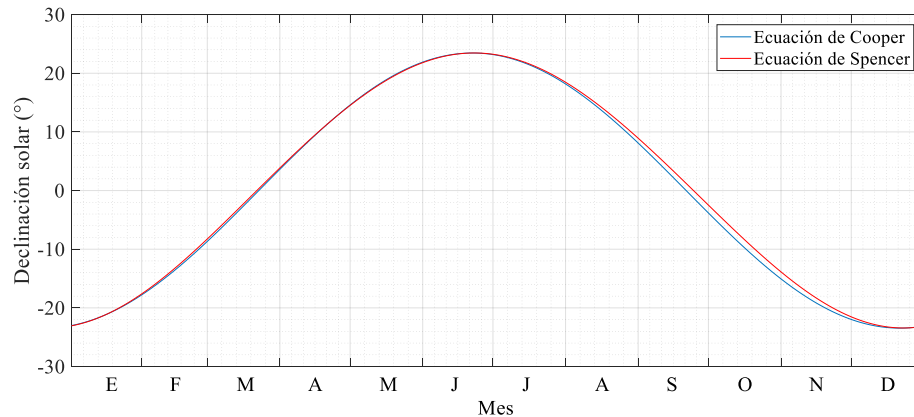


Figura A.2.6. Variación de la declinación durante el año

En la Sección A.2.3.2 se escogió la expresión propuesta por Duffie y Beckman (2013), la cual depende del parámetro B. A los efectos de la simulación de la radiación solar, se utilizó la expresión de Spencer. Esto permite ser consistente con el parámetro B, es decir, es suficiente para calcular el parámetro B una vez y luego utilizarlo para calcular  $G_{on}$  y  $\delta$ . Además, el nivel de precisión de la expresión de Spencer es suficiente.



#### Anexo 2.3.4. Tiempo solar

El tiempo solar es una medida del tiempo basada en el movimiento aparente del sol sobre el horizonte de una ubicación determinada, estableciendo como el mediodía solar el momento del día en que el sol está sobre el meridiano del observador, además, en ese punto el sol está en su posición más alta en el cielo. El tiempo solar es usado en todas las relaciones angulares del sol, y no coincide necesariamente con el tiempo del reloj local. Es necesario convertir el tiempo estándar a tiempo solar aplicando dos correcciones. Primero, hay una corrección constante para la diferencia de longitud entre el meridiano del observador (longitud) y el meridiano en el cual está basada su hora local<sup>2</sup>, considerando que el sol toma 4 minutos para atravesar 1° de longitud. La segunda corrección proviene de la ecuación del tiempo, que toma en cuenta las perturbaciones en la velocidad de

<sup>2</sup> Para obtener el meridiano estándar local, se debe multiplicar la diferencia de tiempo entre la hora reloj local con el *Greenwich Mean Time* (Tiempo Medio de Greenwich; GMT por sus siglas en inglés) por 15.

rotación de la tierra, las cuales afectan el tiempo en que el sol cruza el meridiano del observador. La siguiente expresión permite obtener el tiempo solar a partir de la hora local:

$$t_s = \text{Tiempo Estándar} + 4 (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (\text{A.2.9})$$

donde  $L_{st}$  es el meridiano estándar para la zona horaria local,  $L_{loc}$  es la longitud de la locación en cuestión. El parámetro  $E$  corresponde a la ecuación del tiempo, que entrega una corrección debido a la inclinación del eje de la tierra con relación al plano de la eclíptica (oblicuidad) y la no uniformidad de la órbita de la tierra (elipticidad). Ambos efectos producen una diferencia de tiempo entre el tiempo solar y el tiempo solar medio. Este último se considera como el sol que se mueve en el ecuador a una velocidad constante durante todo el año y consta de días exactos de 24 horas. Spencer (1971) propone la siguiente expresión para determinar  $E$  en minutos.

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \sin(2B)) \quad (\text{A.2.10})$$

Donde  $B$  está definido por la Ecuación A.2.6. La Figura A.2.7 muestra la variación de la ecuación del tiempo a través del año completo.

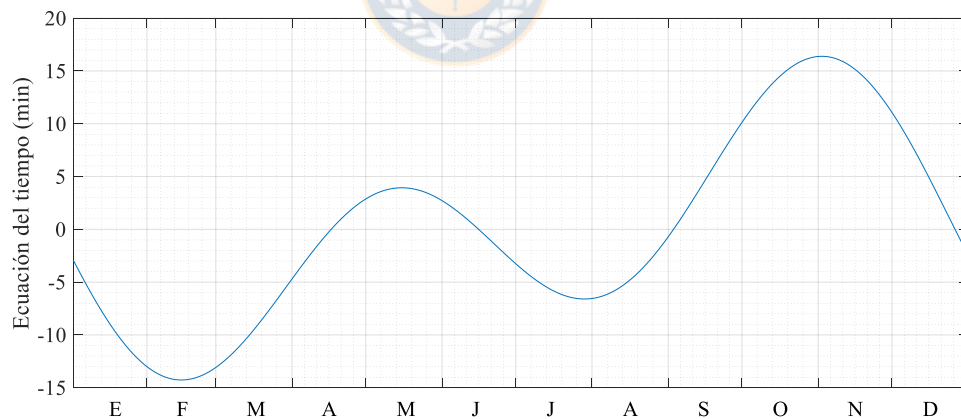


Figura A.2.7. Ecuación del tiempo  $E$ , en minutos en función del día del año

Ahora, tomando en cuenta la corrección del tiempo (corrección por longitud geográfica y ecuación de tiempo) es posible establecer las relaciones angulares que describen el movimiento del sol en el cielo. La siguiente sección describe tales relaciones angulares.

### Anexo 2.3.5. Posición del sol

Las relaciones geométricas entre un plano con cualquier orientación relativa a la tierra (incluyendo si el plano está fijo o si se está moviendo relativo a la tierra) y la radiación solar directa entrante, o en otras palabras, la posición del sol relativo a ese plano, puede ser descritas en términos de un conjunto de ángulos (Benford y Block, 1939). Estos ángulos se observan en la Figura A.2.8.

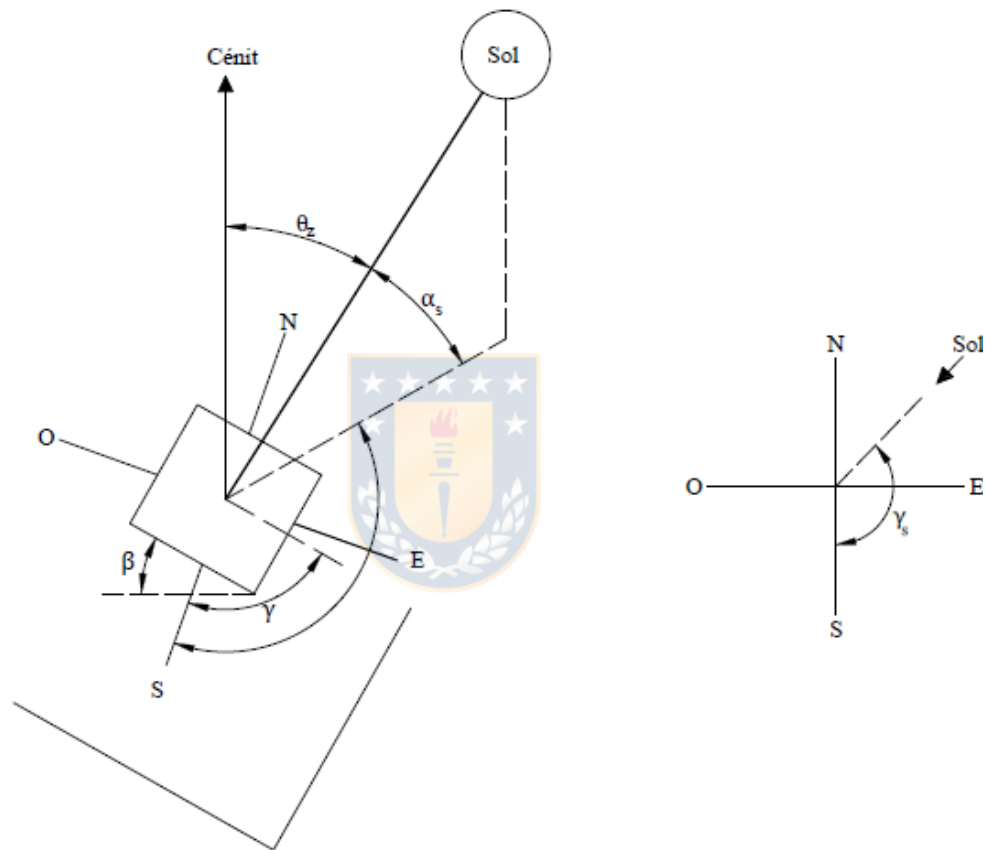


Figura A.2.8. Geometría solar. Adaptado de Duffie y Beckman (2013)

El **ángulo de la hora** ( $\omega$ ) corresponde al desplazamiento angular del sol hacia el Este u Oeste del meridiano local y es generado por la rotación de la Tierra sobre sí misma, la cual rota a 15 grados por hora. Este ángulo es negativo por la mañana y positivo por la tarde (en el mediodía solar,  $\omega = 0$ ). El ángulo horario se calcula de acuerdo con la Ecuación A.2.11.

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (\text{A.2.11})$$

La **altura solar** ( $\alpha_s$ ) es el ángulo entre la horizontal y la línea que proyecta el sol, y se determina como una función de la latitud geográfica ( $\phi$ ), de la declinación del sol ( $\delta$ ), y el ángulo de la hora ( $\omega$ ) según la expresión siguiente:

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (\text{A.2.12})$$

El **azimut solar** ( $\gamma_s$ ) corresponde al desplazamiento angular de la proyección de la radiación directa en el plano horizontal. Este desplazamiento angular es positivo en el Este ( $\gamma_s < 0$ ) y negativo en el Oeste ( $\gamma_s > 0$ ). El azimut del sol se calcula de acuerdo con la expresión de Sproul (2007).

$$\gamma_s = -\text{sign}(\omega) \left| \arccos \left( \frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega}{\cos \alpha_s} \right) \right| \quad (\text{A.2.13})$$

Se elige esta expresión para calcular  $\gamma_s$ , ya que proporciona toda la información relativa a la posición del sol, es decir, si el sol se ubica al Norte o al Sur, y al Este o al Oeste.

El **ángulo de incidencia**  $\theta$  es el ángulo formado por el centro de la posición del sol y el vector normal a la superficie receptora de radiación solar. La ecuación que relaciona el ángulo de incidencia con los otros ángulos es la siguiente:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta + \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (\text{A.2.14})$$

Cuando el ángulo  $\theta$  excede los 90 significa que el sol está por detrás de la superficie. Al usar la ecuación anterior se debe tener en cuenta también que la tierra no bloquee al sol, es decir, que el ángulo horario esté entre el amanecer y el atardecer. Para superficies horizontales, el ángulo de incidencia es igual al ángulo cenital del sol,  $\theta_z$ . Su valor varía entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  cuando el sol está sobre el horizonte. En esta situación el ángulo de inclinación  $\beta=0$ , y la Ecuación A.2.14 se transforma en la siguiente.

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta. \quad (\text{A.2.15})$$

Los amaneceres y atardeceres definen el día y la noche. El sol se pone o se levanta cuando la altura del centro del sol debajo del horizonte se vuelve cero. El ángulo del atardecer  $\omega_s$  se puede calcular

utilizando la ecuación anterior con  $\theta_z=90^\circ$  obteniéndose la Ecuación A.2.16. El ángulo horario del amanecer es el negativo del ángulo horario del atardecer.

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad \text{A.2.16)}$$

Finalmente, se puede obtener la duración de asoleamiento ( $S_0$ ) que corresponde a las horas en que el sol está por sobre el horizonte, es decir entre el amanecer y el atardecer. Descuidando los efectos de la refracción y el radio del disco solar, la duración astronómica de la luz del sol para un día determinado se puede obtener con la siguiente expresión

$$S_0 = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad \text{(A.2.17)}$$



#### Anexo 2.4. Clasificación de los piranómetros

Tabla A.2.1. Características operacionales de los piranómetros (ISO, 2018)

ISO -9060 Especificaciones de los piranómetros	Clase A	Clase B	Clase C
<b>Tiempo de respuesta:</b> tiempo para alcanzar el 95 % de respuesta.	< 15 s	< 30 s	< 60 s
<b>Compensación cero:</b> - Compensación A: respuesta a 200 W/m <sup>2</sup> de radiación térmica neta, ventilada. - Compensación B: respuesta al cambio de temperatura ambiente de 5K/h.	+ 7W/m <sup>2</sup>  ± 2W/ m <sup>2</sup>	+ 15W/m <sup>2</sup>  ±4W/m <sup>2</sup>	+ 30W/m <sup>2</sup>  ± 8W/m <sup>2</sup>
<b>Estabilidad:</b> Porcentaje de cambio en el año.	± 0.8 %	± 1.5 %	± 3 %
<b>No linealidad:</b> Porcentaje de desviación de responsividad <sup>3</sup> a 500W/m <sup>2</sup> debido a cambios en irradiancia en el rango 100-1000 W/m <sup>2</sup>	± 0.5 %	± 1 %	± 3 %
<b>Respuesta direccional (para radiación directa):</b> el rango de error causado al asumir que la capacidad de respuesta de incidencia normal es válida para todas las direcciones cuando se mide desde cualquier dirección.	± 10W/m <sup>2</sup>	± 20 W/m <sup>2</sup>	± 30 W/m <sup>2</sup>
<b>Selectividad espectral:</b> Porcentaje de desviación del producto de la absorbancia y transmitancia de la media correspondiente dentro del rango de 300 a 3000 nm.	± 3 %	± 5 %	± 10 %
<b>Respuesta a la temperatura:</b> Porcentaje de desviación debido al cambio de temperatura en el ambiente en un intervalo de 50 K (típico de -10 a +40°C).	2 %	4 %	8 %
<b>Ángulo de respuesta:</b> Porcentaje de desviación en responsividad relativo a 0° de inclinación, debido al cambio de inclinación desde 0° a 90° a 1000 W/ m <sup>2</sup> .	± 0,5 %	± 2 %	± 5 %
<b>Incertidumbre</b> (con nivel de confianza de 95 %)			
Totales horarios	3 %	8 %	20 %
Totales diarios	2 %	5 %	10 %

<sup>3</sup> Responsividad (*responsivity, en inglés*): Fotocorriente por unidad de potencia óptica incidente en un fotodetector.

## Anexo 2.5. Especificaciones nominales del piranómetro CMP10 y del SPN1

Tabla A.2.2. Especificaciones nominales del CMP10

Característica	Especificación
Estabilidad	< 0.5 % de cambios al año
Precisión de respuesta del coseno	± 0.2 % de radiación entrante sobre los 0-90° de ángulo cenital a 1000W/m <sup>2</sup>
Coeficiente de temperatura	< 1 %
Variación de sensibilidad espectral	< 3 %
No linealidad	< 0.2 %
Compensación a valores nulos	< 2 W/m <sup>2</sup> por cambios de 5°C/h a temperatura ambiente < 7 W/m <sup>2</sup> por radiación térmica a 200 W/m <sup>2</sup>

(Kipp and Zonen, 2016)

Tabla A.2.3. Especificaciones nominales del SPN1

Característica	Especificación
Precisión general: radiación global y difusa	±5 % en integrales diarias ±5 % ±10W/m <sup>2</sup> en promedios horarios ±8 % ±10W/m <sup>2</sup> en lecturas individuales
Precisión de respuesta del coseno	±2 % de radiación entrante sobre los 0-90° de ángulo cenital
Coeficiente de temperatura	±0.02 % por °C, típicamente
Variación de sensibilidad espectral	10 % típicamente
No linealidad	<1 %
Compensación a valores nulos	< 3 W/m <sup>2</sup> por cambios de 5°C/h a temperatura ambiente < 3 W/m <sup>2</sup> mediciones de noche

(Delta-T Devices Ltd, 2007)



## Anexo 2.6. Modelo de cielo claro

Se han desarrollado varios modelos para determinar la radiación recibida en la superficie terrestre para días claros, es decir, sin considerar la nubosidad del cielo (McCullough y Porter, 1971). Estos modelos requieren datos que generalmente no están disponibles y, por otro lado, son bastante complicados de usar (Campbell y Norman, 1998). Un modelo simple es el basado en Liu y Jordan (1960). En donde la radiación directa se obtiene como función de la masa óptica, la transmitancia de la atmósfera y la cantidad de radiación incidente. La siguiente expresión combina estos factores que para determinar la radiación directa normal:

$$G_{bn} = G_{on} \tau^m \cos \theta \quad (\text{A.2.18})$$

Donde  $G_{on}$  es la radiación extraterrestre normal a la radiación directa corregida por la distancia tierra-sol. El término  $\tau$  es la transmitancia atmosférica y  $m$  es número de masa óptica de aire (Ecuación A.2.1). Liu y Jordan (1960) midieron  $\tau$  para días claros y encontraron valores entre 0.75 y 0.45 en dos sitios de medición. Cuando  $\tau$  es menor a 0.4 se puede considerar que el cielo está cubierto de nubes. Gates (1980) sugiere valores de  $\tau$  entre 0.6 y 0.7 para condiciones típicas de cielos claros. Valores para días muy claros alcanzan valores cercanos a 0.78.

Para la determinar la radiación difusa en días claros, se usa la siguiente ecuación empírica adaptada de Liu y Jordan (1960):

$$G_{dh} = 0,3 * (1 - \tau^m) * G_{on} \cos \theta_z \quad (\text{A.2.19})$$

El número de masa óptica compensa parcialmente los efectos del factor  $\cos \theta_z$ , así que la radiación difusa permanece relativamente constante durante los días claros (Campbell y Norman, 1998). A medida que el polvo y la niebla incrementan, la radiación directa decrece mientras que la difusa incrementa. La siguiente figura muestra la radiación solar global medida con el SPN1 y los valores calculados con el modelo de cielo claro, para el día 6 de febrero de 2018 el cual presento un  $K_T$  de 0.74.

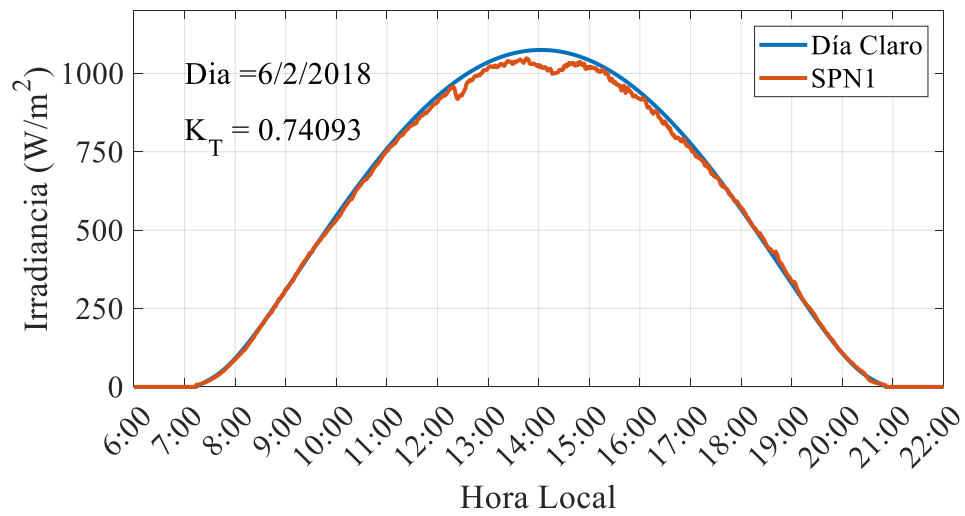


Figura A.2.9. Radiación global horizontal para una día despejado medido con el SPN1 y simulado con el modelo de cielo claro.



## Anexo 2.7. Modelos de Cielo

### Anexo 2.7.1. Modelo de cielo isotrópico

Los primeros modelos para la predicción de la irradiancia incidente en un punto sobre una superficie asumen que el cielo es isotrópico, es decir, que tienen la misma radiancia en todas las direcciones, tal como lo propone Liu y Jordan (1963). En algunos casos, es sencillo predecir la irradiancia incidente en un punto en una superficie receptora con inclinación  $\beta$  debido a la radiación difusa del cielo  $I_{dT}$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ):

$$G_{d,T} = G_{dh} \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad (\text{A.2.20})$$

El modelo isotrópico pondera la radiación solar difusa total recibida en una superficie horizontal ( $I_{dh}$ ) por un factor de vista (Anexo 2.2). El factor de vista es una cantidad geométrica, pero cuya definición se basa en la teoría energética que modela la transferencia de calor entre dos superficies. Expresa el flujo emitido por una superficie que es alcanzada otra superficie. En este caso, la superficie que emite energía es la bóveda celeste, por lo tanto, se conoce como factor de vista del cielo (FVC). Para una superficie con inclinación  $\beta$ , el FVC se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{FVC} = \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (\text{A.2.21})$$

La Figura A.2.10 muestra la relación entre  $G_{d\beta}$  y  $G_{dh}$  en función del ángulo de inclinación  $\beta$ . Una superficie horizontal ( $\beta = 0^\circ$ ,  $\text{FVC} = 1$ ) recibe 100 % de la energía emitida por el cielo, mientras que para una superficie vertical ( $\beta = 90^\circ$ ,  $\text{FVC} = 0.5$ ) recibe un 50 %.

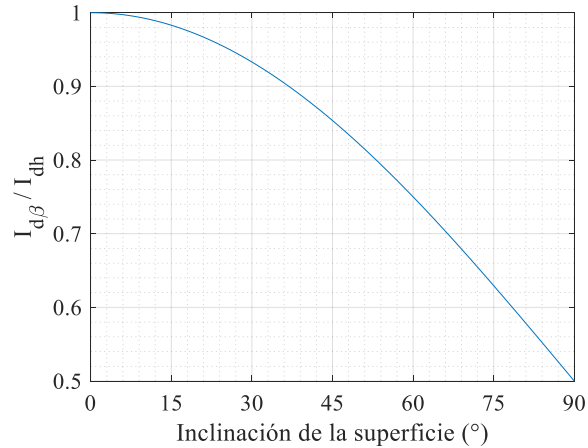


Figura A.2.10. Relación entre  $G_{dT}$  e  $G_{dh}$  y su variación con respecto al ángulo de inclinación

Por construcción, la radiación difusa estimada con el modelo isotrópico es independiente del acimut (u orientación) de la superficie. Por ejemplo, una superficie vertical orientada al Norte ( $\beta = 90^\circ$ ) recibe la misma cantidad de energía difusa que una orientada al Sur, por lo tanto, la radiación difusa depende solo del ángulo  $\beta$ . Para superar esta debilidad del modelo isotrópico, se han desarrollado otros modelos de cielo, que toman en cuenta la distribución anisotrópica de la radiación en el cielo.

### Anexo 2.7.2. Modelo de Hay-Davies

En el modelo de Hay y Davies (1980), la radiación difusa del cielo es compuesta por una parte isotrópica y una componente circunsolar, el brillo del horizonte no se toma en cuenta. El índice de anisotropía “A” definido en la Ecuación A.2.22, representa la transmitancia a través de atmósfera para la radiación directa.

$$A = \frac{G_{bn}}{G_{on}} \quad (\text{A.2.22})$$

El índice de anisotropía es utilizado para cuantificar la porción de la radiación solar tratada como circunsolar con la porción remanente de la radiación difusa asumida como isotrópica. La componente circunsolar es asumida que proviene desde la posición del sol. La radiación difusa entregada por el modelo de Hay-Davies se obtiene con la siguiente expresión:

$$G_{d,\beta} = G_{dh}(1 - A) \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + G_{dh}AR_b \quad (\text{A.2.23})$$

Donde  $R_b$  representa un factor geométrico que representa la razón entre la radiación directa en una superficie inclinada con el respecto a la radiación horizontal. Se obtiene utilizando la Ecuación A.2.24.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{A.2.24})$$

### Anexo 2.7.3. Modelo de Klucher

Klucher (1979) encontró que el modelo de cielo isotrópico da buenos resultados para cielos nublados, pero subestima la radiación para condiciones de cielo claro y parcialmente nublado, es decir, cuando es incrementada la intensidad de la radiancia cerca del horizonte y de la región circunsolar del cielo. El modelo de Klucher entrega la radiación difusa sobre una superficie inclinada utilizando la siguiente expresión:

$$G_{d,T} = G_{dh} \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \left[ F' \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] * [1 + F' \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z] \quad (\text{A.2.25})$$

Donde  $F'$  es el índice de claridad dado por la siguiente ecuación:

$$F' = 1 - \left( \frac{G_{dh}}{G_{gh}} \right)^2 \quad (\text{A.2.26})$$

La primera de las modificaciones a los factores en la componente difusa del cielo toma en cuenta el brillo del horizonte, el segundo toma en cuenta la radiación circunsolar. Bajo condiciones de cielo nublados, el índice de claridad  $F'$  se vuelve cero y el modelo se reduce al modelo isotrópico.

#### Anexo 2.7.4. Modelo de Reindl

El modelo de Reindl *et al.* (1990) considera la componente isotrópica, circunsolar y el brillo del horizonte, y emplea el índice de anisotropía “A” descrito en la Ecuación A.2.27. La radiación total sobre una superficie puede ser calculada utilizando la siguiente expresión.

$$G_{d,T} = G_{dh}(1 - A) \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \left[ 1 + \sqrt{\frac{G_{dh}}{G_{gh}}} \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + G_{dh}AR_b \quad (A.2.27)$$

El modelo de Reindl toma el modelo de Hay-Davies, pero le agrega un término adicional que representa el brillo del horizonte. Debido a lo anterior entrega valores ligeramente mayores que el modelo de Hay-Davies.

#### Anexo 2.7.5. Modelo *Perez Point Source* (PPS)

Uno de los modelos de cielo que ha ganado aceptación extendida es el modelo de Perez *et al.* (1990). Este modelo estadístico, el cual es basado en un largo número de exploraciones de la distribución de radiancia del cielo en diferentes locaciones, ha mostrado desempeños bastantes buenos en test de validación empírica independiente (Mardaljevic, 1995) y ha sido incluido en numerosos programas de simulación de edificios y sistemas de conversión de energía solar.

Los tres términos en la siguiente ecuación corresponden al componente isotrópico, la componente circunsolar y la componente del brillo del horizonte respectivamente:

$$G_{d,T} = G_{dh} \left[ (1 - F_1) \frac{(1 + \cos\beta)}{2} + \frac{F_1 a_0}{a_1} + F_2 \sin\beta \right] \quad (A.2.28)$$

En la Ecuación A.2.29 y Ecuación A.2.30 los coeficientes  $a_0$  y  $a_1$  dan cuenta del ángulo de incidencia de la componente circunsolar:

$$a_0 = \max(0, \cos\theta) \quad y \quad (A.2.29)$$

$$a_1 = \max(\sin 5\pi/180, \sin\theta_z), \quad (A.2.30)$$

la cual es efectivamente tratada en una fuente puntual ubicada por encima de una altura limitada de  $5\pi/180$ .  $F_1$  y  $F_2$  son las funciones del brillo circunsolar y del horizonte, respectivamente, y se obtienen de la Ecuación A.2.31 y A.3.2.

$$F_1 = \max \left[ 0, \left( f_{11} + f_{12}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{13} \right) \right] \quad y \quad (A.2.31)$$

$$F_2 = \left( f_{21} + f_{22}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{23} \right). \quad (A.2.32)$$

Estas funciones dependen del ángulo cenital  $\theta_z$  (que es acotado a un valor mínimo de  $5\pi/180$  radianes), el brillo del cielo ( $\Delta$ ) y un set de coeficientes estadísticos  $f$  para 8 compartimentos de claridad del cielo ( $\varepsilon$ ). El brillo del cielo ( $\Delta$ ) es el producto de la masa de aire, en la cual pasa la radiación solar a través de ella (definida por la Ecuación A.2.1) y el cociente entre la irradiancia solar difusa en un plano horizontal ( $G_{dh}$ ) y la irradiancia extraterrestre, también en un plano horizontal ( $G_{eh}$ ), tal como muestra en la Ecuación A.2.33.

$$\Delta = m \frac{G_{dh}}{G_{eh}} \quad (A.2.33)$$

Esta irradiancia extraterrestre horizontal es esencialmente la constante solar  $G_{sc}$  ( $1367 \text{ W/m}^2$ ) ajustada tomando en cuenta la excentricidad de la órbita terrestre alrededor del sol y se obtiene de la Ecuación A.2.4.

Finalmente, el índice de claridad del cielo ( $\varepsilon$ ), permite seleccionar el correspondiente coeficiente estadístico para las funciones de brillo circunsolar y del horizonte de las Ecuaciones A.2.31 y A.2.32, y está dado por la siguiente expresión, en donde  $\theta_z$  está en grados:

$$\varepsilon = \frac{\frac{G_{dh} + G_{bh}}{G_{dh}} + 5.535 \times 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5.535 \times 10^{-6} \theta_z^3} \quad (A.2.34)$$

El parámetro  $\epsilon$  proporciona una caracterización del espesor de la nube, y clasifica las condiciones de cielo en ocho categorías: dos condiciones extremas de cobertura de nubes (cielo sin nubes y completamente nublado) y 6 condiciones intermedias (Tabla A.2.4).

Tabla A.2.4. Clasificación del tipo de cielo según la claridad del cielo ( $\epsilon$ )

Claridad del cielo	Tipo de cielo
1.000 - 1.065	Cielo cubierto con horizonte oscuro
1.065 - 1.230	
1.230 - 1.500 1.500 - 1.950	Parcialmente cubierto
1.950 - 2.800	
2.800 - 4.500	Nublado
4.500 - 6.200	
6.200 - 12.000	Cielo despejado y muy claro

Con estas ocho condiciones de cielo, se pueden determinar los parámetros  $f_{ij}$  utilizado para el cálculo de coeficientes de anisotropía del modelo PPS, de acuerdo con la Tabla A.2.5.

Tabla A.2.5. Coeficientes de brillo de Perez et al. (1990) para cielo anisotrópico

Rango de $\epsilon$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$
<b>1.000 - 1.065</b>	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
<b>1.065 - 1.230</b>	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
<b>1.230 - 1.500</b>	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
<b>1.500 - 1.950</b>	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	0.014
<b>1.950 - 2.800</b>	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
<b>2.800 - 4.500</b>	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
<b>4.500 - 6.200</b>	1.060	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
<b>6.200 - <math>\infty</math></b>	0.678	-0.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

Perez et al. (1990)



La Figura A.2.11 muestra la combinación de los pares  $(\epsilon, \Delta)$  obtenidos con los datos horarios de radiación solar horizontal medidos durante 60 días en Chillán. Se observan las zonas donde los pares son improbables, por ejemplo, para un  $\Delta$  pequeño y un  $\epsilon$  intermedio; y las zonas donde es físicamente imposible la presencia de datos, tales como las regiones con alto  $\Delta$  y alto  $\epsilon$ . Además, muestra que un cielo sin nubes es menos luminoso que un cielo parcialmente cubierto, y por otro lado, que existe una dependencia entre  $G_{dh}$  y  $\epsilon$  para cielos claros, diferente a la naturaleza independiente para cielos nublados.

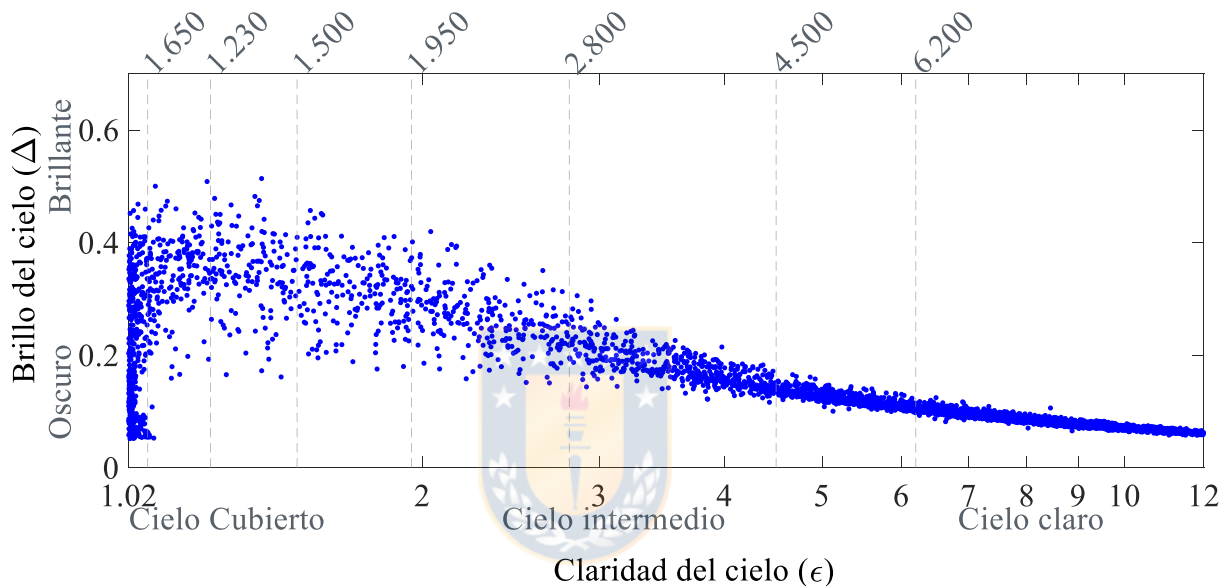


Figura A.2.11. Distribución de datos en Chillán durante un período de 180 días

#### Anexo 2.7.6. Modelo *Perez All-Weather* (PAW)

Una alternativa a los modelos de dos y tres componentes para la predicción de la irradiancia incidente sobre una superficie inclinada es un modelo de distribución de radiancia en toda la bóveda celeste.

Existen numerosos modelos que permiten hacer esto, muchos de los cuales han sido desarrollados para apoyar predicciones de luz natural; el primero de ellos es el modelo de distribución de iluminación de cielo nublado de Moon y Spencer (Moon y Spencer, 1942). Otros modelos incluyen las primeras formulaciones del modelo de cielo de la *Commission Internationale de l'Éclairage*

(Comisión Internacional de Iluminación; CIE por sus iniciales en francés) (Kittler, 1967) pasando por modelos de cielo más recientes (CIE, 1973; CIE, 1996), hasta las definiciones más generales de cielo (Perez *et al.*, 1993; CIE, 2002) que cubren los rangos de tipos de cielo desde nublado y parcialmente cubierto a cielos claros. Una vez más el modelo de Perez *et al.* (1993), que entrega bases confiables para la selección de cada uno de los ocho tipos de cielos posibles, ha ganado una aceptación bastante generalizada.

Usando el modelo de distribución de radiancia, primero se calcula una luminancia relativa ( $\text{lm}/\text{m}^2\text{sr}$ ) en un punto dado del cielo, es decir, la razón entre la luminancia en este punto relativa a la luminancia en un punto de referencia arbitrario, que depende del ángulo cenital al elemento de cielo considerado ( $\theta_z$ ) y la distancia angular desde el punto hasta el sol ( $\xi$ ). En este modelo particular, la luminancia relativa toma la forma de la Ecuación A.2.35.

$$\lambda = \left(1 + ae^{b/\theta_z}\right) (1 + ce^{d\xi} + e\cos^2\xi), \quad (\text{A.2.4})$$

Donde la distancia angular ( $\xi$ ) está dado por la siguiente expresión:

$$\cos\xi = \cos\gamma \cos\gamma' \cos|\alpha' - \alpha| + \sin\gamma \sin\gamma', \quad (\text{A.2.36})$$

donde los ángulos denotados por la prima se refieren al punto en el cielo y los ángulos sin prima a la posición del sol. Funciones  $a$  y  $b$  representan la magnitud y gradiente del brillo-oscuridad del horizonte, mientras que  $c$  y  $d$  representan la magnitud y el ancho del cono angular de la región circumsolar. Finalmente,  $e$  representa la intensidad relativa de la dispersión recibida por la superficie terrestre. En común con el modelo de superficie inclinada, estas funciones  $a, b, c, d, e = \varphi$  dependen del ángulo cenital ( $\theta_z$ ), la claridad del cielo ( $\varepsilon$ ) y el brillo del cielo ( $\Delta$ ), de tal manera que  $\varphi$  queda definido según la Ecuación A.2.37.

$$\varphi = \varphi_1\varepsilon + \varphi_2\varepsilon\theta_z + \Delta(\varphi_3\varepsilon + \varphi_4\theta_z) \quad (\text{A.2.37})$$

Para el primer compartimento ( $1,000 < \varepsilon < 1,065$ ) se calcula  $c$  y  $d$  directamente como se muestra en las Ecuaciones A.2.38 y A.2.39 respectivamente:

$$c = e^{(\Delta(c_1+c_2\theta_z))^{c_3}} - c_4 \quad y \quad (A.2.38)$$

$$d = -e^{[\Delta(d_1+d_2\theta_z)]} + d_3 + \Delta d_4 \quad (A.2.39)$$

La claridad del cielo ( $\varepsilon$ ) es definida por la Ecuación A.2.34 y los correspondientes valores de los coeficientes  $\varphi_1, \varphi_2 \dots \varphi_4$  están presentados en la Ecuación A.2.37.

Tabla A.2.6. Coeficientes estadísticos de Perez et al. (1993) para cielo anisotrópico

Parámetros	Rango de $\varepsilon$							
	1.000 - 1.065	1.065 - 1.230	1.230 - 1.500	1.500 - 1.950	1.950 - 2.800	2.800 - 4.500	4.500 - 6.200	6.200 -
<b>a1</b>	13.525	-12.219	-11.000	-0.5484	-0.6000	-10.156	-1.000	-10.500
<b>a2</b>	-0.2576	-0.7730	-0.2515	-0.6654	-0.3566	-0.3670	0.0211	0.0289
<b>a3</b>	-0.2690	14.148	0.8952	-0.2672	-25.000	10.078	0.5025	0.4260
<b>a4</b>	-14.366	11.016	0.0156	0.7117	23.250	14.051	-0.5119	0.3590
<b>b1</b>	-0.7670	-0.2054	0.2782	0.7234	0.2937	0.2875	-0.3000	-0.3250
<b>b2</b>	0.0007	0.0367	-0.1812	-0.6219	0.0496	-0.5328	0.1922	0.1156
<b>b3</b>	12.734	-39.128	-45.000	-56.812	-56.812	-38.500	0.7023	0.7781
<b>b4</b>	-0.1233	0.9156	11.766	26.297	18.415	33.750	-16.317	0.0025
<b>c1</b>	28.000	69.750	247.219	333.389	210.000	140.00	190.00	310.625
<b>c2</b>	0.6004	0.1774	-130.812	-183.000	-47.656	-0.9999	-50.000	-145.000
<b>c3</b>	12.375	64.477	-377.000	-622.500	-215.906	-71.406	12.438	-461.148
<b>c4</b>	10.000	-0.1239	348.438	520.781	72.492	75.469	-19.094	553.750
<b>d1</b>	18.734	-15.798	-5.000	-35.000	-35.000	-34.000	-40.000	-72.312
<b>d2</b>	0.6297	-0.5081	15.218	0.0016	-0.1554	-0.1078	0.0250	0.4050
<b>d3</b>	0.9738	-17.812	39.229	11.477	14.062	-10.750	0.3844	133.500
<b>d4</b>	0.2809	0.1080	-26.204	0.1062	0.3988	15.702	0.2656	0.6234
<b>e1</b>	0.0356	0.2624	-0.0156	0.4659	0.0032	-0.0672	10.468	15.000
<b>e2</b>	-0.1246	0.0672	0.1597	-0.3296	0.0766	0.4016	-0.3788	-0.6426
<b>e3</b>	-0.5718	-0.2190	0.4199	-0.0876	-0.0656	0.3017	-24.517	18.564
<b>e4</b>	0.9938	-0.4285	-0.5562	-0.0329	-0.1294	-0.4844	14.656	0.5636

Perez et al. (1993)

Para obtener la correspondiente luminancia absoluta  $L$  (o la radiancia), es necesario aplicar alguna forma de normalización, usando ya sea una predicción de la luminancia del cénit o iluminancia difusa horizontal. Por conveniencia se normaliza usando irradiancia difusa horizontal, en este caso se obtiene la radiancia absoluta del elemento de cielo directamente con la Ecuación A.2.40.

$$R = \frac{G_{dh}\lambda(z, \xi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \lambda(z, \xi) d\gamma d\alpha} \quad (\text{A.2.40})$$

El denominador de la expresión anterior es esencialmente equivalente a la iluminancia difusa horizontal ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ), de manera que el cociente de la radiación difusa horizontal en el numerador y esta iluminancia producen un factor de normalización  $\chi$ , que corresponde al recíproco de una eficacia lumínica absoluta ( $\text{W}/\text{lm}$ ), expresada en la siguiente ecuación:

$$R = \lambda(z, \xi)\chi \quad (\text{A.2.41})$$

Por razones prácticas, es útil discretizar la bóveda celeste en un set de parches de radiancia constante. La estrategia más simple de esta discretización del cielo es usar un mosaico de áreas iguales en una cuadrícula uniforme en el sistema de coordenadas esféricas del tipo latitud-longitud (Beckers y Beckers, 2012; Gringorten y Yopez, 1992). Este método divide el hemisferio en paralelos de latitud y meridianos de acimuts. Este enfoque tiene la ventaja de calcular un único ángulo sólido válido para todos los parches del hemisferio celeste. La Figura A.2.12 muestra la subdivisión del hemisferio celeste en 144 parches de igual ángulo sólido.

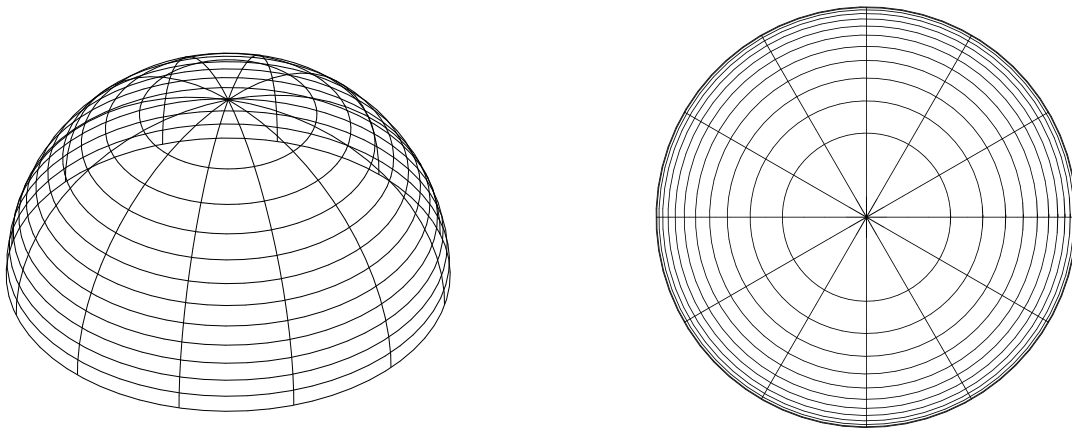


Figura A.2.12. Subdivisión del hemisferio celeste en 144 parches

Los mosaicos de ángulos iguales que pueden modificarse de acuerdo con la precisión computacional buscada o la fase de cálculo del proyecto. Otros esquemas de discretización utilizan mallados de parches triangulares y parches con espacio angular constante. Para determinar el mallado adecuado para los cálculos, se analizó la variación de la irradiación durante los 45 días de medición. La Figura A.2.13 muestra cómo cambia la irradiación de acuerdo con la fineza del mallado del hemisferio celeste.

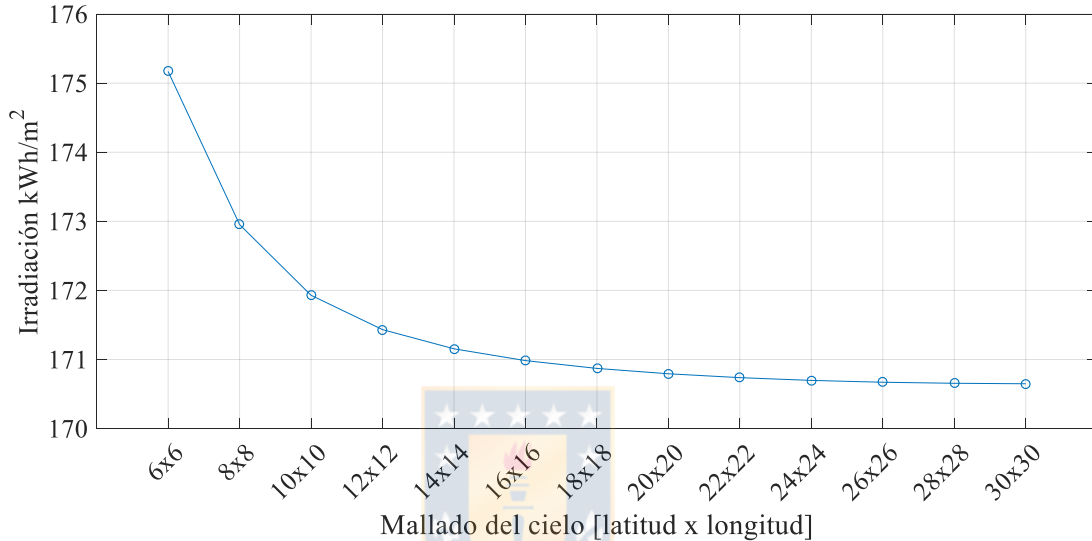


Figura A.2.13. Variación de la irradiación calculada durante 45 días en Chillán de acuerdo al mallado de cielo

Como se observa en la figura anterior, a partir del mallado de 18x18 parches, una subdivisión mayor no produce mejoras a  $0.0776 \text{ kWh/m}^2$  (0.5 %), por lo para todos los cálculos realizados se utilizó un mallado de cielo de 18x18 parches.

Una vez determinado el mallado de cielo, se determina el ángulo sólido de cada parche ( $\Phi$ ), lo cual será determinado por el rango acimutal del  $i$ -ésimo parche y el correspondiente a la máxima y mínima altitud del parche, por lo que:

$$\Phi_i = \Delta\alpha_i (\sin\gamma_{i,\max} - \sin\gamma_{i,\min}) \quad (\text{A.2.42})$$

Ahora, dada la altura de cada uno de los parches se puede calcular una normalización aproximada desde la sumatoria

$$\chi = \frac{G_{dh}}{\sum_{i=1}^p (\lambda(z, \xi) \Phi \bar{\gamma})_i} \quad (\text{A.2.43})$$

El producto de la expresión anterior y la luminancia relativa calculada en el centroide del i-ésimo parche entrega una aproximación de la radiancia promedio del i-ésimo parche

$$R_i = \lambda(z, \xi)_i \chi. \quad (\text{A.2.44})$$

Finalmente, para determinar la radiación difusa incidente sobre la una superficie inclinada, se suman las contribuciones de todos los parches de cielo ponderado por su ángulo sólido, a través de la expresión:

$$G_{d,T} = \sum_{i=1}^p R_i \phi_i \cos \xi \quad (\text{A.2.45})$$

Finalmente, se calcula el ángulo de incidencia entre la normal a los parches de cielo y la normal de la superficie receptora  $\xi$  a través de la Ecuación A.2.46.

$$\cos \xi_i = \cos \bar{\gamma}_i \cos \bar{\alpha}_i \sin \beta + \sin \bar{\gamma}_i \cos \beta, \quad (\text{A.2.46})$$

donde  $\bar{\gamma}_i$  es la altitud al centroide del parche y  $\bar{\alpha}_i$  es el ángulo acimutal del centroide del parche a la normal de la superficie receptora. Además,  $\bar{\gamma}$  y  $\bar{\alpha}$  están relacionados a la proporción visible de la bóveda celeste.

### Anexo 2.8. Factor de vista

Los intercambios radiativos entre dos superficies se basan en una magnitud que describe la influencia de sus posiciones y orientaciones relativas. Este es el factor de vista, también llamado factor de configuración o factor de forma. Esta es una cantidad geométrica, pero su definición se basa en la teoría energética que modela la transferencia de calor por radiación difusa entre dos superficies, teniendo en cuenta sus posiciones y orientaciones relativas. Expresa el flujo emitido por una superficie, en este caso el suelo que es considerado un reflector difuso, que alcanza otra superficie. El factor de vista entre dos elementos superficies elementales se define de la siguiente manera (Sillion y Puech, 1994):

$$dF_{dA_i \rightarrow dA_j} \equiv \frac{\text{Energía difusa que sale de } dA_i \text{ interceptada por } dA_j}{\text{Energía difusa total que sale de } dA_i} \quad (\text{A.2.47})$$

En el caso de un intercambio radiativo difuso entre dos elementos superficiales infinitesimales, la Ecuación A.2.47 escrita en forma diferencial se convierte en la siguiente expresión:

$$dF_{dA_i \rightarrow dA_j} = \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_j \quad (\text{A.2.48})$$

La ecuación anterior es una integral múltiple. En la Figura A.2.14 se observa la definición de los ángulos  $\theta_i$  y  $\theta_j$ , así como la distancia  $r$  entre los elementos superficiales infinitesimales. Los vectores  $\mathbf{n}_i$  y  $\mathbf{n}_j$  son normales para cada uno de los elementos de la superficie.

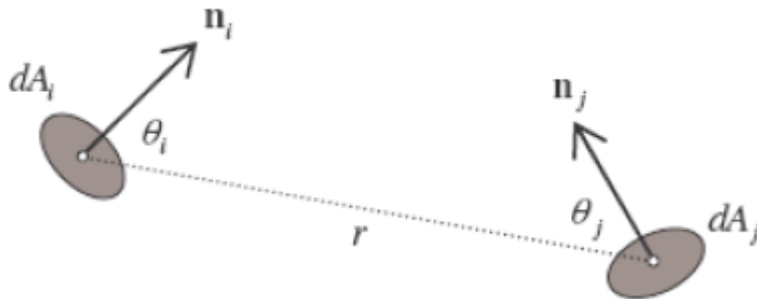


Figura A.2.14. Definición de las variables del factor de vista para dos elementos infinitesimales de superficie

A partir de las definiciones anteriores se pueden obtener expresiones para distintos tipos de configuraciones:

- Intercambio entre una superficie de área  $A_j$  y un elemento infinitesimal de área  $dA_i$  separados por una distancia  $R$  (Figura A.2.15)

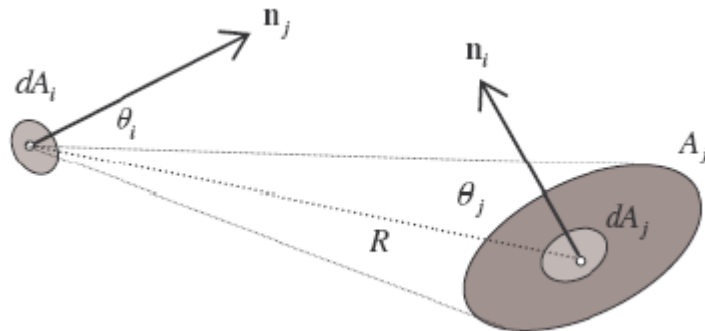


Figura A.2.15. Definición de las variables del factor de vista entre un elemento infinitesimal de superficie y una superficie delimitada

La Ecuación A.2.49 muestra la expresión matemática para esta situación.

$$F_{dA_i \rightarrow A_j} = \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_j \quad (\text{A.2.49})$$

- Intercambio entre una superficie de área  $A_j$  y una superficie de área  $A_i$  separados por una distancia  $R$  (Figura A.2.16).

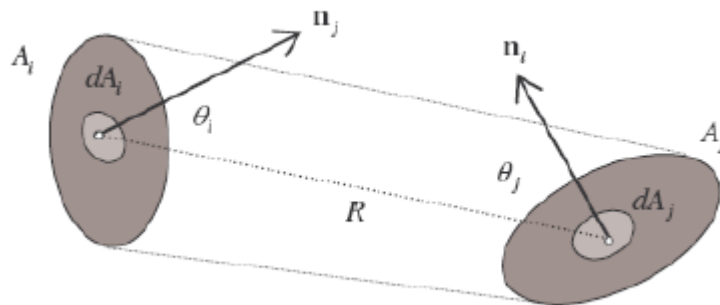


Figura A.2.16. Definición de variables de factor de vista para dos superficies delimitadas

La Ecuación A.2.50 muestra la expresión matemática para esta situación.

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (\text{A.2.50})$$



Cuando la geometría es simple, la Ecuación A.2.49 y la Ecuación A.2.50 pueden calcularse analíticamente. En la mayoría de los casos, no es posible realizar un cálculo analítico, por lo que se requiere una aproximación numérica.

### Anexo 2.8.1. Factor de vista del suelo

El factor de vista del suelo toma en cuenta la radiación que aporta el suelo (considerado como un reflector difuso) a una superficie inclinada, por ejemplo, una ventana, fachadas de edificios, colectores solares, etc. Para un plano inclinado con un ángulo  $\beta$ , y largo infinito, la Ecuación A.2.50 se puede resolver de manera analítica utilizando la siguiente ecuación:

$$FVS = \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (A.2.51)$$

En la Figura A.2.17 muestra la variación del factor de vista del suelo de acuerdo a la inclinación de la superficie receptora.

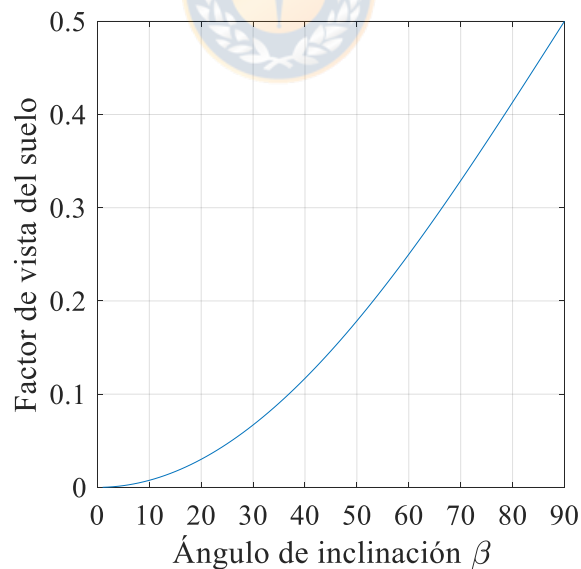


Figura A.2.17. Variación del factor de vista del suelo con respecto al ángulo de inclinación de la superficie receptora

De la figura anterior puede observarse que el factor de vista es más grande para superficies verticales, lo que implica que la radiación reflejada también es mayor en comparación a una

superficie horizontal (De hecho, es mayor para superficies que ven el suelo con una vista sin obstrucciones en sus alrededores, pero esto se encuentra raramente en contexto urbano).

Para conocer el efecto que tiene el entorno inmediato, se calculó el factor de vista de suelo de manera numérica utilizando un mallado del suelo. Para ello se dividió una superficie plana de 50 x 50m en 2500 parches cuadrados de 0.5 x 0.5m, los cuales representan el suelo que refleja la radiación global que incide sobre él de manera difusa. La superficie receptora corresponde a una malla cuadrada de 0.1x0.1m con un ángulo de inclinación de 90°, ubicada a 1m sobre el nivel del suelo, esta superficie representa un piranómetro ocupado en el contexto de esta investigación (Figura A.2.18).

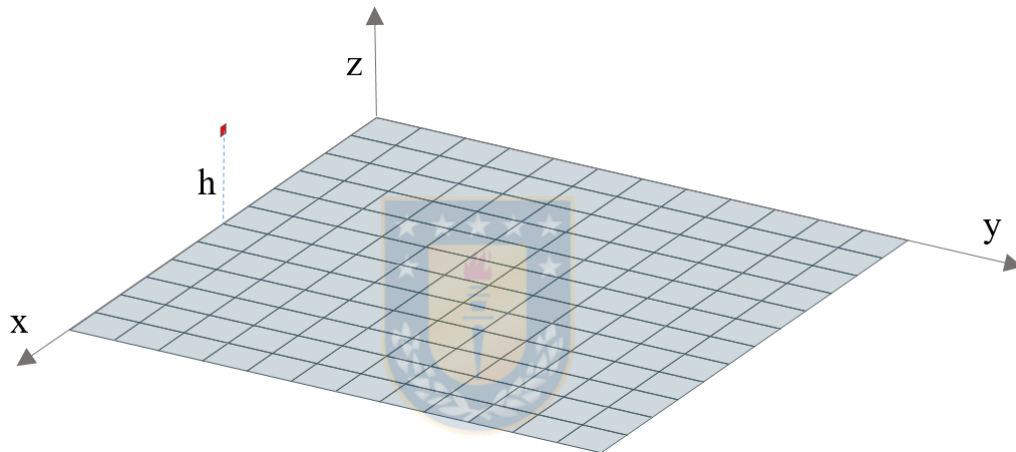


Figura A.2.18. Mallado del suelo (gris) en celdas de 0.5 x 0.5 m y malla de superficie vertical (rojo) de 0.1 x 0.1m ubicada a 1 m de altura ( $h=1$  m)

El factor de vista de la superficie vertical sobre el suelo circundante se puede observar en la Figura A.2.19 y la Figura A.2.20. En la Figura A.2.19, se observa el FVS de cada uno de los parches de suelo. Los parches más cercanos a la superficie receptora presentan un valor más alto. En la Figura A.2.20, se observa el FVS acumulado y muestra las regiones en que alcanza un 60, 70, 80, 90 y 100 % del valor total. El FVS del área completa de 50 x 50m es igual a 0.48, muy cercano al valor teórico de 0.5 que considera una superficie infinita de suelo.

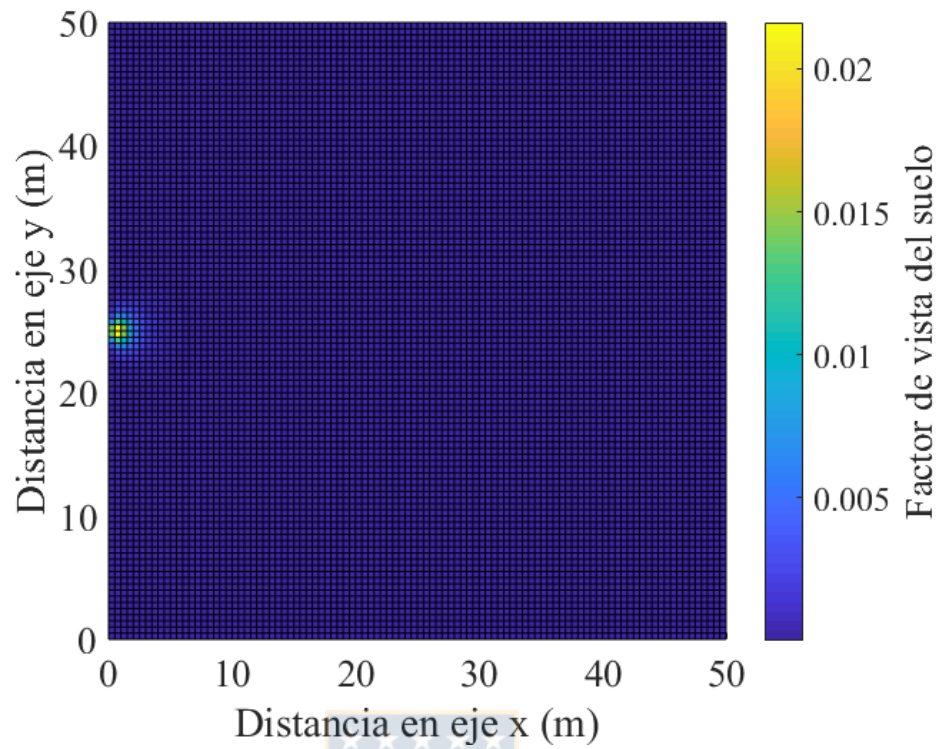


Figura A.2.19. Factor de vista del suelo de cada parche de suelo

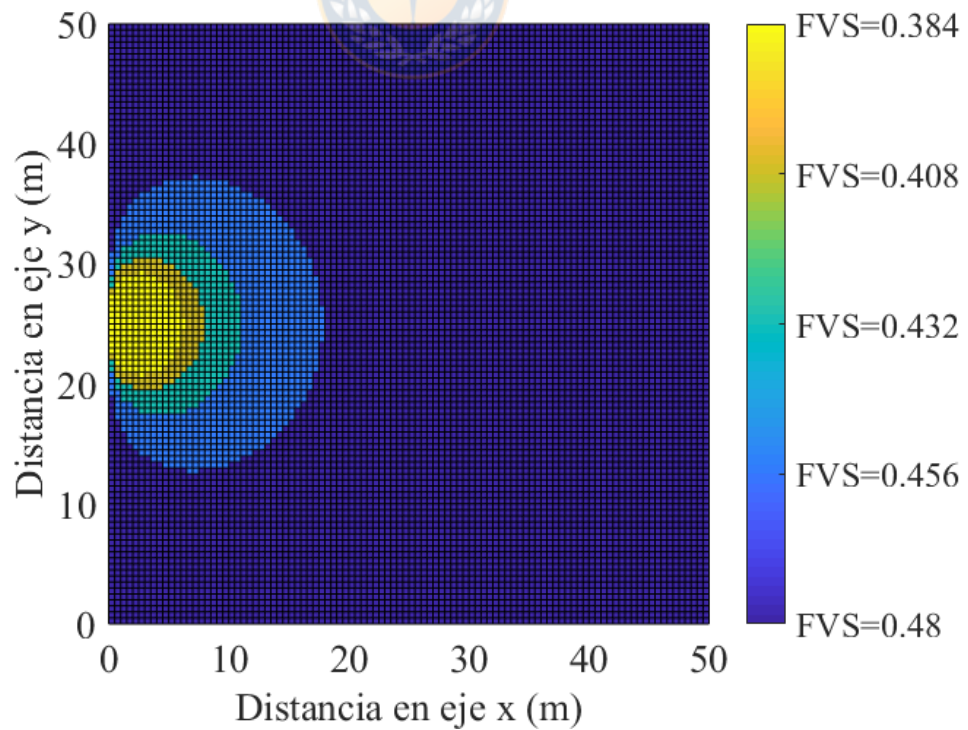


Figura A.2.20. Factor de vista del suelo acumulado de las regiones cercanas a la superficie receptora

La región situada en los 6 m más cercanos, perpendicularmente a la superficie receptora, alcanza un valor de  $FVS=0.384$  (60 % del valor total), mientras que a los 10m se alcanza el 90 % del FVS total ( $FVS=0.432$ ). Sin embargo, el factor de vista del suelo también depende de la altura  $h$  en la que se encuentra ubicada la superficie receptora. La Figura A.2.21 muestra la distancia perpendicular a la superficie receptora en que se logra una región con un FVS de 0.432 (90 % del valor total) de acuerdo a la altura en que está ubicada la superficie receptora.

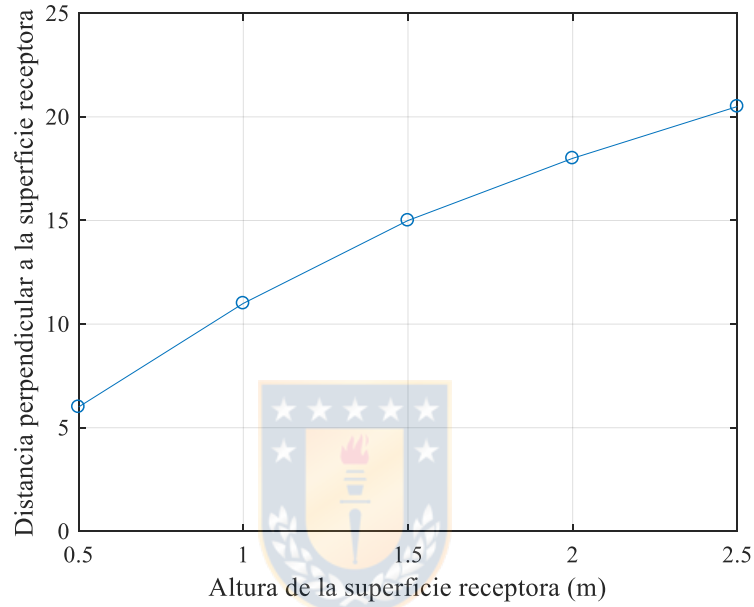


Figura A.2.21. Distancia perpendicular a la superficie receptora en que se logra un FVS de 0.432 (90 % del valor teórico igual 0.5) con respecto a la altura en que se ubica

## Anexo 2.9. Albedo

El albedo depende de la naturaleza del suelo que refleja la radiación. Los valores típicos de albedo para diferentes superficies pueden ser encontrados en numerosas fuentes literarias. En Europa, por ejemplo, se pueden encontrar valores tabulados en el Atlas Europeo de Radiación Solar (Aguilar and Page, 1999; Scharmer and Greif, 2000). Thevenard y Haddad (2006), resumieron valores promedio diarios de albedo para distintas superficies, según lo encontrado en la literatura (Tabla A.2.7). Una práctica de ingeniería típica es tomar un valor promedio del suelo igual a 0,2 (Liu y Jordan, 1963), este valor es ocupado, además, en la calificación energética en Chile para el cálculo de la componente reflejada. Sin embargo, esto genera errores en el cálculo de la radiación total incidente en superficies verticales, por lo tanto, es necesario usar una reflectancia medida *in-situ* para obtener resultados satisfactorios (Ineichen *et al.*, 1987).

Tabla A.2.7. Estimaciones de albedo promedio encontrado en la literatura (Thevenard y Haddad (2006))

Cobertura de suelo	Albedo
Agua (a variados ángulo de incidencia)	0.07
Bosque de coníferas	0.07
Techo bituminoso y de grava	0.13
Suelo desnudo y seco	0.20
Concreto degradado	0.22
Pasto verde	0.26
Praderas	0.20 – 0.30
Desierto de área	0.40
Hormigón nuevo	0.55 <sup>4</sup>
Superficies claras de edificios	0.60
Nieve fresca	0.80

Conocer el albedo *in situ* en detalle es una tarea compleja debido a la heterogeneidad inherente del suelo, se han desarrollado modelos anisotrópicos que consideran la reflexión especular e isotrópica

<sup>4</sup> Markvart y Castañer, 2003. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications

del suelo (Gueymard, 1986), sin embargo, su beneficio es limitado ya que no entrega grandes diferencias que usar un modelo isotrópico (Ineichen *et al.*, 1987), y en simulaciones presentan un gasto computacional que no es justificado (Thevenard y Haddad, 2006).

A través de las mediciones realizadas con los piranómetros CMP10 ubicados en posición horizontal midiendo hacia arriba y hacia abajo, respectivamente, se pudo calcular el albedo del sitio de medición. La Figura A.2.22 muestra el albedo medido en intervalo de 5 minutos durante un período de 11 días (desde el 10 de diciembre al 21 de diciembre del 2018), además se separaron los valores de acuerdo con el índice de claridad de cielo. En rojo se presentan los valores para cielos nublados ( $\varepsilon < 2.8$ ) y en el azul se muestran los valores para días claros y parcialmente cubiertos  $\varepsilon > 2.8$ .

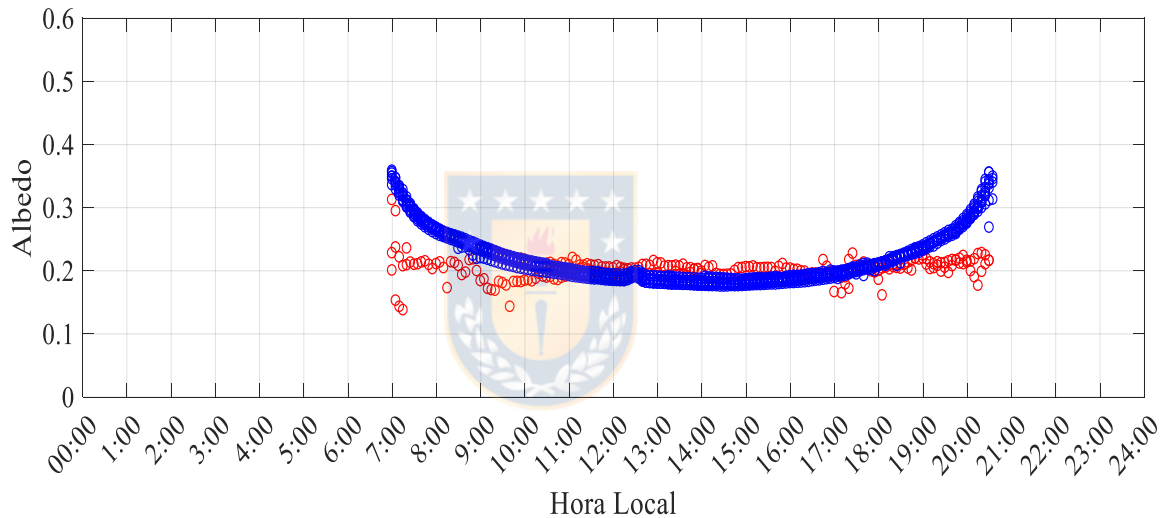


Figura A.2.22. Albedo del sitio de medición medido durante 11 días

El albedo promedio del sitio durante los 11 días de medición alcanza un valor de  $\rho = 0.215$ . Ineichen *et al.* (1990), encuentra que existe una dependencia del albedo con la altura solar y el índice de claridad del cielo ( $\varepsilon$ ), lo que produce un efecto pequeño en la variación del albedo. La Figura A.2.23 muestra el albedo para cielos nublados, cuando la radiación solar emitida por el hemisferio celeste se comporta de manera isotrópica, el albedo se mantiene de forma casi constante. Al ajustar una recta de regresión el albedo alcanza un valor de  $\rho = 0.1954$  y cuyo promedio es 0.2028.

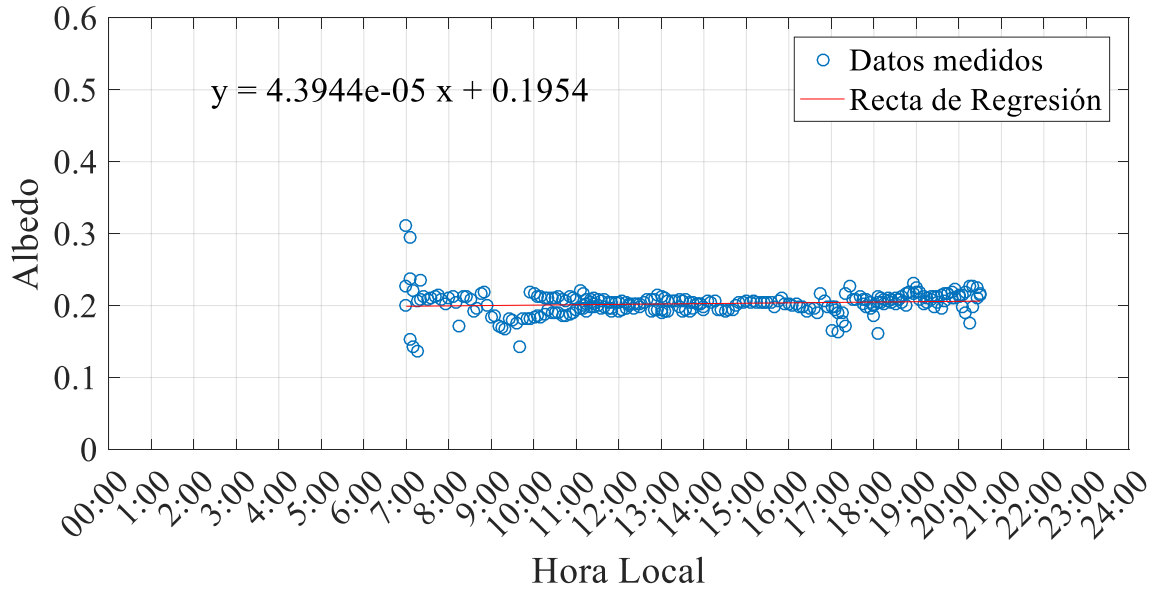


Figura A.2.23. Albedo para cielo nublado ( $\epsilon < 2.8$ )

Por otro lado, el albedo para días claros presenta variaciones durante el día (puntos de color azul en la Figura A.2.22), alcanzando su valor máximo cerca del amanecer y del atardecer, y decrece al acercarse al mediodía solar. Lo anterior reafirma lo expuesto por Ineichen *et al.* (1990) sobre la dependencia del albedo según la posición del sol. En la Figura A.2.24 se observa la variación del albedo según el ángulo cenital del sol ( $\theta_z$ ) y el polinomio ajustado por regresión lineal.

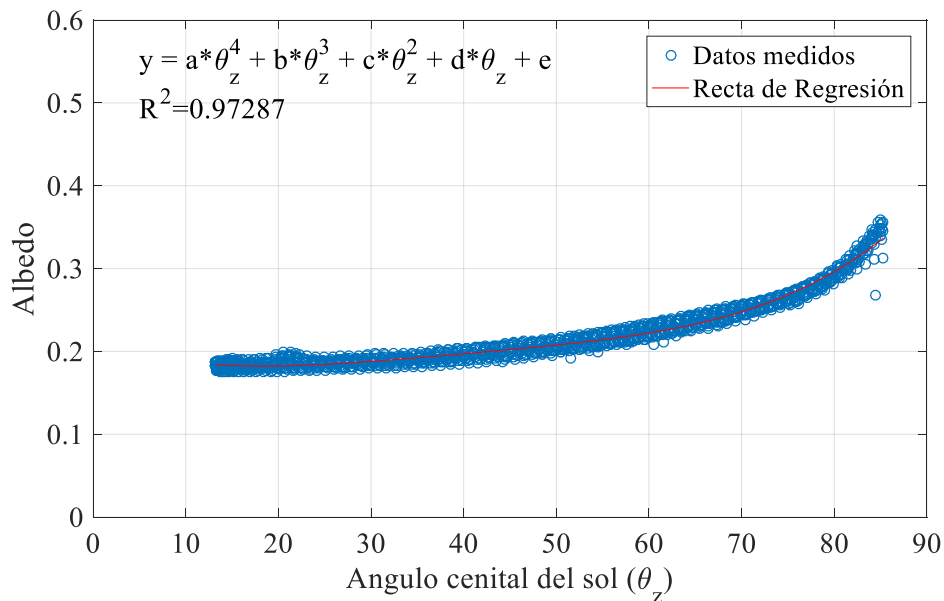


Figura A.2.24. Albedo para cielos claros y parcialmente cubiertos ( $\epsilon > 2,8$ )

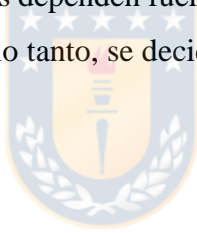
La curva para determinar el albedo según el ángulo de elevación del sol corresponde a un polinomio de grado cuatro que posee la siguiente forma funcional

$$\rho = a\theta_z^4 + b\theta_z^3 + c\theta_z^2 + d\theta_z + e \quad (\text{A.2.52})$$

Donde  $a = 1.952 \times 10^{-8}$ ,  $b = -3.104 \times 10^{-6}$ ,  $c = 1.904 \times 10^{-4}$ ,  $d = 0.0043$  y  $e = 0.2148$ .

Los albedos de la mañana y de la tarde no son perfectamente simétricos. El albedo de la mañana es ligeramente mayor que el albedo de la tarde. Según Nkemdirim (1972) la densidad de nubes, partículas de aire y vapor de agua aumentan después del mediodía, por lo tanto, estas partículas filtran algunas longitudes de onda del espectro solar, lo que podría aumentar el albedo de la tarde.

Si bien un modelo detallado mejora levemente los resultados del albedo (Ineichen *et al.*, 1990), no existen complicaciones computacionales para implementarlos en esta investigación, considerando además que estos efectos anisotrópicos dependen fuertemente del sitio donde se miden, su entorno y sus características particulares. Por lo tanto, se decidió considerar estos efectos anisotrópicos en este estudio.





### Anexo 3.1. Análisis de regresiones

En estadística, el análisis de la regresión es un proceso estadístico para estimar las relaciones entre variables, determinando una relación de dependencia entre la variable independiente (variable que representa una cantidad que se modifica en un experimento), las variables dependientes (variable que representa una cantidad cuyo valor depende de cómo se modifica la variable independiente) y un término aleatorio. El análisis de regresión permite entender cómo la variable dependiente varía al cambiar el valor de una de las variables independientes. El objetivo de la estimación es obtener una función sencilla de la variable explicativa, que sea capaz de describir lo más ajustadamente posible la variación de la variable dependiente. Existen dos grupos de regresiones: las regresiones lineales que pueden ser simples (una variable independiente) o múltiples (más de una variable independiente); y las regresiones no lineales que pueden ser representadas por funciones exponenciales, logarítmicas o polinomiales.

#### A.3.1.1 Regresión polinomial

La regresión polinomial es una forma de regresión lineal en donde la relación de la variable independiente  $X$  y la variable dependiente  $Y$  es modelada con un polinomio de grado  $n$ . La regresión polinómica más simple, es la que ocupa un polinomio de grado uno. Este caso se conoce como una regresión lineal simple, en donde el modelo se expresa de la siguiente forma:

$$Y = a_0 + a_1X + \varepsilon \quad (\text{A.3.1})$$

Donde,  $Y$ : variable dependiente (o explicada)

$X$ : variable independiente (o explicativas)

$a_1$ : parámetro, mide la influencia que tiene la variable explicativa sobre la variable explicada.

$a_0$ : Es la intersección o término constante

$\varepsilon$ : error aleatorio no observado

En algunos casos la dependencia de variables no se ajusta a una recta lineal, por lo que es conveniente utilizar una forma polinomial más compleja de la forma:

$$Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n + \varepsilon \quad (\text{A.3.2})$$

Para estimar los parámetros de la función se utiliza comúnmente el ajuste por mínimos cuadrados. Es decir, se trata de encontrar una función en la cual la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y esperados sea el menor. Otros métodos incluyen la simulación de Montecarlo (Peña Sanchez, 2001) y softwares estadísticos-matemáticos con funciones de optimización (Por ejemplo, Matlab, Fortran, C++, entre otros).

Con el fin de determinar si el modelo es adecuado, puede ser necesario utilizar conceptos de inferencia estadística, tales como intervalos de confianza para los parámetros, así como pruebas de bondad de ajuste, tales como el  $R^2$ .



### Anexo 4.1. Comparación entre valores medidos y simulados con los modelos de cielo de acuerdo a la orientación de la superficie vertical

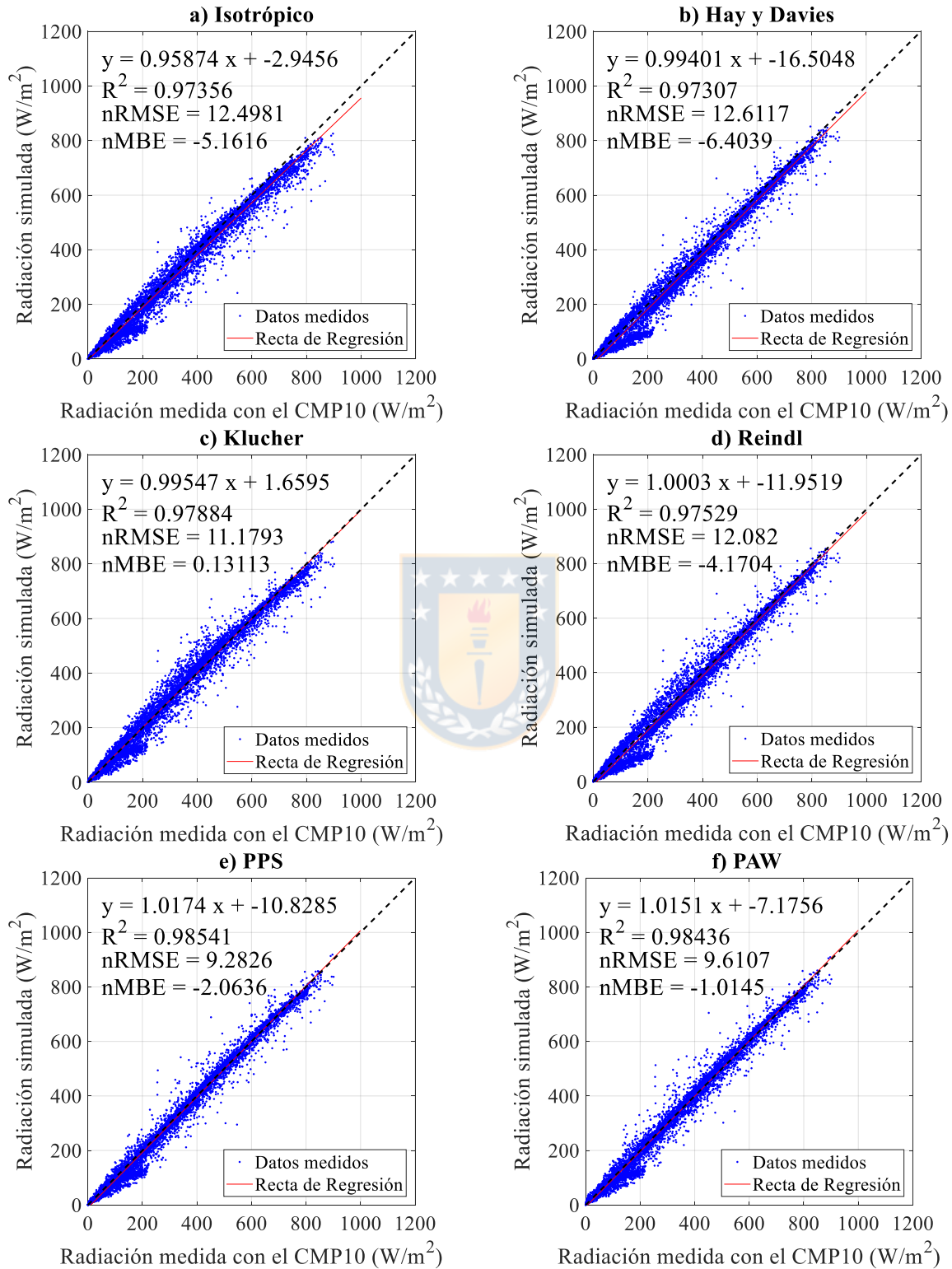


Figura A.4.1. Comparación entre los valores medidos por el CMP10 y los simulados con los modelos de cielo para la orientación Norte

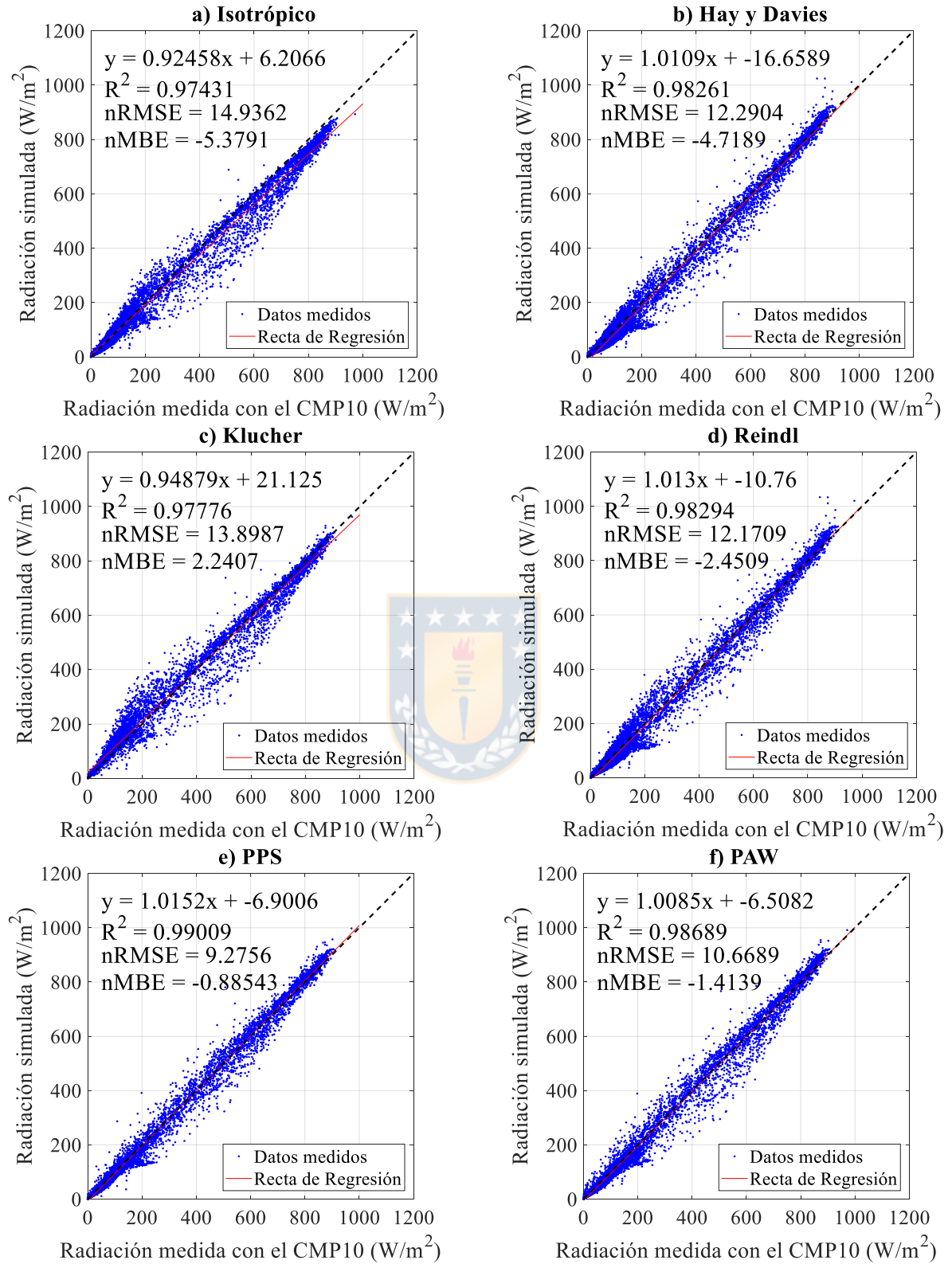


Figura A.4.2. Comparación entre los valores medidos por el CMP10 y los simulados con los modelos de cielo para la orientación Oeste

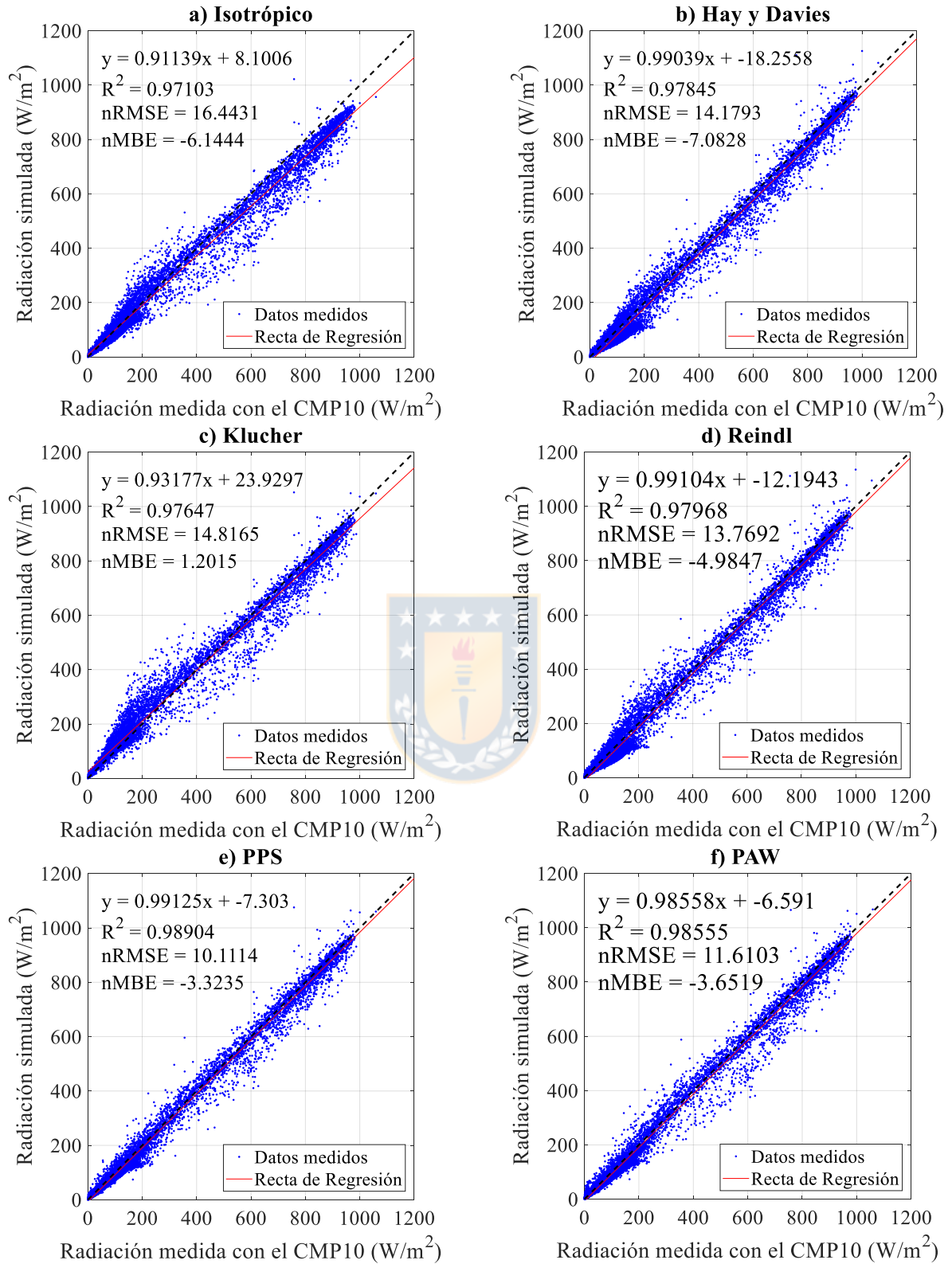


Figura A.4.3. Comparación entre los valores medidos por el CMP10 y los simulados con los modelos de cielo para la orientación Este

#### Anexo 4.2. Simulación de los modelos de cielo de acuerdo a la cobertura de nubes

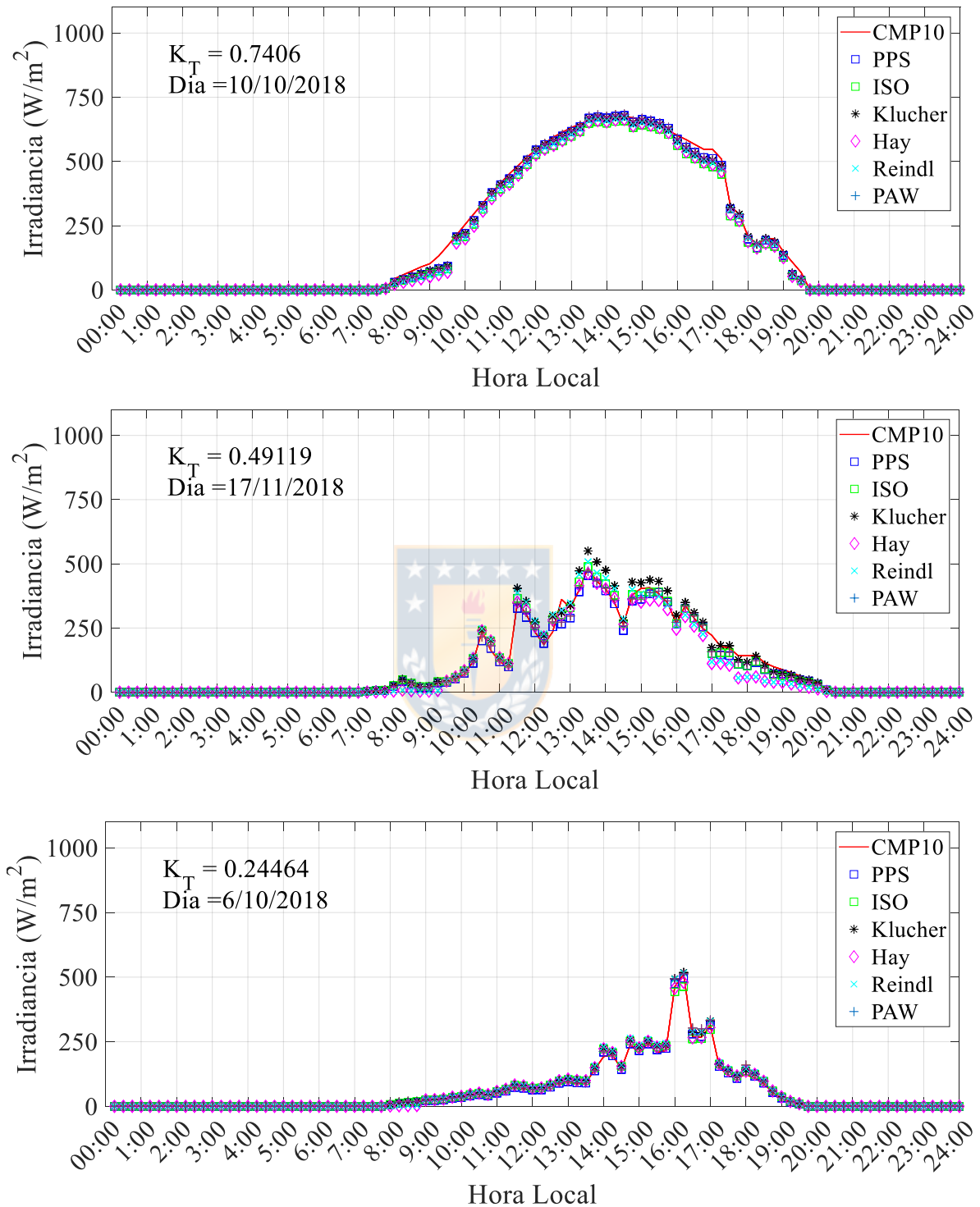


Figura A.4.4. Radiación solar global, medida por el CMP10 y la simulada con los modelos de cielo, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Norte para un día claro, parcialmente cubierto y nublado

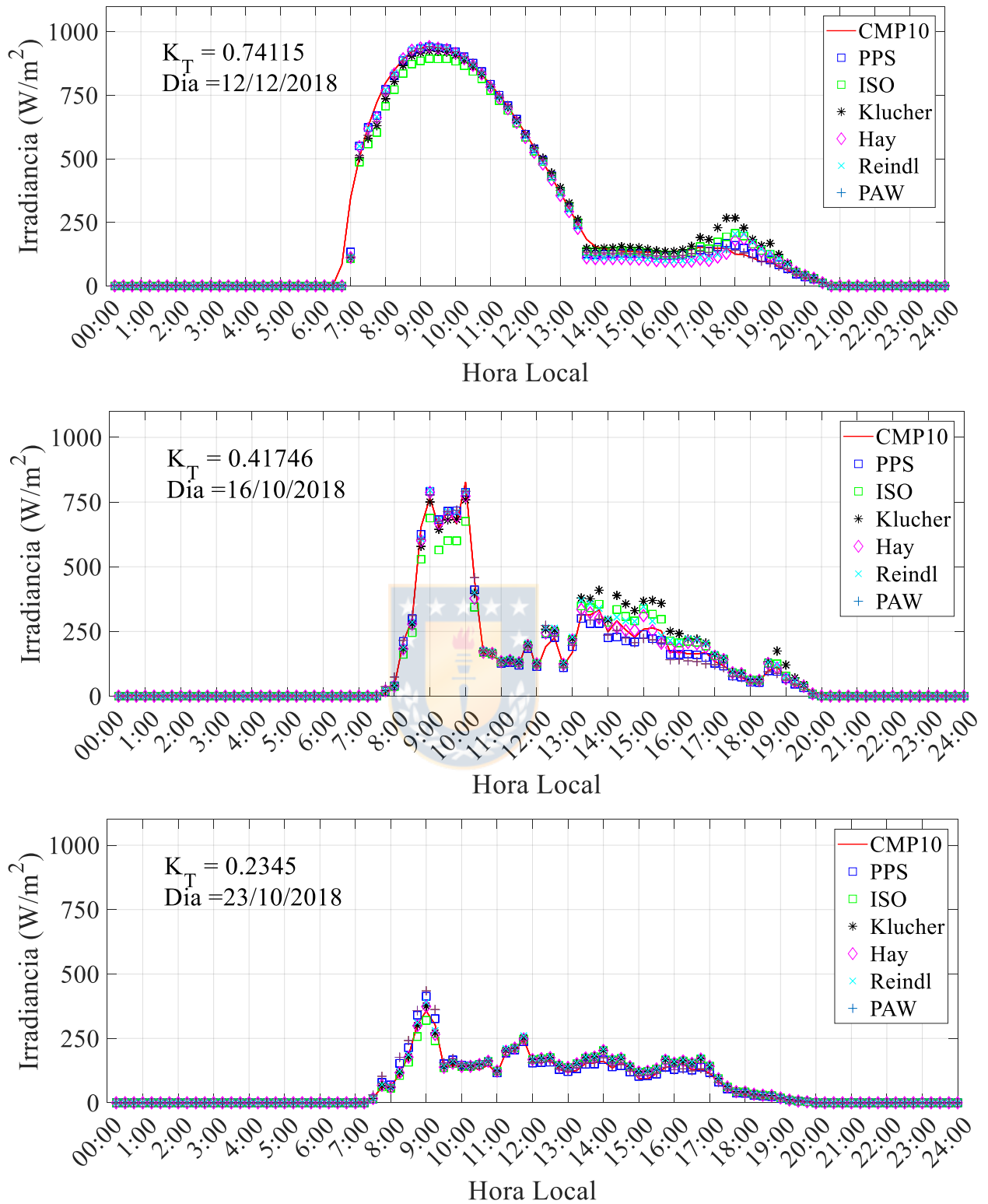


Figura A.4.5. Radiación solar global, medida por el CMP10 y la simulada con los modelos de cielo, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Este para un día claro, parcialmente cubierto y nublado

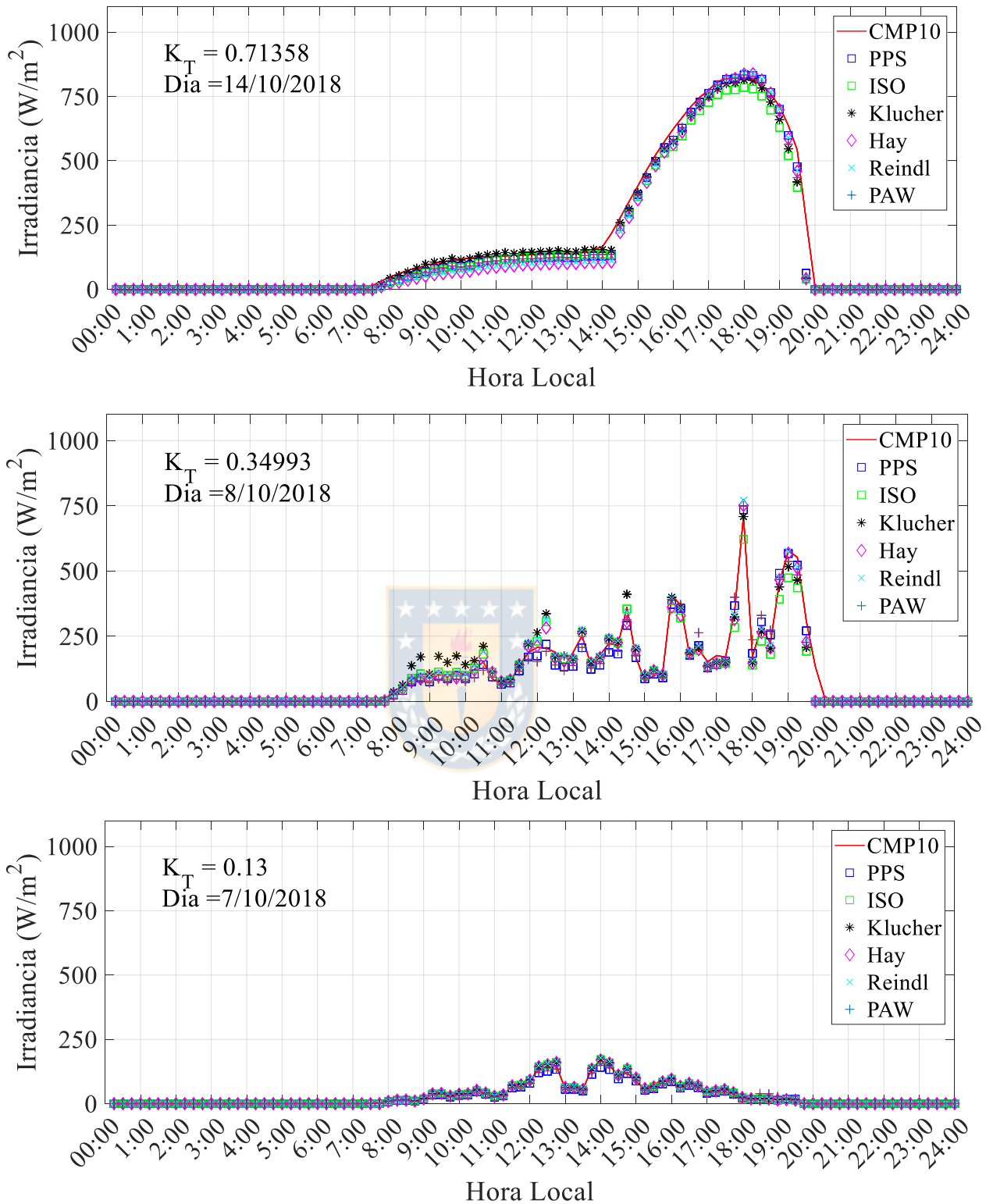


Figura A.4.6. Radiación solar global, medida por el CMP10 y la simulada con los modelos de cielo, incidente sobre una superficie vertical orientada hacia el Oeste para un día claro, parcialmente cubierto y nublado



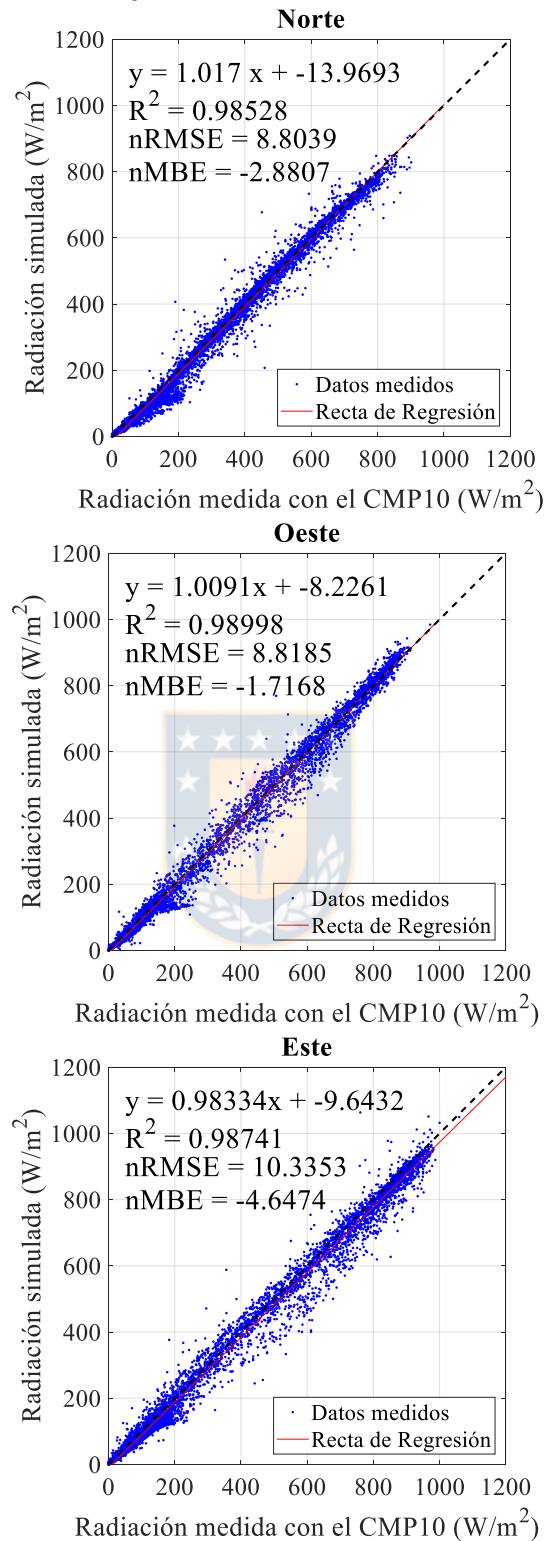
**Anexo 4.3. Modelo PPS con mejoras de Badosa *et al.* (2014) según la orientación**

Figura A.4.7. Comparación entre valores medidos y simulados con el modelo PPS en la orientación Norte, Este y Oeste, tras la aplicación de los factores de corrección propuestos por Badosa *et al.* 2014.