



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

EFFECTO DE LOS AEROSOL EN LA RADIACIÓN SOLAR Y LA PRODUCCIÓN
FOTOVOLTAICA EN SANTIAGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

MIRKO FRANCISCO ANDRÉS DEL HOYO PEÑA

PROFESOR GUÍA:
ROBERTO RONDANELLI ROJAS

PROFESOR CO-GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RICARDO MUÑOZ MAGNINO
RODRIGO ESCOBAR MORAGAS

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: MIRKO FRANCISCO ANDRÉS DEL HOYO PEÑA
FECHA: 2016
PROF. GUÍA: SR. ROBERTO RONDANELLI ROJAS
PROF. CO-GUÍA: SR. WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

EFFECTO DE LOS AEROSOLES EN LA RADIACIÓN SOLAR Y LA PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA EN SANTIAGO

Los constantes episodios críticos de contaminación atmosférica en Santiago en los últimos años plantean la duda de qué tanto afecta la alta carga de aerosoles en la ciudad en las distintas componentes de la radiación incidente y qué efectos podrían generar en distintos sistemas de generación eléctrica solar.

El presente trabajo busca cuantificar el efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación solar en la ciudad de Santiago, junto con determinar el efecto generado por los aerosoles en distintos módulos fotovoltaicos.

Para esto se analizaron mediciones de las distintas componentes de la radiación solar incidente (global horizontal, directa normal y difusa horizontal), junto con mediciones de espesor óptico de aerosoles y vapor de agua obtenidos de un fotómetro automático perteneciente a la red AERONET, ubicado en el Campus Beauchef de la Universidad de Chile. Esto con el objetivo de determinar el rol que tienen los aerosoles en la dispersión y atenuación de la radiación solar en Santiago.

Posteriormente, se cuantificó el efecto que tienen los aerosoles en distintas tecnologías fotovoltaicas (m-Si, p-Si y a-Si), tanto en la potencia de salida como en la generación anual. Esto se realizó mediante un análisis de las mediciones de potencia y producción PV obtenidas del Campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Sumado a esto, se simuló la potencia y la producción de un módulo de concentración fotovoltaica, mediante el uso de un modelo y la data adquirida.

Debido a la distancia entre las estaciones de medición, este estudio considera en un principio solo los periodos comprendidos entre las 11AM y las 3PM hora local entre los años 2014 y 2015, para luego extrapolar los resultados en un rango horario comprendido entre las 10AM y las 4PM hora local. Además, el presente estudio solo considera periodos bajo un criterio cielo despejado.

Los resultados indican que los aerosoles en Santiago producen un efecto no menor en las distintas componentes de la radiación solar, con diferencias de -5.4% para la GHI, -13.6% para la DNI y un aumento de 212% para la DHI al comparar el caso habitual con aerosoles y un caso estimado sin aerosoles.

Por otro lado, se determinó que la contaminación atmosférica en Santiago tiene un efecto negativo en la potencia de salida y en la producción PV en las distintas tecnologías, con diferencias porcentuales para la producción PV anual al comparar entre un caso con aerosoles y sin aerosoles de -4.5% para tecnologías PV convencionales y de -13.2% para tecnologías CPV.

Para mis padres, gracias por todo.

Agradecimientos

Primero, quisiera agradecer a mi familia y en especial a mis padres. Muchas gracias por su apoyo incondicional, sus consejos y su preocupación en todo este proceso, estoy eternamente agradecido de tenerlos a ambos. Gracias a mis hermanos por su cariño y sus risas, muchas veces fueron el motor en todo este proceso. A mi familia en general y sobre todo por aquellos que no están con nosotros, este logro esta dedicado a ustedes.

A mis profesores, y en especial al profesor Roberto, por la confianza y su paciencia durante todo este trabajo. Gracias también al profesor Ricardo, por su ayuda y por adentrarme un poco en el mundo de la meteorología. También al profesor Williams y al profesor Rodrigo, por sus consejos y ayuda prestada.

A mis amigos que me han acompañado en este camino: A los cabros (Reynolds, Cristobal, Daniels, Jimmy, Pollo) por la alegría, las horas de estudio y los asados. A la Natu por su apoyo y alegría infinita, a la Su por su paciencia y compañía durante estos años y al Felipe por la ayuda en tiempos de crisis.

A las personas que conocí en estos últimos años: Karen, Paula, Eddie y a toda la gente que ha pasado por la sala de memoristas, gracias por toda la buena onda.

A los viejos amigos: a la Franny por estar cuando lo necesitaba y al Jean por los momentos de ocio (mención honrosa a los LTG).

Agradecimiento especial también al Carlos, por el animo y los memes infinitos, fueron el mejor combustible para terminar todo este proceso.

A la Universidad Católica y al centro Fraunhofer Chile, por los datos de radiación solar y producción fotovoltaica.

Al departamento de Geofísica y el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, por la ayuda técnica prestada.

Este trabajo fue posible gracias a la ayuda del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2 junto a Conicyt (FONDAP 15110009) y al proyecto "*Black Carbon in the Andean Cryosphere*" (ACT1410)

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo Principal	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4. Alcances	3
2. Antecedentes	5
2.1. Radiación Solar	5
2.1.1. Geometría Solar y componentes de la radiación	7
2.1.2. Efecto del vapor de agua en la radiación solar	9
2.1.3. Detección de cielos despejados.	10
2.2. Aerosoles	12
2.2.1. Efecto de los aerosoles en la radiación solar	12
2.2.2. Efecto de los aerosoles en cielos despejados	15
2.2.3. Aerosoles en Santiago	16
2.3. Energía solar y sistemas de generación	18
2.3.1. Celdas fotovoltaicas	19
2.3.2. Tipos de celdas fotovoltaicas	22

2.3.3.	Efecto de las variables meteorológicas en sistemas fotovoltaicos	24
2.3.4.	Efecto de los aerosoles en los sistemas de generación solar	27
3.	Datos y Metodología	29
3.1.	Radiación y variables meteorológicas	29
3.2.	AOD, coeficiente de Ångström y vapor de agua	30
3.3.	Módulos fotovoltaicos	32
3.4.	Metodología	34
3.4.1.	Radiación y espesor óptico de aerosoles	34
3.4.2.	Producción fotovoltaica y espesor óptico de aerosoles	35
4.	Resultados	39
4.1.	Efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación	39
4.1.1.	Parametrización para la irradiación global horizontal	43
4.1.2.	Parametrización para la irradiación directa normal	44
4.1.3.	Parametrización para la irradiación difusa horizontal	45
4.2.	Efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica con tecnologías convencionales.	53
4.3.	Efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica con módulos CPV.	59
5.	Conclusiones	63
	Bibliografía	67
	Anexos	70

Índice de Tablas

2.1. Composición de aerosol simple en la ciudad de Santiago.	17
2.2. Energía de banda de gap para distintos semiconductores.	20
3.1. Especificaciones de las 3 tecnologías fotovoltaicas usadas en el estudio.	33
3.2. Características del módulo CPV escogido para simular.	33
3.3. Coeficientes térmicos y espectrales para el módulo CPV escogido.	33
4.1. Coeficientes para calcular GHI_o	43
4.2. Coeficientes para calcular GHI_m	43
4.3. Coeficientes para calcular DNI_o	44
4.4. Coeficientes para calcular DNI_m	44
4.5. Coeficientes para calcular DHI_o	45
4.6. Coeficientes para calcular DHI_m	45
4.7. Irradiancia promedio mensual y anual bajo condición de cielo despejado para GHI, DNI y DHI, junto a la fracción de la componente difusa horizontal sobre la global horizontal, entre las 10AM y 4PM hora local en Santiago para un caso calculado con aerosoles y un caso sin aerosoles entre los años 2014-2015.	52
4.8. Producción fotovoltaica mensual calculada para un caso con aerosoles y un caso sin aerosoles en condición de cielo despejado para el rango horario comprendido entre las 10AM y las 4PM durante los años 2014-2015 en Santiago. La potencia se calculó en base a un coeficiente de performance corregido del 75 %.	59
4.9. Producción mensual y anual estimada de un panel CPV entre las 11AM y las 3PM bajo condición de cielo despejado en Santiago para los años 2014-2015	61

Índice de Ilustraciones

2.1. Espectro radiativo solar en el tope de la atmósfera, a nivel del mar e irradiancia calculada según la ley de Planck	5
2.2. Distribución de las componentes directa, difusa y absorbida de la radiación solar.	6
2.3. Descripción gráfica de los distintos ángulos solares respecto a un observador. .	7
2.4. Modelos para estimar la radiación difusa en superficies inclinadas.	9
2.5. Efecto del vapor de agua en el espectro radiativo solar incidente.	10
2.6. Diferencia entre mediciones con y sin el filtro de cielos despejados entre los días 1 de Enero y 3 de Enero del 2014	12
2.7. Atenuación de la radiación directa en su paso por un medio homogéneo. . . .	13
2.8. Irradiancia global espectral al variar el parámetro β	14
2.9. Irradiancia global espectral al variar el parámetro α	14
2.10. Altura promedio de capa de mezcla en Santiago entre los años 2007 y 2013 a las 12PM.	17
2.11. Episodio de contaminación en Santiago	18
2.12. Esquemático de un dispositivo fotovoltaico	19
2.13. Eficiencia máxima teórica de un semiconductor	20
2.14. Curva I-V característica de una celda solar.	21
2.15. Efecto de la temperatura y la radiación en la curva I-V de un dispositivo fotovoltaico.	21
2.16. Celdas de Silicio	23
2.17. Respuesta espectral de distintos tipos de celdas fotovoltaicas convencionales .	23

2.18. Respuesta espectral de una celda multi-junction.	24
2.19. Esquema de concentrador solar.	24
3.1. Ubicación y foto en la terraza de Geofísica de la Universidad de Chile del fotómetro CIMEL	30
3.2. Concentración anual de material particulado en Santiago en las estaciones de Parque O'Higgins y La Florida durante los años 2014-2015.	31
3.3. Diferencia entre la concentración horaria de material particulado en Santiago entre las estaciones de Parque O'Higgins y La Florida durante el año 2015.	32
3.4. Planta fotovoltaica del Campus San Joaquín de la Universidad Católica	32
3.5. Metodología utilizada para estudiar el efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación.	37
3.6. Metodología utilizada para estudiar el efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica de celdas convencionales.	38
3.7. Metodología utilizada para estudiar el efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica simulada de módulo CPV.	38
4.1. AOD versus irradiancia global horizontal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos	39
4.2. AOD versus irradiancia directa normal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos	40
4.3. AOD versus irradiancia difusa horizontal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos	40
4.4. AOD versus fracción de la componente difusa horizontal sobre la componente global horizontal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos	41
4.5. AOD versus irradiancia global horizontal en Santiago para nueve distintos ángulos cenitales. La barra de colores representa la cantidad de vapor de agua en la columna en cm	42
4.6. Parametrización de la irradiancia global horizontal en función de AOD y el vapor de agua.	44
4.7. Parametrización de la irradiancia directa normal en función de AOD y el vapor de agua.	45
4.8. Parametrización de la irradiancia difusa horizontal en función de AOD y el vapor de agua.	46

4.9. Componentes de la radiación versus AOD en cinco ángulos cenit distintos, con vapor de agua constante	47
4.10. Medias mensuales de la radiación obtenida, la radiación parametrizada y la radiación en un caso sin aerosoles para las tres componentes en Santiago	48
4.11. Medias mensuales para la fracción entre la irradiancia medida y la estimada para un caso sin aerosoles para cielos despejados.	49
4.12. Medias mensuales de AOD500 y de fracción de DHI sobre GHI	50
4.13. Medias mensuales de vapor de agua y coeficiente de Ångström	50
4.14. Irradiancia mensual promedio calculada para un caso con aerosoles y sin aerosoles para las tres componentes para cielos despejados en Santiago entre los años 2014 y 2015.	51
4.15. Irradiancia global en plano inclinado versus espesor óptico de aerosoles bajo condición de cielo despejado para seis ángulos de incidencia.	53
4.16. Potencia fotovoltaica de las tres tecnologías estudiadas versus espesor óptico de aerosoles para tres ángulos de incidencia en condiciones de cielo despejado.	54
4.17. Potencia fotovoltaica de las tres tecnologías estudiadas versus espesor óptico de aerosoles bajo condición de cielo despejado para tres ángulos de incidencia junto al coeficiente de performance corregido.	54
4.18. Efecto de los aerosoles en las distintas tecnologías para 3 ángulos de incidencia, filtrado en base a la mediana del coeficiente del performance.	55
4.19. Potencia normalizada versus fracción de la componente difusa sobre la componente global en plano inclinado para las tres tecnologías y tres ángulos de incidencia, filtradas en función del coeficiente de performance y el vapor de agua.	56
4.20. Potencia fotovoltaica mensual promedio para el caso medido, obtenido mediante las parametrizaciones y estimado para un caso sin aerosoles para las distintas tecnologías en Santiago.	57
4.21. Potencia fotovoltaica mensual promedio calculada para un caso con aerosoles y un caso sin aerosoles, para las distintas tecnologías PV	58
4.22. Potencia mensual promedio entre las 11AM y las 3PM de un módulo CPV en Santiago durante los años 2015-2015.	60
4.23. Fracción entre la potencia simulada de un módulo bajo las condiciones medidas y la potencia simulada para un caso estimado sin aerosoles en Santiago durante los años 2014-2015 bajo condición de cielo despejado.	60

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes generales

El Sol es sin duda, la fuente de energía más importante de nuestro planeta y su rol en el desarrollo de la vida como la conocemos es innegable. Por años se ha estudiado la interacción del Sol con nuestro planeta en los distintos procesos químicos, físicos y biológicos que se desarrollan en la superficie, atmósfera y océano terrestre.

En particular, algunos de estos estudios buscan determinar el cómo la radiación solar interactúa en su totalidad con la Tierra, desde el momento en que entra a la atmósfera, hasta que incide en la superficie. Un problema complejo debido a los distintos factores y variables que afectan el paso de la radiación en su paso por la atmósfera. Entre estas variables están el vapor de agua, la masa atmosférica, el ozono y los aerosoles [1], siendo esta última la variable a estudiar en el presente trabajo.

Un aerosol es un coloide de partículas microscópicas que pueden ser solidas o liquidas y que se encuentran en suspensión en un gas. Su origen puede ser tanto natural como antrópico y tienen un rol fundamental en la absorción y dispersión de la radiación solar. Actualmente se tiene casos en el mundo como China o India, en donde el efecto de los aerosoles han generado que la cantidad de radiación PAR (Radiación Fotosintéticamente Activa, por sus siglas en inglés) disminuya entre 5-30 % [2].

Durante los últimos años, los episodios de contaminación atmosférica en Santiago han sido motivo de discusión no solo por la necesidad de establecer las fuentes y responsables, sino por que no se tiene aun certeza de todos los efectos que estos podrían generar en la ciudad.

En el presente trabajo se busca determinar el efecto que generan los aerosoles en las distintas componentes de la radiación solar, en particular en la partición entre radiación directa y difusa, junto con estudiar el efecto que estos generan en sistemas de generación fotovoltaica en la ciudad de Santiago.

1.2. Motivación

La alta carga de aerosoles en la atmósfera urbana sobre Santiago plantea la pregunta respecto si los aerosoles tienen un efecto considerable en la radiación incidente, y por lo tanto afectar el balance energético que se tiene en una escala local como Santiago.

Junto con esto, en los últimos años el interés por la energía solar, ya sea fotovoltaica o solar térmico, ha tenido un aumento sostenido, por lo que se hace necesario cuantificar el efecto que la contaminación atmosférica tiene sobre la generación de estos sistemas.

La motivación de este trabajo es poder determinar si es que existe una nueva externalidad negativa asociada a la contaminación atmosférica en Santiago, en la cual se relacione la cantidad de aerosoles y el potencial solar que se tiene en la ciudad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Principal

El objetivo principal del trabajo es determinar el efecto de los aerosoles en las diferentes componentes de la radiación solar en Santiago, junto con determinar si es que estos generan algún efecto en la potencia y producción de sistemas fotovoltaicos.

1.3.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- Determinar el efecto que generan los aerosoles en la partición entre radiación directa y difusa en la ciudad de Santiago.
- Cuantificar el efecto que tiene el aumento de aerosoles en la cuenca de Santiago, en términos de pérdida de potencial energético solar.
- Cuantificar mediante modelos y mediciones en terreno el efecto que tiene la partición de la radiación en paneles fotovoltaicos.
- Estimar la pérdida de producción fotovoltaica por efecto de los aerosoles en distintas tecnologías.

1.4. Alcances

Los alcances del presente trabajo consideran solo el efecto que tienen los aerosoles en las componentes global horizontal, global en plano inclinado, directa normal y difusa horizontal bajo condición de cielo despejado en rangos horarios fijos para todo el año, mediante la medición conjunta de distintas estaciones e instrumentos. Junto con esto, se evaluará el efecto que tienen los aerosoles en tres tipos distintos de celdas convencionales en base a silicio (m-Si, p-Si y a-Si) y se estimará el efecto de los aerosoles al simular la potencia de un módulo de concentración fotovoltaico en la ciudad de Santiago.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Radiación Solar

La radiación solar es la energía radiante emitida por el sol en forma de energía electromagnética, la cual proviene de una reacción de fusión nuclear. El espectro de la radiación solar es cercana a la de un cuerpo negro con temperatura cercana a los 5800 K. Cerca de la mitad de la radiación corresponde a la zona visible de onda corta del espectro, mientras que la otra mitad corresponde a partes cercanas al infrarrojo, junto con partes del ultravioleta. Su unidad de medida son los Watts por metro cuadrado (W/m^2). La Figura 2.1 muestra en detalle el espectro solar y su similitud con el espectro de un cuerpo negro a 6000 °K calculado con la ley de Planck.

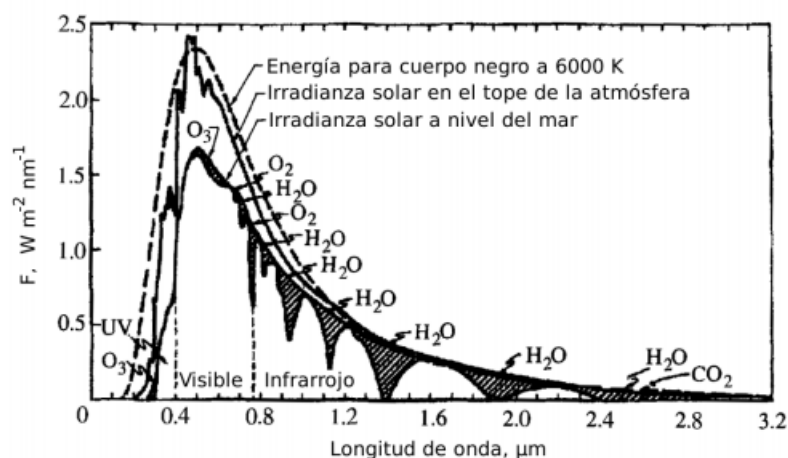


Figura 2.1: Espectro de la radiación solar en el tope de la atmósfera, a nivel del mar e irradiancia calculada según la ley de Planck.

Fuente : Adaptado de [3].

Cuando se habla del espectro radiativo se hace la diferencia entre el espectro extraterrestre y el espectro radiativo terrestre. La diferencia entre ambos espectros radica en que el espectro

extraterrestre no ha sido afectado por la atmósfera terrestre. Para estimar la irradiancia solar extraterrestre se integra el espectro extraterrestre o por encima de la atmósfera a una distancia de 1 unidad astronómica (UA), obteniendo la constante solar (I_{sc}), la cual se acerca a los 1353 W/m^2 . Para dar cuenta de la variación de la constante solar producto de la órbita elíptica que sigue la tierra alrededor del sol se calcula la distancia media Sol-Tierra E_o , que se muestra en la Ecuación 2.1.

$$E_o = 1 + 0,033 \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot DJ}{365} \right] \quad (2.1)$$

Donde DJ corresponde al día juliano (1 para el 1 de Enero y 365 para el 31 de Diciembre).

El espectro radiativo terrestre por otro lado es aquel que incide en la superficie, y por ende es afectado por la atmósfera terrestre en su paso. En su recorrido, la radiación solar sufre por distintos cambios debidos principalmente a la absorción, al scattering (dispersión) y a la reflexión por las distintas partículas presentes en la atmósfera terrestre. La radiación solar que incide en la superficie dependerá de diversos factores, tales como el tipo de partícula que atraviesa, su distribución, propiedades ópticas, concentración, la profundidad de la masa de aire que debe atravesar la radiación, la cantidad de agua presente en la columna, etc.

Al llegar a la superficie, y por efecto de la atmósfera, se tienen finalmente tres componentes de la radiación. Una componente directa (DNI o direct normal irradiance por sus siglas en inglés) que fue capaz de sortear los efectos ópticos de la atmósfera y que llega sin modificación en su dirección, una parte difusa (DHI o diffuse horizontal irradiance por sus siglas en inglés) que fue afectada por la dispersión producto de la atmósfera o la superficie, y una parte absorbida por la atmósfera y la superficie. La Figura 2.2 muestra la distribución de estas componentes.

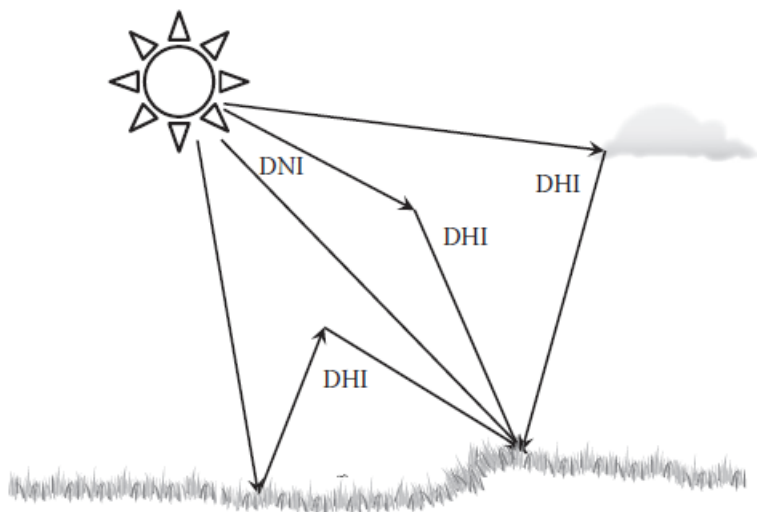


Figura 2.2: Distribución de las componentes directa, difusa y absorbida de la radiación solar. Fuente [4]

La componente difusa y directa dependen fuertemente de la partícula y la profundidad de la masa de aire que atraviesa. Por último, de la Figura 2.1 se puede ver que existen zonas

en donde predomina la absorción de distintas moléculas, como el agua, el ozono, CO_2 y el oxígeno. Estas zonas en donde se marca una profunda diferencia entre el espectro radiativo extraterrestre y el incidente se conocen como bandas de absorción.

2.1.1. Geometría Solar y componentes de la radiación

Se sabe que la Tierra describe una trayectoria elíptica alrededor del sol, con está en unos de sus focos. La traslación y la inclinación de la Tierra es la causante de las estaciones del año, mientras que la rotación genera el día y la noche. Para determinar matemáticamente la posición del sol con respecto a un observador en la superficie a lo largo del año es necesario comprender los distintos ángulos que describen su trayectoria. El ángulo que describe la posición actual del sol con respecto a la tierra es la declinación (δ), el cual se define como el ángulo que existe entre el ecuador terrestre y el vector tierra-sol. Luego se tiene el ángulo horario (ω), el cual describe la posición relativa del sol con respecto a la posición del observador en el meridiano local. Los otros dos ángulos que describen la posición del sol son el cenit (θ) y el azimut (ψ). El primero es el complemento de la altura solar, o bien el ángulo que se forma entre la normal de la superficie y la línea que une al sol y al observador. El segundo corresponde a la proyección en el plano horizontal del sol y el meridiano del observador. La Figura 2.3 muestra los distintos ángulos solares respecto a un observador.

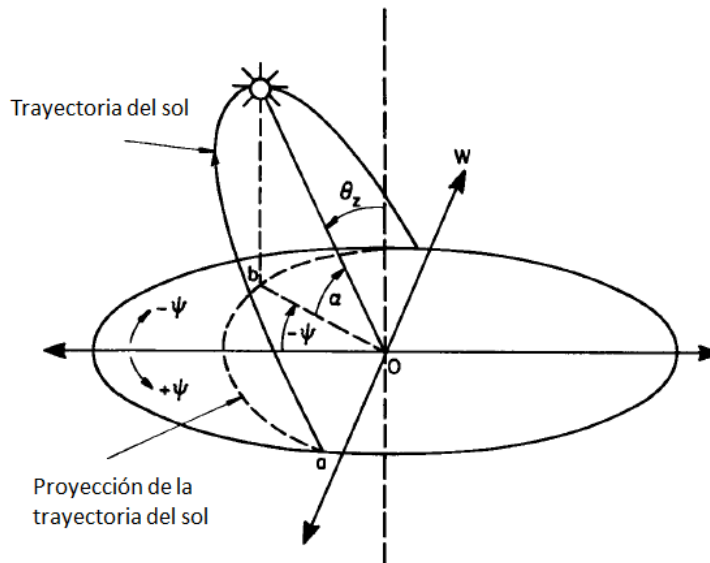


Figura 2.3: Descripción gráfica de los distintos ángulos solares respecto a un observador.

Fuente: Adaptado de [5]

Para una posición geográfica en particular se tiene que la relación trigonométrica entre el Sol y una superficie horizontal está dada por la siguiente ecuación:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega) \quad (2.2)$$

Donde ϕ es la latitud en la que se encuentra el observador.

Luego, la relación entre las distintas componentes de la radiación solar en un plano horizontal se describe por la siguiente ecuación:

$$GHI = DNI \cdot \cos(\theta_z) + DHI \quad (2.3)$$

Donde:

GHI : Irradiancia Global Horizontal [W/m^2].

DNI : Irradiancia Directa Normal [W/m^2].

DHI : Irradiancia Difusa Horizontal [W/m^2].

De esta formula se ve que al disminuir el ángulo de incidencia, o el cenit, se tiene una mayor cantidad de radiación global en un plano horizontal.

Por otro lado. para un plano inclinado fijo (ángulo de inclinación y azimut constante durante el año) se tiene que el ángulo de incidencia θ_{AOI} se calcula mediante la Ecuación 2.4.

$$\cos(\theta_{AOI}) = \cos(\theta_z)\cos(\gamma_o) + \sin(\theta_z)\sin(\beta)\cos(\psi - \psi_{plano}) \quad (2.4)$$

Donde ψ_{plano} es el azimut del plano y γ_o es la inclinación de este.

Con esto, uno puede obtener la irradiancia global en una superficie inclinada fija mediante la Ecuación 2.5:

$$GHI_{POA} = DNI_{POA} + DHI_{POA} \quad (2.5)$$

Donde:

DNI_{POA} : Irradiancia directa en el plano incidente [W/m^2].

DHI_{POA} : Irradiancia difusa en el plano incidente [W/m^2].

Para calcular la irradiancia directa en el plano incidente se multiplica la irradiancia directa normal por el coseno del ángulo de incidencia, es decir:

$$DNI_{POA} = DNI \cdot \cos(\theta_{AOI}) \quad (2.6)$$

Sin embargo, para calcular la irradiancia difusa en el plano inclinado existen múltiples modelos. El utilizado en el presente trabajo es el modelo de Klucher [6], un modelo anisotrópico que combina el modelo de Liu-Jordan [7] y el modelo de Temps-Coulson [8], obteniendo una relación que toma en cuenta la componente isotrópica de la radiación difusa y la componente

circumsolar de esta. Es decir:

$$DHI_{POA} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(\gamma_o)) \cdot DHI \cdot (1 + f_k \cos^2(\theta_{AOI}) \sin^3(\theta_z))(1 + f_k \sin^3(\gamma_o/2)) \quad (2.7)$$

Donde $f_k = 1 - (DHI/GHI)^2$

Del modelo se puede ver que cuando la fracción de difusa sobre global se acerca a 0 (condición para cielos despejados y sin dispersión de Rayleigh), se tiene un modelo isotrópico (Liu-Jordan) y cuando la fracción de difusa sobre global aumenta se tiene la contribución de la componente difusa que viene de la proximidad del disco solar. La Figura 2.4 muestra la contribución isotrópica y circumsolar en un modelo anisotrópico.

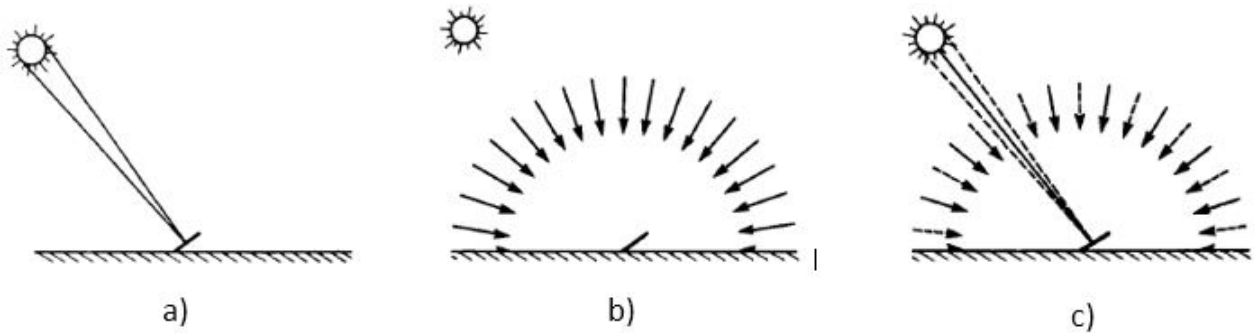


Figura 2.4: Modelos para estimar la radiación difusa en superficies inclinadas. a) Componente difusa Circumsolar b) Modelo Isotrópico c) Modelo anisotrópico.

Fuente: Adaptado de [5].

2.1.2. Efecto del vapor de agua en la radiación solar

El vapor de agua es uno de los mayores absorbentes en la atmósfera terrestre [9]. Este gas absorbe en bandas específicas del infrarrojo cercano del espectro, como se puede ver en la Figura 2.5, específicamente entre los 400 y los 700 nm.

La cantidad de vapor de agua entre la superficie y el tope de la atmósfera en una dirección cenital se denomina agua precipitable (w). Esta también puede ser descrita como el espesor de agua líquida que podría obtenerse en una dirección cenital si todo el vapor de agua en esa columna se condensara.

El efecto más notorio que tiene la cantidad de agua precipitable tiene que ver con su capacidad de absorción, en donde un aumento de la cantidad de agua precipitable en la atmósfera genera un descenso de la radiación incidente ([10], [11]). El efecto que tiene el vapor de agua en el espectro radiativo incidente se puede ver en la Figura 2.5, en donde se puede apreciar el descenso de radiación directa en las bandas de absorción del agua a medida que aumenta la cantidad de agua precipitable.

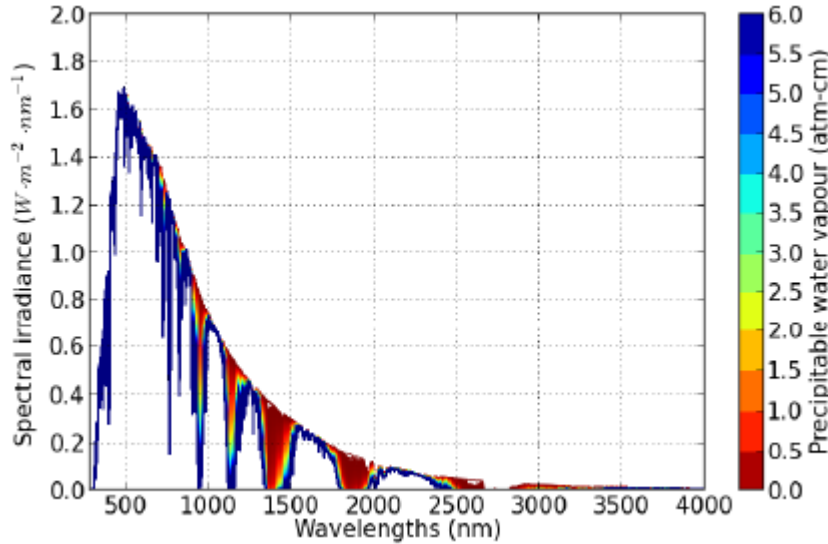


Figura 2.5: Efecto del vapor de agua en el espectro radiativo solar incidente.
Fuente: [12].

2.1.3. Detección de cielos despejados.

La detección de cielos despejados, que se definen como periodos con muy poca o sin cobertura de nubes, es de vital importancia en los estudios que consideran el efecto de alguna componente en la radiación solar. Esto, ya que la nubosidad genera variaciones importantes en la transmitancia y el scattering de la radiación solar, debido al contenido de agua que contienen las nubes.

La clasificación para cielos despejados se puede hacer en función del grado de nubosidad (cantidad de nubes en el cielo, medido en Octas), mediante el índice diario de claridad K_t , que se define como la razón entre la radiación media diaria incidente y la media diaria extraterrestre, o bien, mediante distintos modelos que permiten clasificar y detectar nubosidad en intervalos acotados de tiempo.

Para el presente trabajo no se cuenta con mediciones in situ de nubosidad, por lo que se estimaron los intervalos en que no se tenía nubosidad mediante los datos medidos de radiación global y difusa. Para esto se utilizó un método que analiza y detecta los cambios en la radiación incidente que pudiesen ser generados por el paso de una banda de nubes.

Este método fue desarrollado por Long y Ackerman [13], el cual consta de varias pruebas que permiten identificar y clasificar días despejados y periodos sin nubosidad, mediante mediciones de un minuto de irradiancia global y difusa horizontal. El método primero asume que un día despejado puede ser ajustado a una función de potencia de la forma:

$$Y = a \cdot \mu_0^b. \quad (2.8)$$

Donde μ_0 es el coseno del ángulo cenit.

Luego de esto se realizan cuatro pruebas:

- Primera prueba: Se normaliza la irradiancia global horizontal de la forma:

$$GHI_n = GHI/\mu_o^b. \quad (2.9)$$

En una primera iteración se fija el parámetro b a 1.2 (el cual se considera como un exponente recurrente en varias estaciones estudiadas [13] [14]) y se eliminan aquellos intervalos en donde GHI_n sea mayor que $1250 W/m^2$, menor que $1000 W/m^2$ para μ_0 mayores a 0.2 y menor que $900 W/m^2$ para μ_0 menores o iguales a 0.2. En una segunda iteración se ajustan los días a una función de potencia, como se detalla en la Ecuación 2.8, pero manteniendo el exponente b en 1.2; eliminando los intervalos en donde GHI_n es mayor que $a + 100 W/m^2$ y menor que $a - 100 W/m^2$.

- Segunda prueba: Se establece un límite máximo para la radiación difusa incidente. El límite se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$DHI_{lim} = D_{max} \cdot \mu_0^{0,5} \quad (2.10)$$

Donde D_{max} es un parámetro que puede ir de 150-300 W/m^2 y que depende de las condiciones del lugar. Para este trabajo se optó por 200 W/m^2 , el cual fue escogido mediante distintas iteraciones e inspecciones de las series de tiempo, mostrando que con el límite escogido se evitaba eliminar intervalos en que no era concluyente que el aumento de radiación difusa horizontal era causado por el paso de una nube.

- Tercera prueba: En este se inspeccionaron los cambios de magnitud en el tiempo de la radiación global horizontal incidente, mediante la comparación entre la variación de la radiación terrestre y la radiación extraterrestre. La irradiancia extraterrestre se calcula como:

$$F_{\downarrow T} = I_{sc} \cdot E_o \cdot \mu_0 \quad (2.11)$$

Luego se verifica que la variación de irradiancia global horizontal en superficie $|\Delta F_{\downarrow}/\Delta t|$ este contenido en los cambios que la irradiancia por sobre la atmósfera pudiese tener.

- Cuarta prueba: Se analiza la variabilidad de la normalización de la fracción entre la componente difusa y la global, la cual se define como:

$$Dr_n = D_r/\mu_o^b. \quad (2.12)$$

Donde $D_r = \frac{DHI}{GHI}$

Esta es la prueba mas agresiva de los cuatro, ya que suele confundir el ruido del instrumento de medición con el paso de nubes de espesor muy pequeño. Para evitar esto se optó por aceptar intervalos con desviación estándar menor a 0.003 en un periodo de 11 minutos con un exponente b igual a -0.8. Un ejemplo de como el filtro de días despejados funciona se puede ver en la Figura 2.6.

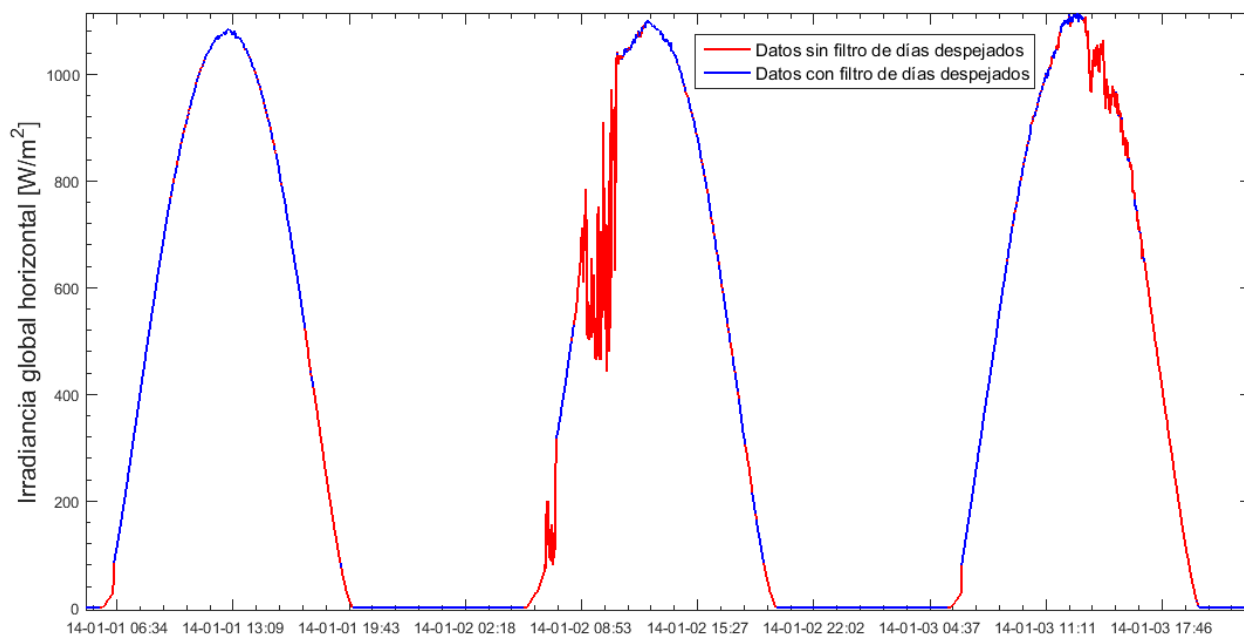


Figura 2.6: Diferencia entre mediciones con y sin filtro de cielos despejados entre los días 1 de Enero y 3 de Enero del 2014.

2.2. Aerosoles

2.2.1. Efecto de los aerosoles en la radiación solar

Los aerosoles tienen un efecto en la transmitancia y la dispersión de la radiación solar, siendo uno de los agentes que más influye en el paso de la radiación hacia la superficie terrestre. La ecuación de Bouguer establece que la radiación directa incidente en una superficie es proporcional a la distancia transversal en el medio y al flujo local de radiación, esto es:

$$I_{n\lambda} = I_{on\lambda} \cdot \exp(-k_{\lambda}m) \quad (2.13)$$

Donde:

$I_{n\lambda}$: Rayo monocromático de irradiancia directa normal emergiendo de un medio.

$I_{on\lambda}$: Rayo monocromático de irradiancia directa normal entrando a un medio.

k_{λ} : Coeficiente monocromático de extinción por espesor óptico.

m : Largo del camino óptico.

Para el caso de aerosoles, el coeficiente monocromático de extinción por espesor óptico o espesor óptico de aerosoles (τ o $k_{a\lambda}$) se puede calcular con la fórmula de Ångström, que describe el coeficiente monocromático de extinción generado por los aerosoles en una longitud de onda, es decir:

$$\tau = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (2.14)$$

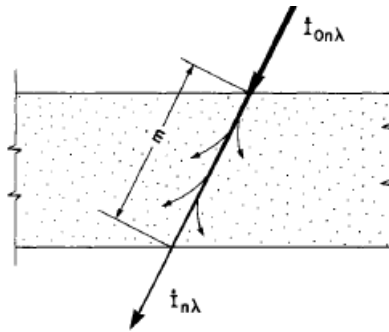


Figura 2.7: Atenuación de la radiación directa en su paso por un medio homogéneo.

Fuente: [5].

Donde:

τ : Espesor óptico de aerosoles o AOD por sus siglas en inglés.

λ : Longitud de onda [μm].

β : Coeficiente de turbiedad.

α : Coeficiente de longitud de onda (Coeficiente de Ångström).

El coeficiente β es un valor que puede variar desde 0 a 0.5 y representa la cantidad de aerosoles presente en la atmósfera, siendo 0.5 una atmósfera sucia y 0 una atmósfera limpia. Por otro lado, el coeficiente α determina la distribución del tamaño de las partículas, en donde a mayor α se tienen partículas más finas.

Con esto, se tiene que al aumentar β se genera una disminución de la radiación incidente, debido a que la absorción y el scattering es mayor en atmósferas más sucias [5]. No obstante, un aumento de β no asegura un aumento de radiación difusa incidente en la superficie, ya que puede darse el caso en que las partículas generen una dispersión tal que una porción de la radiación solar sea devuelta al espacio. También se tiene que el efecto de β en la dispersión y en la absorción serán mayores a medida que aumenta el ángulo de incidencia, debido a que la radiación tendrá que atravesar una mayor masa de aire. Esto se puede ver en la Figura 2.8. Un caso muy similar se da con el parámetro α y que se puede ver en la Figura 2.9, en donde un aumento de α genera también una disminución de la radiación incidente, pero en menor magnitud la causada por el parámetro β , debido a que el parámetro α da cuenta de que tan dispersiva será la atmósfera.

Para medir el espesor óptico de aerosoles se utilizan instrumentos llamados fotómetros, los cuales miden la radiación incidente en dos o más longitudes de onda para obtener los coeficientes α y β .

Las longitudes de onda que se escogen para las mediciones de espesor óptico son aquellas en donde la absorción molecular es mínima, las cuales van desde 340 nm a los 1640 nm para las mediciones realizadas por fotómetros de la red AERONET (Aerosol Robotic Network), como con mediciones en los canales 470, 550, 660, 1240 y 2120 nm para estimaciones satelitales realizados por los satélites Aqua y Terra del espectroradiómetro MODIS.

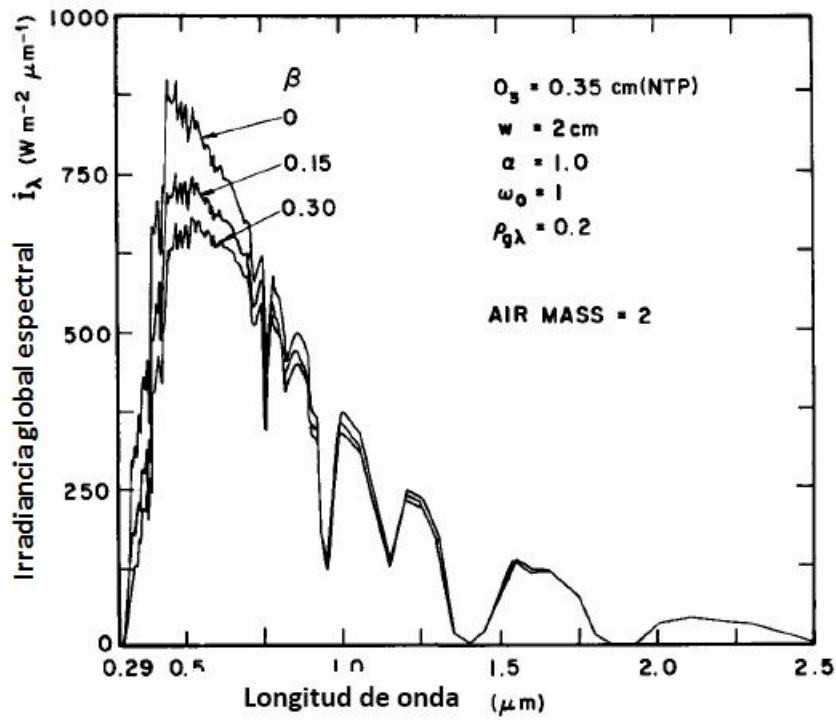


Figura 2.8: Irradiancia global espectral al variar el parámetro β .
Fuente Adaptado de [5].

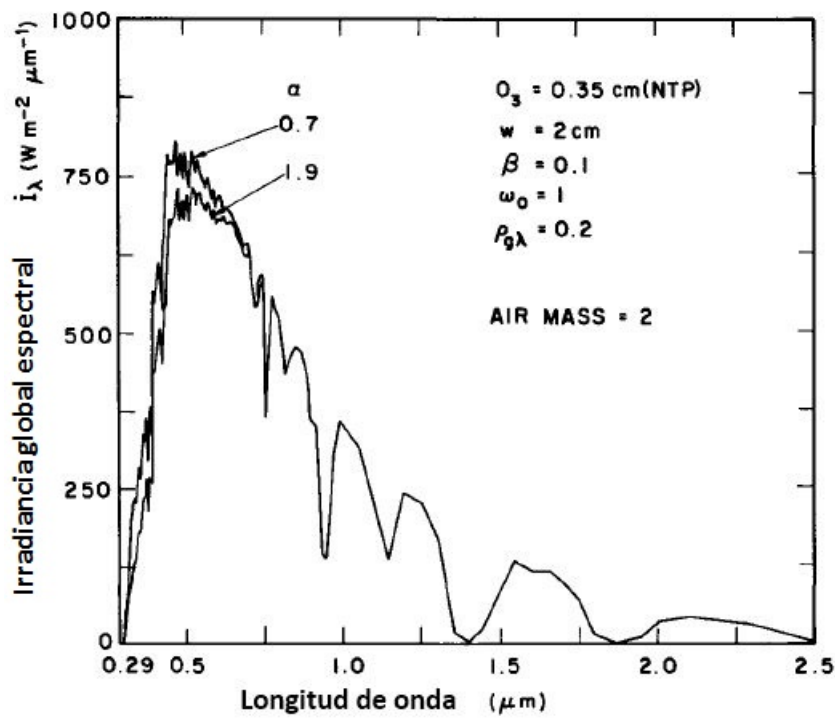


Figura 2.9: Irradiancia global espectral al variar el parámetro α .
Fuente Adaptado de [5].

Durante años se ha investigado la relación entre el material particulado y el espesor óptico de aerosoles en numerosas campañas de medición. En Santiago, por ejemplo, se encontró que las mediciones de AOD en 440 nm muestran una baja correlación respecto a las mediciones de material particulado [15]. Sin embargo, se muestra que el espesor óptico de aerosoles si se correlaciona en cierta parte con la altura de capa límite de Santiago, indicando que un aumento del espesor óptico no solo estaba influenciado por el aumento en la concentración de material particulado, sino que también por el efecto de la meteorología del lugar, que en el caso de Santiago, se da por un marcado efecto debido a la vaguada costera y la subsidencia generada en ciertas épocas del año por el anticiclón del Pacífico [16]. Otro caso fue presentado por Escribano et al. [17], el cual muestra que el AOD es capaz de capturar la variabilidad de la columna vertical de material particulado en Santiago, obtenida mediante mediciones superficiales de PM en la cuenca de Santiago y los datos de reflectividad de un nefabosímetro. Para un AOD modelado y la columna de material particulado se tiene un coeficiente de correlación de 0.96.

También se ha estudiado el efecto de los aerosoles generados por quemas de biomasa en la radiación incidente, mostrando que el AOD genera un efecto importante en las componentes directa normal y difusa horizontal [18], debido a la dispersión y atenuación que las partículas, produciendo una disminución de la componente directa y un aumento de la componente difusa.

Investigaciones realizadas en Beijing y Shanghai han mostrado que los aerosoles urbanos no solo han generaron una atenuación de la componente directa de la radiación, sino que también un aumento de la componente difusa en la mayoría de los episodios críticos de contaminación en comparación con un día normal, llegando a un aumento del 40.3 % de la componente difusa en Beijing y de un 9 % de Shanghai [19].

2.2.2. Efecto de los aerosoles en cielos despejados

Diversos estudios se han enfocado en conseguir modelos que permitan obtener la radiación incidente en base a mediciones de espesor óptico de aerosoles. Estos modelos se basan en la Ley de Bouguer, considerando las mediciones del espectro radiativo integrado junto con el espesor óptico en una longitud de onda (550nm o 675nm son los mas recurrentes debido a su ubicación dentro del espectro visible).

Estos estudios muestran que el espesor óptico de aerosoles y las componentes directa y global presentan una relación exponencial ([14],[20]), con un comportamiento lineal para AOD menores a 0.5 y que decae a medida que aumenta el AOD. Para el caso de la componente difusa se tiene que existe un aumento lineal para AOD menores a 0.25, para luego aumentar de forma similar a una ley de potencia([20],[21]). Por último, la fracción de la componente difusa horizontal sobre global horizontal muestra un comportamiento lineal, según lo mostrado por [18], [20] y [22]. Es decir:

$$GHI = GHI_o \cdot \exp(GHI_m \cdot \tau) \quad (2.15)$$

$$DNI = DNI_o \cdot \exp(DNI_m \cdot \tau) \quad (2.16)$$

$$DHI = DHI_o \cdot \tau^{DHI_m} \quad (2.17)$$

$$\frac{DHI}{GHI} = f_m \cdot \tau + f_o \quad (2.18)$$

Se puede ver de las ecuaciones que GHI_o , DNI_o , DHI_o y f_o corresponden a la irradiancia en ausencia de aerosoles. Dado que la radiación incidente en un caso sin aerosoles depende del camino óptico que atraviesa y del contenido de vapor de agua en la columna de aire, se tiene que estos coeficientes están en función del ángulo cenital y el vapor de agua. Por otro lado, se puede ver que los coeficientes GHI_m , DNI_m , DHI_m y f_m determinan el cambio en la irradiancia al variar el AOD. Estos últimos coeficientes también están en función de θ_z y w .

Los coeficientes GHI_o , DNI_o , DHI_o y f_o son importantes en el presente estudio debido a que permiten comparar la radiación incidente medida con la que habría en ausencia de aerosoles. Sin embargo, el parámetro DHI_o requiere un ajuste lineal adicional en el rango de AOD entre 0 y 0.2 para obtener la irradiancia difusa horizontal en ausencia de aerosoles, debido a que la Ecuación 2.17 asume que en ausencia de AOD no existe componente difusa horizontal.

2.2.3. Aerosoles en Santiago

Desde la década de los 90, cuando la calidad del aire Santiago empezó a verse fuertemente mermada por la contaminación, se han realizaron esfuerzos para mejorar el monitoreo de la calidad del aire, con énfasis en el material particulado con radio menor a $10 \mu m$ (PM10) y menor a $2.5 \mu m$ (PM2.5).

La composición de los aerosoles en Santiago se ha determinado mediante campañas esporádicas, pero que lamentablemente no presentan datos actualizados o nuevos. La información más reciente está incluida en el Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Santiago (PPDA, 2010). En la Tabla 2.1 se muestra la composición típica de aerosol presente en la ciudad de Santiago, la cual está compuesta principalmente por Carbono Negro (BC, por sus siglas en inglés), sulfato de amonio, nitrato de amonio y polvo. Esta composición no se ve afectada por estacionalidades y se mantiene prácticamente constante durante el año [23].

Tabla 2.1: Composición de aerosol simple en la ciudad de Santiago.

Tipo de aerosol	Masa de PM 2.5	Masa de PM10-2.5
Carbono negro	50 %	0 %
Sulfato de amonio	13.5 %	0 %
Nitrato de amonio	28.5 %	0 %
Polvo	8 %	100 %

Fuente: [23]

Las fuentes de contaminación son múltiples [24], en donde se tiene tanto fuentes fijas como calderas, procesos industriales, calefacción, hasta fuentes móviles como vehículos diésel y a gasolina. Sin embargo, y aunque durante años se han establecidos normas de emisión para material particulado, la ciudad de Santiago sigue presentando escenarios críticos de contaminación habituales debido principalmente a la localización geográfica de la ciudad y las condiciones meteorológicas.

Una de estas condiciones es la altura de la capa límite, la cual se genera debido a la constante inversión térmica en la zona, producida en parte por la acción del anticiclón del Pacífico junto con el aumento de la subsidencia debido al paso de sistemas de escala sinóptica y subsinóptica como las bajas costera [16]. Se tiene que la altura de la capa de mezcla tiene un comportamiento fuertemente estacional, aumentando su altura en la época de verano y disminuyendo en invierno [25]. Para ilustrar el comportamiento estacional se tiene la Figura 2.10 que muestra la altura de la capa de mezcla promedio durante los años 2007 a 2013 a las 12PM tomadas por el Nefobasímetro ubicado en el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

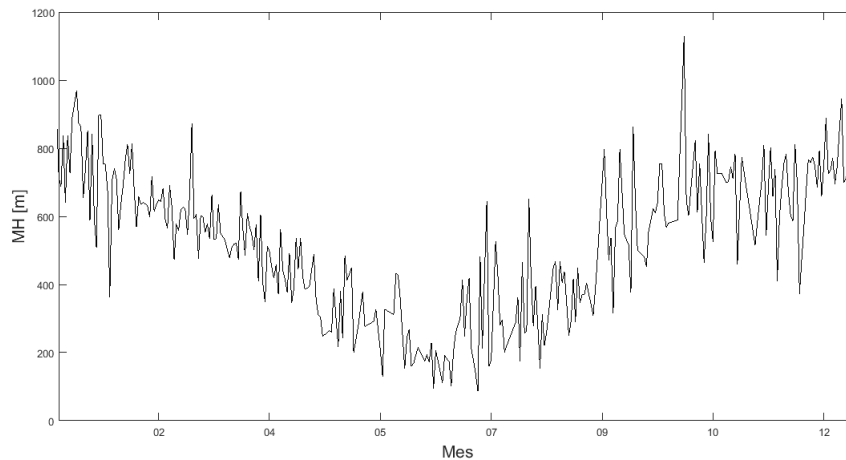


Figura 2.10: Altura promedio de capa de mezcla en Santiago entre los años 2007 y 2013 a las 12PM, medidos por el nefobasímetro del departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

Junto con esto la estabilidad de la capa límite varía durante el día, formando una capa de mezcla homogénea y estable en horas de la mañana para posteriormente romperse a horas de la tarde al aumentar las temperaturas, dando pie también al transporte de material

particulado a la zona norponiente de la ciudad. Un ejemplo de la estabilidad de la capa de mezcla se puede ver en la Figura 2.11, en donde la altura de la capa de mezcla en la época de invierno disminuye a tal magnitud que se puede distinguir con facilidad, generando la postal habitual de los episodios de pre-emergencia/emergencia ambiental en la ciudad de Santiago.

Sumado a lo anterior, se tiene una variabilidad del espesor óptico de aerosoles en la cuenca debido al transporte de aerosoles por vientos de dirección sur-oeste, el cual se hace más importante en las horas de la tarde debido al aumento en magnitud de los viento, desplazando aerosoles al sector cordillerano [16].



Figura 2.11: Episodio de contaminación en Santiago.

Fuente: La Tercera.

2.3. Energía solar y sistemas de generación

La energía solar es una de las fuentes de energía renovable no convencional que más auge ha tenido en los últimos años, debido a la rápida investigación y mejora de los dispositivos encargados de capturar y transformar la radiación solar incidente. Actualmente se puede aprovechar la energía solar mediante dispositivos térmicos (colectores solares), mediante dispositivos semiconductores (células fotovoltaicas), o bien mediante sistemas de concentración (sobre algún fluido de trabajo o celda fotovoltaica).

Actualmente Chile es una de las zonas de mayor interés para los inversionistas de esta tecnología, debido a los altos índices de radiación solar incidente en las diferentes regiones del país [1] y la baja que ha tenido en los últimos años los costos de inversión para esta tecnología.

La Región Metropolitana no se queda atrás, siendo una zona prometedora para este tipo de tecnología, con proyectos que alcanzan en conjunto los 2GWp (algunos en construcción o en proceso de licitación) [26].

Sin embargo, y debido a que los altos costos de inversión siguen siendo altos para instalar estos sistemas, se requiere de un buen estudio de factibilidad y de disponibilidad del recurso

solar, teniendo en cuenta que las distintas variables meteorológicas tales como la nubosidad, la temperatura, la contaminación atmosférica o la magnitud y dirección de los vientos podrían generar impacto en la producción y en la vida útil de los dispositivos.

2.3.1. Celdas fotovoltaicas

Una celda fotovoltaica es un dispositivo de estado sólido hecho de materiales semiconductores con impurezas o semiconductores extrínsecos, que permiten la conversión directa de energía solar en electricidad. Las celdas convencionales están compuestas por dos capas de semiconductores, uno dopado con un material con mayor cantidad de electrones en la banda de valencia que el semiconductor (semiconductor tipo n), y otro dopado con un material con menor cantidad de electrones en la banda de valencia que el semiconductor (semiconductor tipo p). Al juntar ambos semiconductores se forma una juntura p-n, generando una barrera en la cual cerca de la juntura existirán cargas positivas en el lado n y cargas negativas en el lado p. Esto se puede ver en la Figura 2.12.

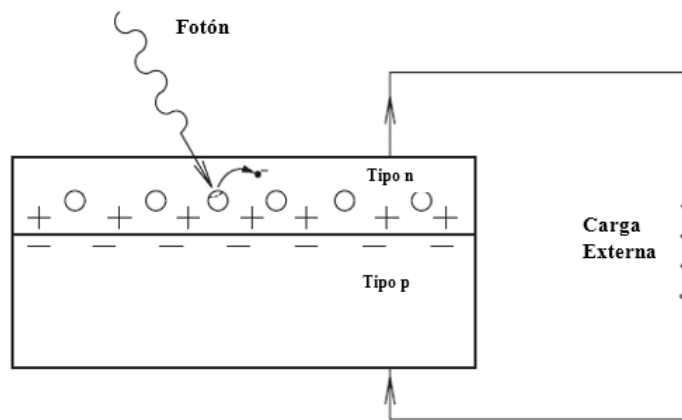


Figura 2.12: Esquemático de un dispositivo fotovoltaico.
Fuente:[27]

Cuando un fotón de luz es absorbido por el electrón de valencia del semiconductor la energía de este electrón aumenta. Cuando esta energía es mayor que la energía de banda de gap del semiconductor entonces el electrón saltará desde la banda de valencia a la banda de conducción, moviéndose libremente. Luego, estos electrones se podrán mover por el circuito externo, recombinándose con las cargas positivas o huecos existentes en el semiconductor tipo p.

Cabe destacar que un fotón solo puede excitar a un solo electrón en la banda de valencia del semiconductor, motivo por el cual las celdas fotovoltaicas poseen una baja eficiencia en la conversión de la energía solar.

La Tabla 2.2 muestra la energía de banda de Gap para distintos dispositivos semiconductores. De la tabla se desprende que, para celdas de silicio, ningún fotón con longitud de onda por sobre los $1.12 \mu\text{m}$ producirá corriente. Sin embargo, se tendrá una eficiencia del 100 % con una fuente lumínica que solo emita fotones de esa longitud de onda.

Tabla 2.2: Energía de banda de gap para distintos semiconductores.

Material	Energía de banda de Gap (eV)
Si	1.11
SiC	2.60
CdAs ₂	1.00
CdTe	1.44
CdSe	1.74
CdS	2.42
CdSnO ₄	2.90
GaAs	1.40
GaP	2.24

Fuente: Adaptado de [27].

Con esto, la eficiencia general de una celda solar se obtiene integrando la eficiencia espectral para todas las longitudes de onda, o sea:

$$\eta = \frac{\int \eta_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{\int I_{\lambda} d\lambda} \quad (2.19)$$

Donde:

I_{λ} = Irradiancia monocromática de longitud de onda λ .

η_{λ} = Eficiencia de haz monocromático de longitud de onda λ .

Con esto, William Shockley y Hans Queisser [28] graficaron las máximas eficiencias teóricas para distintas celdas fotovoltaicas bajo condiciones STC (Standard test condition), y que corresponde a masa atmosférica AM 1.5, irradiancia global horizontal igual a 1000 W/m² y temperatura de celda de 25 °C. Lo anterior se encuentra graficado en la Figura 2.13.

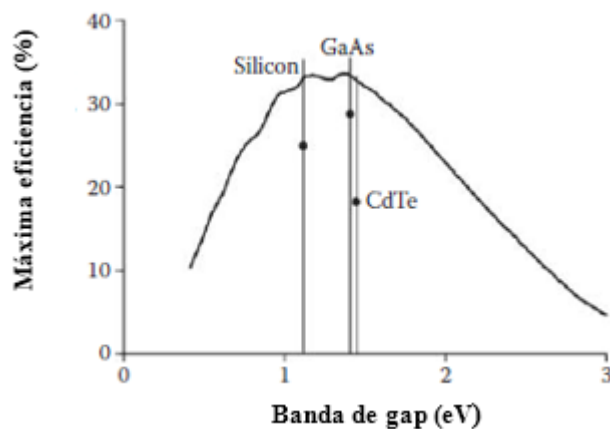


Figura 2.13: Eficiencia máxima teórica de un semiconductor.

Fuente: Adaptado de [27]

Para describir el voltaje y el flujo de electrones por la celda, se tiene la Figura 2.14, en donde se muestra una curva típica I-V de una celda fotovoltaica, en la cual se puede ver el voltaje y la corriente para distintos puntos de operación. De acá se tienen dos puntos en que no se tiene potencia eléctrica, la corriente de corto circuito (I_{sc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), junto a un punto en que se obtiene la máxima potencia eléctrica y que se define por el voltaje de máxima potencia (V_{mp}) y la corriente de máxima potencia (I_{mp}).

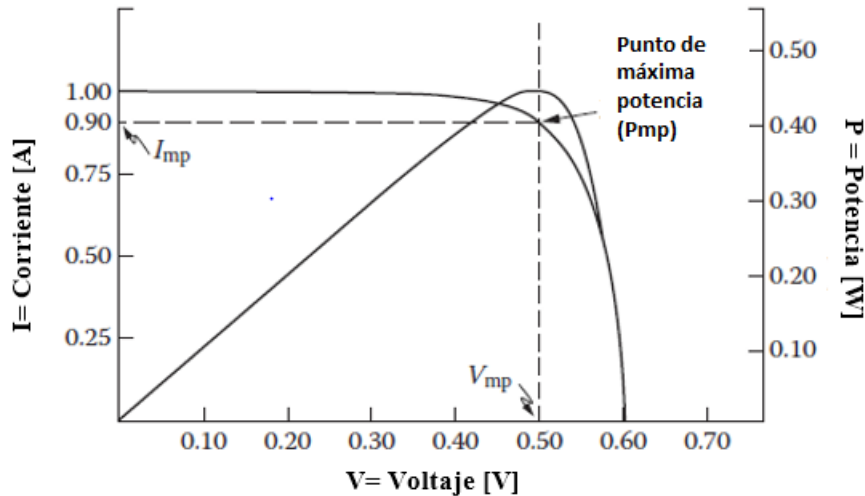


Figura 2.14: Curva I-V característica de una celda solar.
Fuente: Adaptado de [27]

Esta curva puede variar por dos factores, la temperatura de la celda y la radiación incidente. La temperatura de la celda tiene un efecto en el voltaje de salida de la celda, disminuyendo a medida que aumenta la temperatura, mientras que la radiación incidente aumenta la corriente o el flujo de electrones. Lo anterior se puede ver en la Figura 2.15. Caso contrario ocurre al disminuir la radiación (disminuye el flujo de electrones y por ende la corriente de salida de la celda) y al disminuir la temperatura (aumenta el voltaje de salida de la celda).

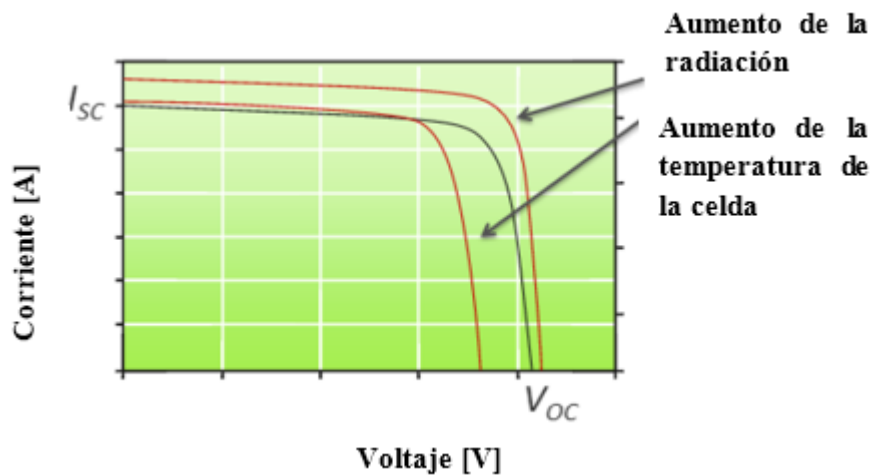


Figura 2.15: Efecto de la temperatura y la radiación en la curva I-V de un dispositivo fotovoltaico.

Fuente: Adaptado de [29]

Con esto, la potencia máxima de la celda para una determinada temperatura y radiación se escribe como:

$$P_{mp} = I_{mp}V_{mp} \quad (2.20)$$

Por último, para determinar la generación teórica de una celda fotovoltaica en condiciones ideales, se utiliza la Ecuación 2.21, la cual relaciona la irradiancia en el plano de la celda, junto con la potencia y irradiancia incidente para condiciones STC.

$$EN_{DC} = P_{STC} \cdot \frac{GHI_{POA}}{GHI_{STC}} \quad (2.21)$$

2.3.2. Tipos de celdas fotovoltaicas

Actualmente se tienen varios tipos de celdas fotovoltaicas, las cuales se diferencian por el tipo de semiconductor utilizado y por el proceso de manufactura.

Los tipos de celdas fotovoltaicas más utilizadas y aquellas que están en auge son:

- **Celdas de Silicio:** Estas se dividen principalmente en 3 tipos.
 - **Celdas monocristalinas de silicio (m-Si):** Son aquellas en que el silicio se encuentra en un solo plano cristalino, sin bordes de grano y casi sin imperfecciones. Son las celdas en base a silicio más costosas de producir, pero también son aquellas con mayor eficiencia. Su apariencia es lisa y sin tonalidades, debido a que el silicio se encuentra en un solo plano cristalino. Junto con esto su vida útil es mayor, ya que al tener menos imperfecciones se tiene menor recombinación.
 - **Celdas policristalinas de silicio (p-Si):** A diferencia de las celdas monocristalinas, las celdas policristalinas poseen en su estructura distintos planos cristalinos, con varios bordes de grano, lo que entrega una serie de propiedades anisotrópicas. Esto se debe a su manufactura, debido a que el silicio es fundido en un solo bloque. Posee menor vida útil y rendimiento, pero por su proceso de manufactura son más económicas que las celdas monocristalinas. Su apariencia no es lisa, con manchas provocadas por los distintos planos cristalinos del material. Su rango de respuesta espectral es muy similar a las celdas monocristalinas, con peaks en las zonas cercanas al infrarrojo.
 - **Celdas amorfas de silicio (a-Si):** Estas son las celdas con peores eficiencias dentro de las tecnologías convencionales, pero las más económicas de producir. Se producen por vapor-deposición de capas de silicio en vidrio o metal, generando una estructura cristalina desordenada, similar al vidrio. La ventaja que tienen estas celdas es que compiten económicamente con las celdas mono y policristalinas, junto con que se pueden producir celdas de distintos tamaños y formas. Su respuesta espectral es mas acotada, con un máximo cercano al espectro visible (Ver Figura 2.17).

- Celdas multi-junction:** Las celdas convencionales de silicio poseen solo una juntura p-n, por lo que la eficiencia esta limitada a un rango de longitudes de onda del espectro solar. Al juntar varias celdas con distintas junturas p-n uno logra aumentar la eficiencia de la celda ya que se aumenta el rango de longitudes de onda en que un fotón logra excitar al semiconductor (Figura 2.18). Este tipo de celda se llaman multi-junction o de multiples junturas. Poseen eficiencias en laboratorio por sobre el 43 %, muy por encima de los 23 % de las celdas convencionales de silicio. Estas celdas funcionan generalmente por concentración mediante un dispositivo óptico que concentra la radiación solar en la celda fotovoltaica (Figura 2.19). Generalmente estas celdas se instalan en lugares con cielos despejados o en donde la radiación difusa no es considerable. Su principal desventaja es que su manufactura es muy costosa, por lo que aun no pueden competir económicamente con las celdas de silicio convencionales.

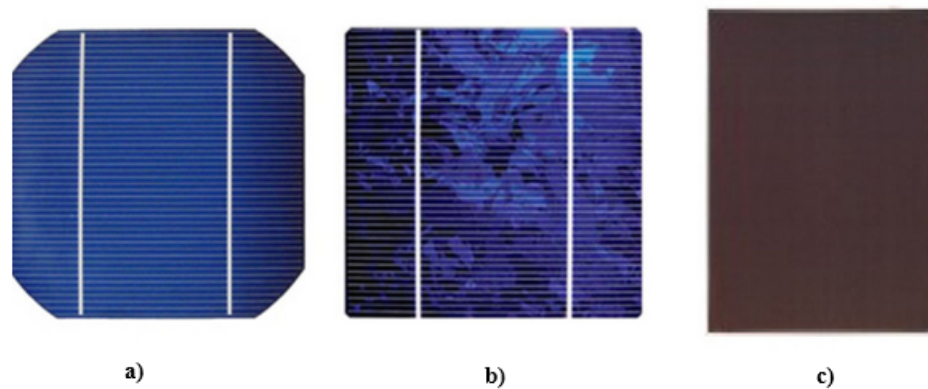


Figura 2.16: Tipos de celdas convencionales en base a silicio. La celda a) corresponde a una celda monocristalina (m-Si), b) a una celda policristalina (p-Si) y c) a una celda amorfa (a-Si).

Fuente: Solar Product Store

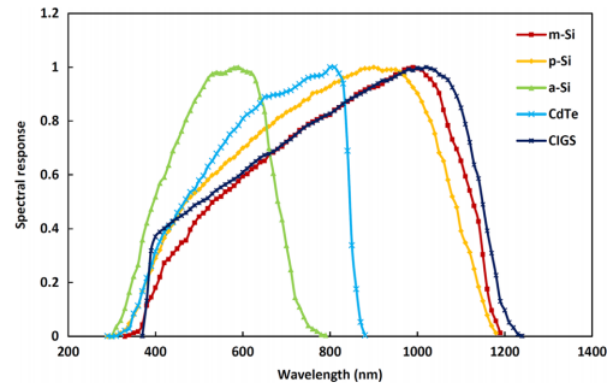


Figura 2.17: Respuesta espectral de distintos tipos de celdas fotovoltaicas convencionales. Fuente: [30]

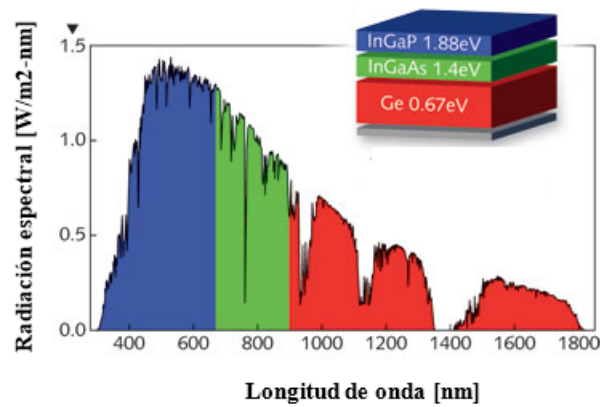


Figura 2.18: Respuesta espectral de una celda multi-junción.
Fuente: Adaptado de Solar Junction.

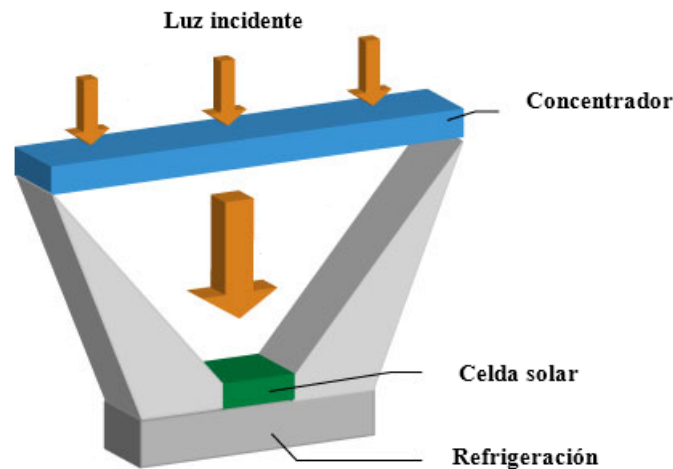


Figura 2.19: Esquema de concentrador solar.
Fuente: Adaptado de Solar Junction.

2.3.3. Efecto de las variables meteorológicas en sistemas fotovoltaicos

En la actualidad las investigaciones no solo buscan que las celdas fotovoltaicas sean capaces de convertir la mayor cantidad de radiación solar en energía útil, sino que también se investiga sobre el efecto que determinadas variables meteorológicas o ambientales generan en la producción fotovoltaica, tales como la temperatura ambiente, la velocidad del viento o la deposición de material particulado en la celda fotovoltaica (Soiling).

La temperatura de la celda por ejemplo es una de las variables más importantes a considerar en un sistema fotovoltaico, la cual depende casi netamente de variables meteorológicas como la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad del viento, debido a que un aumento de la temperatura ambiente y la velocidad del viento generan un aumento de la temperatura de la celda por convección, lo que se suma al intercambio de calor por radiación

que se tiene en los distintos componentes del panel.

Para considerar el efecto que genera la meteorología del lugar en la temperatura de la celda y por ende en la potencia fotovoltaica, se utiliza una corrección, explicada por Dierauf et al.[31], y que se muestra en la Ecuación 2.22.

$$P_{mt}^{corr} = P_{STC} \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \cdot [1 - \delta(T_{promcelda} - T_{celda})] \quad (2.22)$$

Donde :

δ : Coeficiente de temperatura para la potencia [%/°C].

G_{STC} : Irradiancia para condición STC (1000 W/m²).

P_{STC} : Potencia de la celda en condiciones STC [W].

G_{POA} : Irradiancia global en plano inclinado [W/m²].

T_{celda} : Temperatura de la celda [°C].

$T_{promcelda}$: Temperatura de operación de la celda [°C].

Al término $1 - \delta(T_{promcelda} - T_{celda})$ se le conoce como coeficiente de corrección por temperatura. Para calcular la temperatura de la celda se utiliza la Ecuación 2.23, es decir:

$$T_{celda} = T_{mback} + \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \cdot dT \quad (2.23)$$

La temperatura de la parte posterior del módulo (T_{mback}) se puede obtener mediante mediciones con termocuplas acopladas al módulo, o bien, mediante la Ecuación 2.24, que considera la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la radiación incidente en el módulo. El término $G_{POA}/G_{STC} \cdot dT$ corresponde a la transferencia de calor desde la parte posterior del módulo a la celda.

$$T_{mback} = GHI_{POA} \cdot \exp(a + b \cdot WS) + T_a \quad (2.24)$$

Donde:

WS: Velocidad de viento [m/s].

T_a : Temperatura ambiente [°C].

Los coeficientes a, b y dT se pueden obtener del programa SAM del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés), el cual cuenta con una base de datos con distintas celdas fotovoltaicas con sus respectivos coeficientes, o bien, pueden ser obtenidos siguiendo el método descrito por NREL [32].

Por último, la temperatura promedio de la celda $T_{promcelda}$ se calcula mediante la Ecuación 2.25, siendo una media ponderada entre la radiación global en plano inclinado y la temperatura de la celda, es decir:

$$T_{promcelda} = \frac{\sum[GHI_{POAi} \cdot T_{celdai}]}{\sum GHI_{POA}} \quad (2.25)$$

Con esto, se define el coeficiente de performance corregido por meteorología, que se muestra en la Ecuación 2.26, el cual indica que tan eficiente es la planta fotovoltaica para convertir energía solar en energía eléctrica, mostrando las pérdidas generadas por distintas variables como el soiling, pérdidas por la eficiencia del inversor, ensombreamiento, degradación etc.

$$PR_{corr} = \frac{P_{mm}}{P_{mt}^{corr}} \quad (2.26)$$

Donde P_{mm} es la potencia medida del panel [W].

Por otro lado, para paneles de concentración se tiene que la meteorología del lugar es uno de los factores a tomar en cuenta al momento de evaluar la factibilidad técnica de esta tecnología, debido a lo sensible que son estos módulos a los cambios en el espectro generados por el AOD, el vapor de agua, el tamaño de las partículas y la masa óptica [33].

Un modelo simple que incluye el efecto de distintas variables meteorológicas es el modelo de Fernández et al.[34], y que se muestra en la Ecuación 2.27. Este modelo toma como variables de entrada la masa atmosférica, la temperatura de celda y el AOD para así obtener la potencia de un módulo fotovoltaico de concentración.

$$P_m = \frac{P_{stc}}{DNI_{stc}} DNI \cdot (1 - \delta(T_c - T_{stc})) \cdot (1 - \varepsilon(AM - AM_u)) \cdot (1 - \varphi(AOD_{550} - AOD_{550,u})) \quad (2.27)$$

Donde:

P_{stc} : Potencia para condiciones STC [W].

DNI_{stc} : Irradiancia directa normal para condiciones STC (1000 W/m^2).

T_{stc} : Temperatura para condiciones STC ($25 \text{ }^\circ\text{C}$).

T_c : Temperatura de la celda [$^\circ\text{C}$].

AM : Masa atmosférica.

AM_u : Umbral para la masa atmosférica.

AOD_{550} : Espesor óptico a 550nm.

$AOD_{AOD,u}$: Umbral para el espesor óptico de aerosoles a 550nm.

δ : Coeficiente para la temperatura de la celda para condiciones STC [$1/^\circ\text{C}$].

ε : Coeficiente para la masa atmosférica para condiciones STC.

φ : Coeficiente para el espesor óptico para condiciones STC.

El umbral para AOD y AM se debe a que las celdas poseen un comportamiento tal de en determinados rangos la variación de estas dos componentes determina en poca medida la potencia de la celda. Comportamiento que cambia al pasar estos umbrales se tiene que la juntura de la celda en el tope limita la corriente del módulo, lo que reduce el desempeño. Cabe destacar también que el modelo toma en cuenta tanto el cambio de irradiancia debido a los aerosoles como las pérdidas espectrales que un módulo de este tipo experimenta.

El cálculo de la temperatura de la celda se determina mediante la Ecuación 2.28 y toma en cuenta la temperatura del aire, la irradiancia directa normal y la velocidad del viento, modelo muy similar al de las celdas convencionales en base a silicio.

$$T_{celda} = T_{amb} + aDNI + bW_s \quad (2.28)$$

Donde:

T_{amb} : Es la temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$].

W_s : Velocidad del viento [m/s].

Los coeficientes a y b son específicos para cada módulo.

Por último, y debido a que no se cuentan con mediciones de AOD a 550nm, se utilizó la aproximación propuesta por Shettle y Fenn [35], el cual permite obtener el espesor óptico a 550nm mediante el espesor óptico a 380nm y 500nm, considerando una composición de aerosoles de tipo rural. Esto se muestra en la Ecuación 2.29.

$$AOD_{550} = 0,2758 \cdot AOD_{380} + 0,35 \cdot AOD_{500} \quad (2.29)$$

2.3.4. Efecto de los aerosoles en los sistemas de generación solar

El efecto de los aerosoles en los dispositivos fotovoltaicos ha sido estudiado durante años, ya que el rendimiento de estos sistemas depende fuertemente de que tan afectado se ve el recurso solar en su paso por la atmósfera.

Investigaciones realizadas por Wei Tian y Yiping Wang et al. [36], quienes estudiaron el efecto del clima urbano en sistemas fotovoltaicos, mostraron que existe una disminución de la radiación incidente en zonas urbanas en comparación con las zonas rurales, lo que significó una disminución en el voltaje de salida de los sistemas fotovoltaicos.

También se ha investigado el efecto al variar distintas variables atmosféricas [37], mostrando que al aumentar la carga de aerosoles se tiene una disminución de la eficiencia para celdas mono cristalinas, poli cristalinas y amorfas de entre un 4-7 %.

Se ha estudiado el efecto de diversas variables atmosféricas en la eficiencia de la celdas fotovoltaicas mediante el uso del mismatch factor, que da cuenta de las ganancias o pérdidas de eficiencia de las celdas por cambios del espectro radiativo y del espectro de respuesta de las celdas. De estas investigaciones se ha mostrado que una de las variables que mas incide es el espesor óptico de aerosoles [12], debido a la atenuación que generan los aerosoles en las longitudes de onda en donde las celdas fotovoltaicas tienen la mayor respuesta espectral. También investigaciones como la de Fernández et al. [30] han determinado el efecto que diversas variables atmosféricas tienen en las distintas tecnologías fotovoltaicas, sobre todo del efecto del AOD en distintas celdas convencionales en base a silicio en distintas ciudades del mundo.

Para sistemas de concentración fotovoltaica o CPV (por sus siglas en inglés) se generan efectos más notorios, ya que estos sistemas son más dependientes de la radiación directa. En particular, el aumento de aerosoles genera pérdidas de eficiencia debido a la dispersión de la luz y a la mayor atenuación que tiene la DNI [38]. Cabe destacar que estos sistemas aún no se prueban en ambientes urbanos, debido a que los costos de inversión son tan altos que se decide instalar estos en zonas en donde se tengan altos índices de irradiancia directa normal. Sin embargo, es válido estudiar las pérdidas por aerosoles en esta tecnología, ya que en un futuro esta podría ser competitiva frente a las celdas convencionales en base a silicio.

Capítulo 3

Datos y Metodología

El presente estudio se realizó en la ciudad de Santiago, localizada en la latitud 33.5°S y longitud 70.6°W . Los datos obtenidos para el presente trabajo fueron obtenidos por dos estaciones ubicadas en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (altitud 550 m) y el Campus San Joaquín de la Universidad Católica (altitud 577 m). La ubicación de ambas estaciones se puede encontrar en el Anexo A.

A continuación se detallan las características de los datos medidos en cada una de las estaciones:

3.1. Radiación y variables meteorológicas

Los datos de radiación fueron obtenidos de una estación ubicada en el campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile, la cual posee mediciones de radiación directa normal, global horizontal y difusa horizontal en intervalos de 1 min para el periodo comprendido entre 2014-2016. Las mediciones de radiación global horizontal y difusa horizontal fueron realizadas por piranómetros Kipp and Zonen CMP21, las mediciones de radiación directa normal fueron realizadas por un pirheliómetro CHP1 Kipp and Zonen. Todos estos instrumentos poseen una precisión de $\pm 2\text{ W/m}^2$.

La temperatura ambiente y la humedad relativa fueron medidas con un sensor Campbell CS215, el cual tiene una precisión de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ para la temperatura ambiente y de $\pm 2\%$ para un rango de HR de 10-90 % y de $\pm 4\%$ para un rango de HR entre 0-100 %. La velocidad de viento fue medida con un anemómetro ultrasónico Young 85000, a una altitud de 2 metros por sobre la superficie. El instrumento posee una precisión de $\pm 2\%$ para vientos entre 0 y 30 m/s y de $\pm 3\%$ para vientos entre 30 y 70 m/s.

Toda esta data se guardó en un datalogger Campbell Scientific CR1000, siguiendo el estándar para mediciones fotovoltaicas IEC 61724. En el Anexo B se encuentran las series de las distintas variables meteorológicas usadas en el presente trabajo.

Junto con esto, y para estimar la producción mensual y anual de los arreglos, se obtuvieron las horas de sol mensuales para Santiago en el periodo 2014-2015, las que pue-

den ser obtenidas de los anuarios climatológicos de la Dirección Meteorológica de Chile (<http://www.meteochile.gob.cl/>)

3.2. AOD, coeficiente de Ångström y vapor de agua

Para obtener los datos de AOD, el coeficiente de Ångström y el vapor de agua se utilizó un fotómetro automático CIMEL CE-318-4, el cual realiza mediciones en longitudes de onda entre los 340 y 1640 nm. Este instrumento se encuentra ubicado en la azotea del edificio de Ingeniería Civil y Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, con mediciones desde finales del 2013 hasta la fecha y que pueden ser descargadas de la página de AERONET http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/index.html. La data obtenida de este instrumento consiste principalmente en el espesor óptico de aerosoles y el vapor de agua de nivel 2.0, el cual asegura calidad y un filtro de nubosidad. Junto con esto, y para analizar la distribución en el tamaño de los aerosoles, se obtuvo la data para el coeficiente de Ångström entre 440-870 nm. La incerteza de este instrumento varía entre 0.01 y 0.02 para el AOD.

La Figura 3.1 muestra el fotómetro y su ubicación, mientras que en el Anexo B.1 se muestra el espesor óptico de aerosoles en 500nm (AOD500) entre los años 2014-2015, en donde es posible ver que existe una constante presencia de aerosoles en todos los meses del año, con pequeñas variaciones en los meses de invierno. Por otro lado, en el Anexo B.2 se puede observar el vapor de agua entre el periodo 2014-2015, en donde se ve de forma clara la variación estacional de esta producto del aumento de la evaporación generada en la época estival.

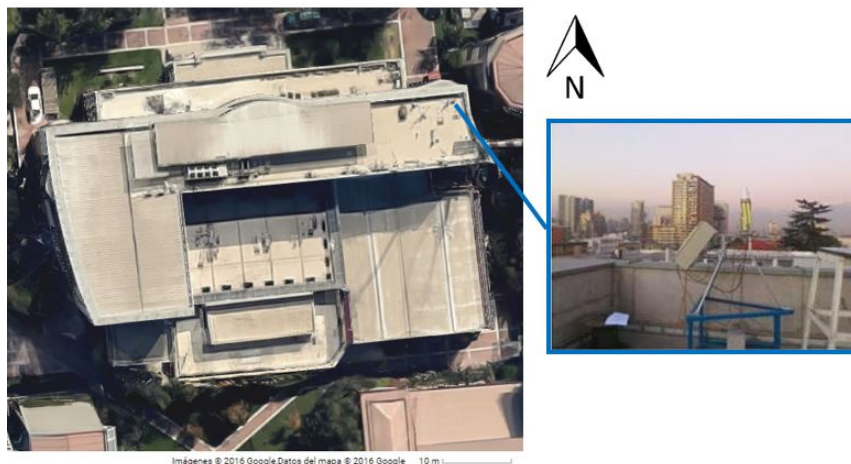


Figura 3.1: Ubicación y foto en la terraza de Geofísica de la Universidad de Chile del fotómetro CIMEL.

Dado que ambos Campus se encuentran separados por alrededor de siete kilómetros, se buscó demostrar primero que en determinados sectores de Santiago y en ciertos rangos horarios el espesor óptico de aerosoles entre ambos sectores es similar.

Con este objetivo, se contruyó la Figura 3.2, la que muestra la concentración promedio diaria de material particulado PM 2.5, obtenida de la página de la red de monitoreo de calidad del aire (<http://sinca.mma.gob.cl/>), para la estación de Parque O'Higgins (cercana al Campus Beauchef) y la estación de La Florida (cercana al Campus San Joaquín), en donde se aprecia que ambas estaciones poseen valores similares en sus concentraciones diarias de material particulado. Luego, para ver las diferencias horarias entre ambas estaciones, se tiene la Figura 3.3, que muestra la diferencia entre las concentraciones de PM2.5 para la estación Parque O'Higgins y La Florida durante el año 2015 a diferentes horas del día, mostrando que la concentración promedio entre ambas estaciones es menor a los $2 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3\text{N}}$ entre las 12PM y las 4PM. Junto a esto se tiene que la circulación de Santiago en horas de la tarde permite que no exista un transporte de aerosoles entre las dos estaciones, debido a la dirección suroeste del frente de vientos en la cuenca de Santiago [39]. Esto significa que las diferencia en la carga de aerosoles entre ambos sectores son pequeñas siempre cuando se tenga un intervalo acotado en donde se controle el transporte de aerosoles, el cual depende fuertemente del viento presente. Con esto, y observando los ciclos diarios del viento en Santiago, se determinó que entre las 11AM y las 3PM el transporte de aerosoles debiese ser mínimo, siendo un intervalo que asegura que el espesor óptico de aerosoles entre ambos sitios difiera levemente.

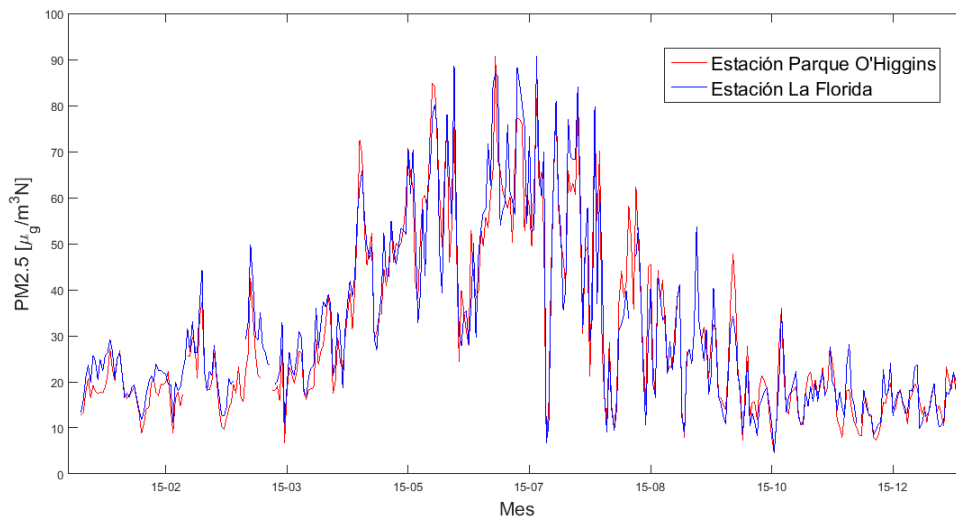


Figura 3.2: Concentración anual de material particulado en Santiago en las estaciones de Parque O'Higgins y La Florida durante los años 2014-2015

Ademas, ambas estaciones se encuentran en una planicie dentro de la cuenca de Santiago, sin grandes hitos geográficos importantes y con una diferencia de altura entre ambos sectores despreciable, por lo que podemos asumir que la capa de mezcla en donde se ubican los aerosoles está por encima de ambos sitios estudiados a lo largo del año, como se muestra en la Figura 2.10.

Como conclusión, y con los datos expuestos anteriormente, se puede decir que analizar los datos entre ambas estaciones no constituye un acto que afecte la confiabilidad de los resultados del presente estudio, y que el error que se podría generar debido a la variación de aerosoles en la columna entre las dos localizaciones puede ser calculada mediante una campaña de medición de espesor óptico en el Campus San Joaquín. Sin embargo, y para dar paso al estudio del efecto radiativo que tienen los aerosoles en la ciudad de Santiago, se

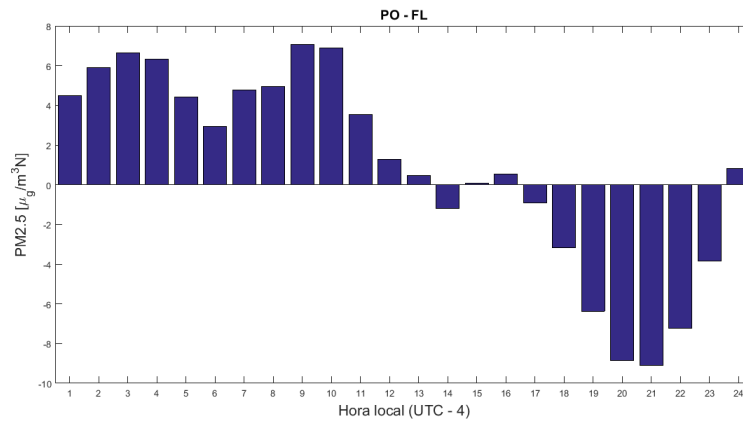


Figura 3.3: Diferencia entre la concentración horaria de material particulado en Santiago entre las estaciones de Parque O'Higgins y La Florida durante el año 2015.

decide simplemente asumir la distancia entre ambas estaciones como una posible fuente de error en los resultados, tomando la precaución de solo considerar los datos entre las 11AM y las 3PM (hora local), para así evitar los periodos en que posiblemente se tenga una gran diferencia de espesor óptico entre ambas estaciones debido al transporte.

3.3. Módulos fotovoltaicos

Los datos de producción fotovoltaica fueron dispuestos por la Pontificia Universidad Católica de Chile, los cuales fueron obtenidos de una serie de arreglos de tipo rack abierto para distintos tipos de celdas fotovoltaicas. Los arreglos poseen una inclinación fija de 32° y un azimut de 350° (azimut con orientación Norte-Este). De esta estación se obtuvieron dos años de datos (2014 y 2015) de producción fotovoltaica de módulos monocristalinos, policristalinos y capa fina de tipo silicio amorfo. En la Figura 3.4 se puede observar la planta fotovoltaica de la Universidad Católica y en la Tabla 3.1 se resume las especificaciones de las tres tecnologías fotovoltaica usadas. El trabajo de Urrejola et al.[26] permite obtener también la degradación de los distintos arreglos, junto al coeficiente de performance corregido durante los años 2014 y 2015.



Figura 3.4: Planta fotovoltaica del Campus San Joaquín de la Universidad Católica.

Tabla 3.1: Especificaciones de las 3 tecnologías fotovoltaicas usadas en el estudio.

Nombre	Tecnología	Número de módulos	Coefficiente de temperatura para la potencia	Potencia total STC [W_p]	Potencia por metro cuadrado [W_p/m^2]
Monocristalina m-Si	Cz-Si	6	-0.44 %/°K	1590	132.5
Policristalina p-Si	mc-Si	6	-0.44 %/°K	1410	117.5
Capa fina a-Si	a-Si/ μ c-Si	12	-0.33 %/°K	1380	57.5

Fuente: Extraído de [26]

Para el caso de la tecnología CPV, se simuló el módulo descrito en el estudio de Fernández et al. [34]. En la Tabla 3.2 se describen las características del módulo, mientras que en la Tabla 3.3 se muestran los distintos coeficientes obtenidos de su estudio.

Tabla 3.2: Características del módulo CPV escogido para simular.

Geometría concéntrica	700
Óptica primaria	Lente Fresnel plano cuadrado SOG
Óptica secundaria	Pirámide truncada reflexiva
Eficiencia óptica	0.8
Tipo de celda solar	GaInP/GaInAs/Ge Lattice-matched
Área de celdas solares	0.763 cm^2
Área aproximada del módulo	1.058 m^2
Número de celdas solares	20
Potencia stc	280 W
Potencia por metro cuadrado	264.6 W/m^2
Refrigeración	Pasiva

Fuente: Adaptado de [34]

Tabla 3.3: Coeficientes térmicos y espectrales para el módulo CPV escogido.

Coefficiente	Valor
a [$^{\circ}\text{C}/\text{Wm}^2$]	0.044
b [$^{\circ}\text{C}/\text{ms}^{-1}$]	-3.41
δ [$1/^{\circ}\text{C}$]	0.0016
ε	0.041
AM_u	2.1
φ	0.32
$AOD_{550,u}$	0.25

Fuente: Adaptado de [34]

3.4. Metodología

El presente trabajo consta de dos ejes centrales, dependientes entre ellos. Por un lado se estudio el efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación y en la fracción de la componente difusa horizontal sobre la componente global horizontal para distintos casos. Luego, y entendiendo el efecto que produce el AOD en el recurso solar, se procedió a estudiar el efecto de los aerosoles en las distintas tecnologías fotovoltaicas. A continuación se explica el modo de trabajo usado:

3.4.1. Radiación y espesor óptico de aerosoles

Para empezar el estudio, se recogieron los datos de radiación solar de las estaciones de San Joaquín y se procedió a completar las series con las fechas faltantes, para posteriormente eliminar los datos que a simple vista se consideraban anómalos, tales como valores por sobre $1400 W/m^2$ para GHI o DNI o valores negativos en horas del día. Posteriormente se hizo pasar la data por un algoritmo para detectar cielos despejados, dejando en la serie solo los datos correspondientes a periodos en que el algoritmo asumía que no había nubosidad presente.

Posterior a esto se normalizaron los datos por E_o (Ecuación 2.1) para aislar el efecto debido a la órbita terrestre y se graficaron las distintas componentes de la radiación solar y la fracción de DHI sobre GHI versus el espesor óptico de aerosoles, junto con los ajustes mostrados en las Ecuaciones 2.15, 2.16 y 2.17 para dos casos, uno ignorando el efecto del vapor de agua y otro asumiendo pequeños intervalos de variación para el vapor de agua.

Para el primer caso se graficó el efecto de los aerosoles en la radiación en todo el rango del vapor de agua en la columna con distintos ángulos cenitales para las tres componentes y para la fracción de DHI sobre GHI. Posterior a esto, y para mostrar el efecto del vapor de agua, se graficó el efecto de los aerosoles en la componente global, pero mostrando el vapor de agua en las distintas mediciones.

Al ver el efecto en el rango completo de vapor de agua se tomaron intervalos para θ_z y w de $\Delta\theta_z = 1^\circ$ y $\Delta w = 0,2$ cm y se procedió a realizar una serie de ajustes en estos intervalos para obtener los distintos coeficientes R_o y R_m . La razón por la cual se escogieron estos valores para los intervalos se debe a que estos aseguraban una buena cantidad de datos para cada ajuste, evitando inconsistencias y valores anómalos para los coeficientes, y aunque la literatura señala que lo ideal es generar intervalos los más pequeños posibles para así modelar de mejor forma los efectos del vapor de agua y el ángulo cenital [21], se prefiere utilizar los rangos descritos para así generar modelos un poco mas consistentes a costa de la precisión de estos.

Luego se ajustaron los distintos parámetros R_o y R_m , en función de θ_z y w en base a una función de potencia, que considera el efecto de ambas variables tal como se muestra en la Ecuación 3.1.

$$R_{o/m}(\theta_z, w) = \cos(\theta_z)^a \cdot (b \cdot w + c) \quad (3.1)$$

Al tener los coeficientes se pudo analizar el efecto de cada variable en las distintas componentes de la radiación solar, sumado a que se pudo calcular el efecto de los aerosoles al compararlo con un caso estimado sin aerosoles, lo cual se realizó mediante el uso de los coeficientes R_o .

Por último, y dado los resultados obtenidos de las distintas parametrizaciones, se procedió a extrapolar los resultados para así abarcar una mayor cantidad de horas. Así, y en base a las parametrizaciones generadas, los datos de AOD, vapor de agua y ángulo cenital, se procedió a estimar las distintas componentes de la radiación solar incidente para un caso con aerosoles y un caso sin aerosoles entre las 10AM y la 4PM en Santiago entre los años 2014 y 2015. Cabe recalcar que estimar en este rango horario implica que la irradiancia obtenida sería la que uno obtendría en la azotea del edificio de Ingeniería Civil y Geofísica (Beauchef). El rango horario usado responde a las horas en que el fotómetro CIMEL realizaba mediciones durante el año, rango que se veía afectado principalmente por los edificios ubicados en las proximidades de la estación.

3.4.2. Producción fotovoltaica y espesor óptico de aerosoles

Para analizar el efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaicas de las distintas tecnologías se procedió primero a detectar anomalías y rellenar las series de tiempo para los tres tipos de celdas fotovoltaicas disponibles. Luego, se calculó la irradiancia global en superficie inclinada mediante la Ecuación 2.5, junto con calcular el coeficiente de corrección por temperatura de la Ecuación 2.22 y el coeficiente de performance mediante la Ecuación 2.26.

Los coeficientes empíricos para la temperatura de la celda corresponden a arreglos de rack abierto de tipo Glass/Cell/Polymer para el caso monocristalino y policristalino y de tipo Glass/Thin film/Steel para capa fina, coeficientes estandar utilizados por NREL en el cálculo de la temperatura de la celda [31]. Luego, se procedió a calcular la temperatura de las celdas junto con la temperatura media de operación de las celdas, la cual fue de 47.9°C para monocristalina y policristalina y de 44.5°C para capa fina .

Posteriormente se calculó la radiación en plano inclinado mediante las Ecuación 2.5 y se normalizó por la distancia media tierra sol, al igual que las demás componentes de la radiación solar. La potencia obtenida también fue normalizada por E_o .

Debido a que los datos obtenidos se utilizaron para una investigación de soiling y degradación de paneles, se buscó aislar estos fenómenos junto a otros como vapor de agua, temperatura excesiva de los módulos, episodios de alta radiación y bajas temperaturas (lo que genera un aumento importante de los coeficientes de performance) y problemas eléctricos de la red. Para esto, se consideraron las pérdidas por degradación calculadas por Urrejola et al [26] junto a dos filtros, uno en base al vapor de agua y otro en base al coeficiente de performance corregido, considerando solo la data dentro del intervalo $\pm 1\%$ de la mediana

del PR_{corr} y ± 0.2 cm para el vapor de agua. Con esto se graficó la potencia obtenida normalizada por el coeficiente de temperaturas de la Ecuación 2.22 versus el espesor óptico de aerosoles para cada tecnología. También se graficó la potencia normalizada versus la fracción de la componente difusa sobre la global en plano inclinado, para analizar el efecto que tenía el aumento de las componentes en la potencia de salida de los módulos.

Dado que la potencia fotovoltaica requiere de más variables para generar una parametrización que permita entender su comportamiento durante los años en que se tiene registro, sumado a que el filtro que se aplica en función del coeficiente de performance disminuye la cantidad de datos por ajuste, se procedió a estimar las pérdidas en la producción fotovoltaica usando la Ecuación 3.2:

$$P_{PV} = PR_{corr} \cdot P_{mt}^{corr} \quad (3.2)$$

Para esto se calculó la irradiancia global en plano inclinado mediante las parametrizaciones obtenidas y la temperatura de la celda, para posteriormente asumir un coeficiente de performance corregido anual, el cual puede variar dependiendo de las condiciones en que el panel podría operar. Junto con esto, se calculó la potencia de los arreglos para el caso en que no hubiesen aerosoles, usando los coeficientes R_o en el cálculo de la componente global en plano inclinado y para la temperatura de las celdas.

Al ver los distintos resultados y para abarcar un mayor rango horario, se decidió también extrapolar los distintos resultados obtenidos, generando series para la potencia fotovoltaica entre las 10AM y las 4PM hora local.

Luego, para la producción fotovoltaica se calculó la potencia promedio mensual de los paneles durante las horas de estudio para una condición media de operación determinada, generando un filtro en base a los coeficiente de performance corregidos calculados por Urrejola et al. [26] para las tres tecnologías, para posteriormente promediar mes a mes la potencia obtenida de los tres tipos de arreglos. Con estos mismos coeficientes se calculó también la potencia estimada de los módulos y la potencia en el caso de que no hubiesen aerosoles. Posterior a esto se calculó el porcentaje de horas con cielos despejados mensuales mediante los datos de la Dirección Meteorológica de Chile y las horas de sol mensuales promedio teóricas para Santiago y que se muestran en el Anexo C.

Luego, se procedió a estimar la producción fotovoltaica para cielos despejados en Santiago tanto para el caso medido, el caso calculado con aerosoles y para el caso calculado sin aerosoles en Santiago, multiplicando la potencia PV mensual promedio en el periodo de estudio por la cantidad de horas en cada mes y por el porcentaje de horas con cielos despejados, es decir:

$$E_{PVmi} = P_{PVmi} \cdot h_{est} \cdot D_{mi} \cdot \%HCD_i \quad (3.3)$$

Donde:

$E_{PV_{mi}}$: Producción fotovoltaica del mes i [Wh].

$P_{PV_{mensual}}$: Potencia fotovoltaica media mensual del mes i [W].

h_{est} : Horas consideradas en el rango de estudio.

D_{mi} : Días del mes i .

$\%HCD_i$: Porcentaje de horas con cielos despejados para el mes i .

Por último, y para evaluar el caso de celdas de concentración o de múltiples junturas, se procedió a usar el modelo de Fernández et al. [33], utilizando los coeficientes del módulo y la meteorología de Santiago. Para evaluar el efecto de los aerosoles en la producción del módulo se usaron las parametrizaciones para estimar la potencia del panel en Santiago en ausencia de aerosoles y así compararla con lo obtenido en las condiciones actuales. Posterior a esto se procedió a calcular la producción del módulo en base a la Ecuación 3.3.

Para dar cuenta de la cantidad de datos que el presente estudio posee, en el Anexo D se muestra el número de mediciones por mes que se tiene tanto de radiación, potencia de las distintas tecnologías y la data obtenida de AERONET y que cumplen con el criterio de cielos despejados. Toda la data fue interpolada a un minuto, para así desechar los intervalos en que el algoritmo de días despejados mostraba nubosidad y también para generar homogeneidad en los intervalos de las distintas mediciones usadas en el estudio.

Resumiendo lo anterior, en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se muestra la metodología utilizada para calcular el efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación solar, en la producción fotovoltaicas con celdas convencionales y en la producción fotovoltaica simulada de un módulo CPV.

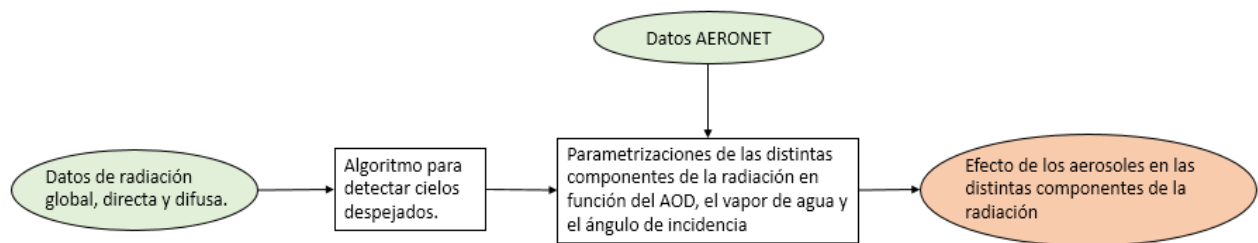


Figura 3.5: Metodología utilizada para estudiar el efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación solar.

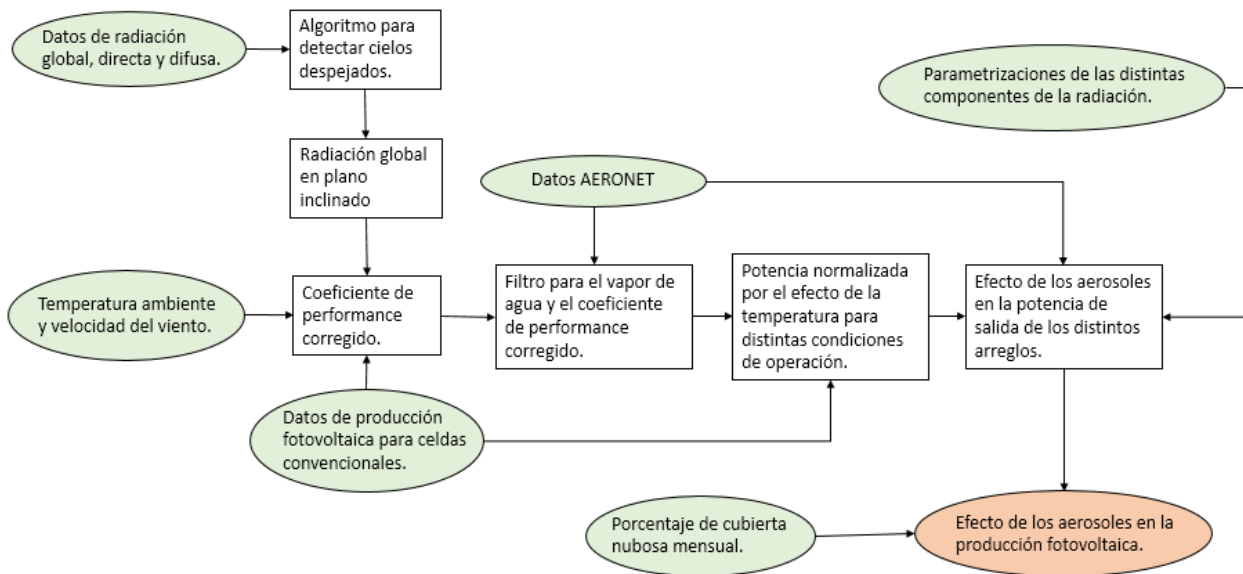


Figura 3.6: Metodología utilizada para estudiar el efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica de celdas convencionales.

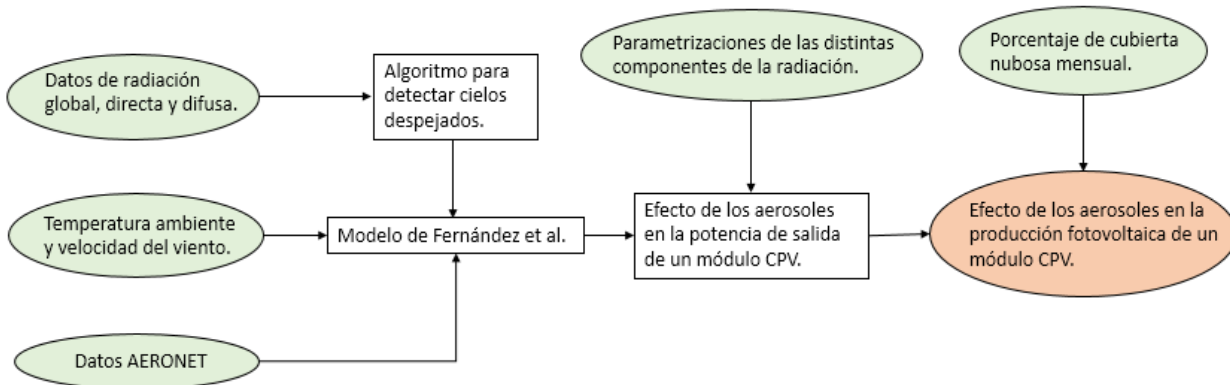


Figura 3.7: Metodología utilizada para estudiar el efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica simulada de módulo CPV.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación

Primero, se evaluó el efecto de los aerosoles sin considerar el efecto del vapor de agua en la columna. Para esto se graficó el efecto de los aerosoles en las tres componentes de la radiación junto con la fracción de DHI sobre GHI en nueve ángulos cenitales distintos. Esto se muestra en las Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.

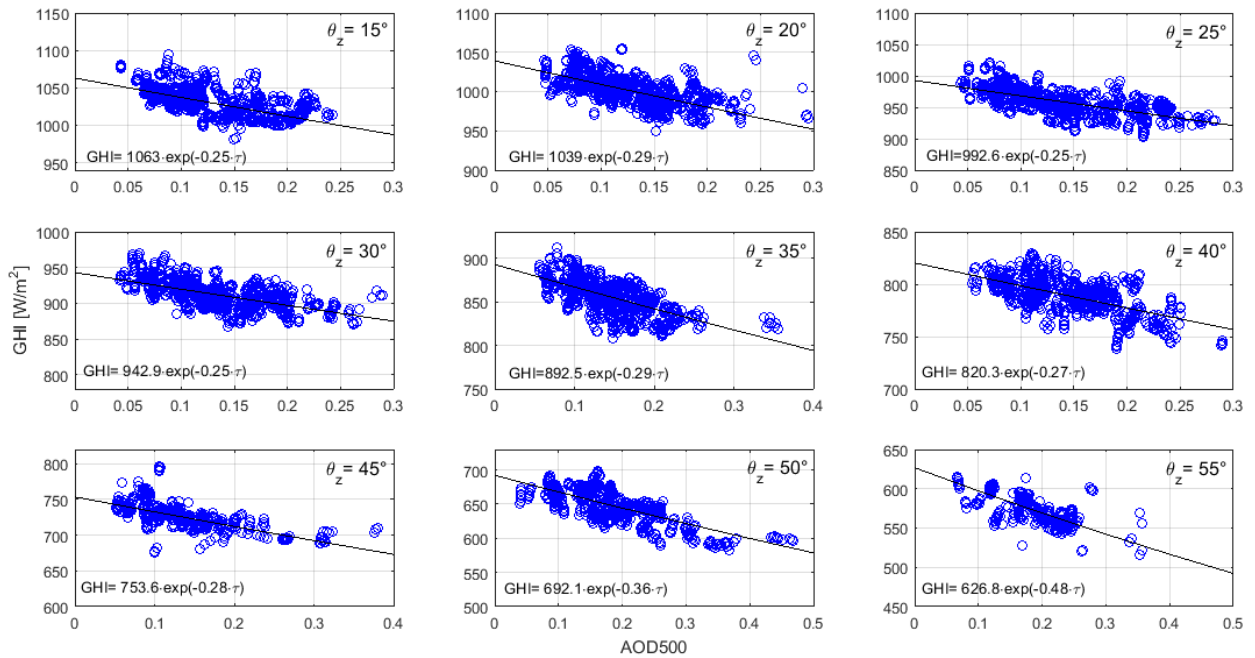


Figura 4.1: AOD versus irradiancia global horizontal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos. La línea negra representa el ajuste $GHI = GHI_o \cdot \exp(GHI_m \cdot \tau)$.

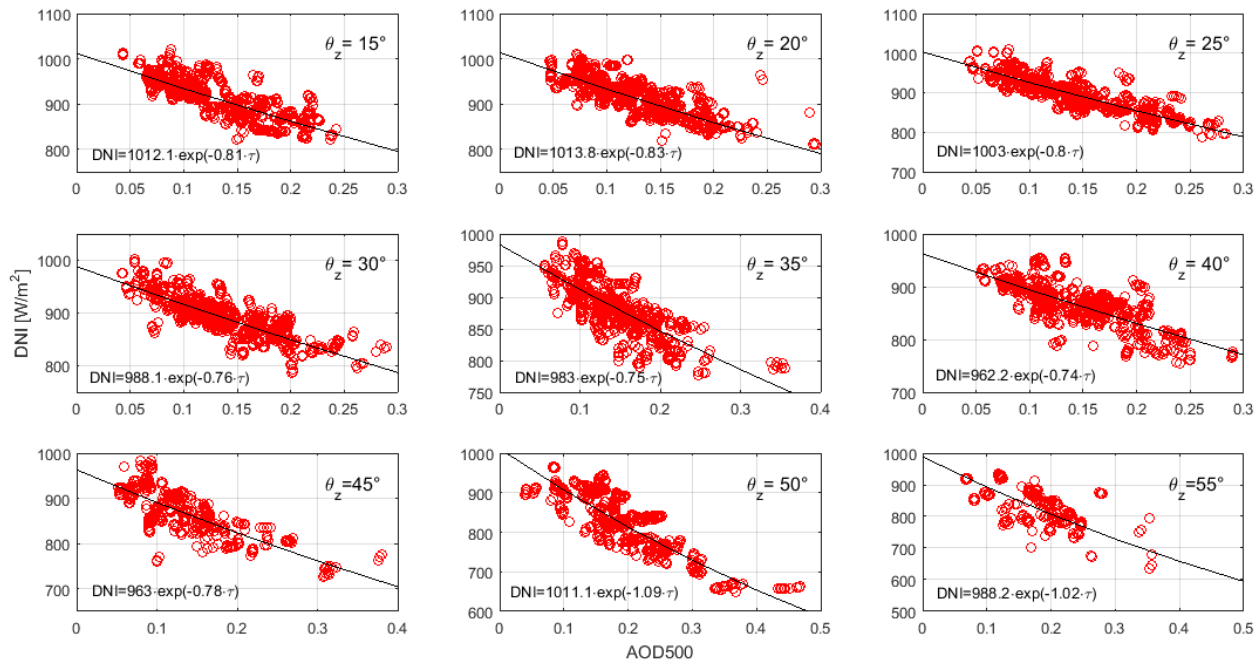


Figura 4.2: AOD versus irradiancia directa normal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos. La línea negra representa el ajuste $DNI = DNI_o \cdot \exp(DNI_m \cdot \tau)$.

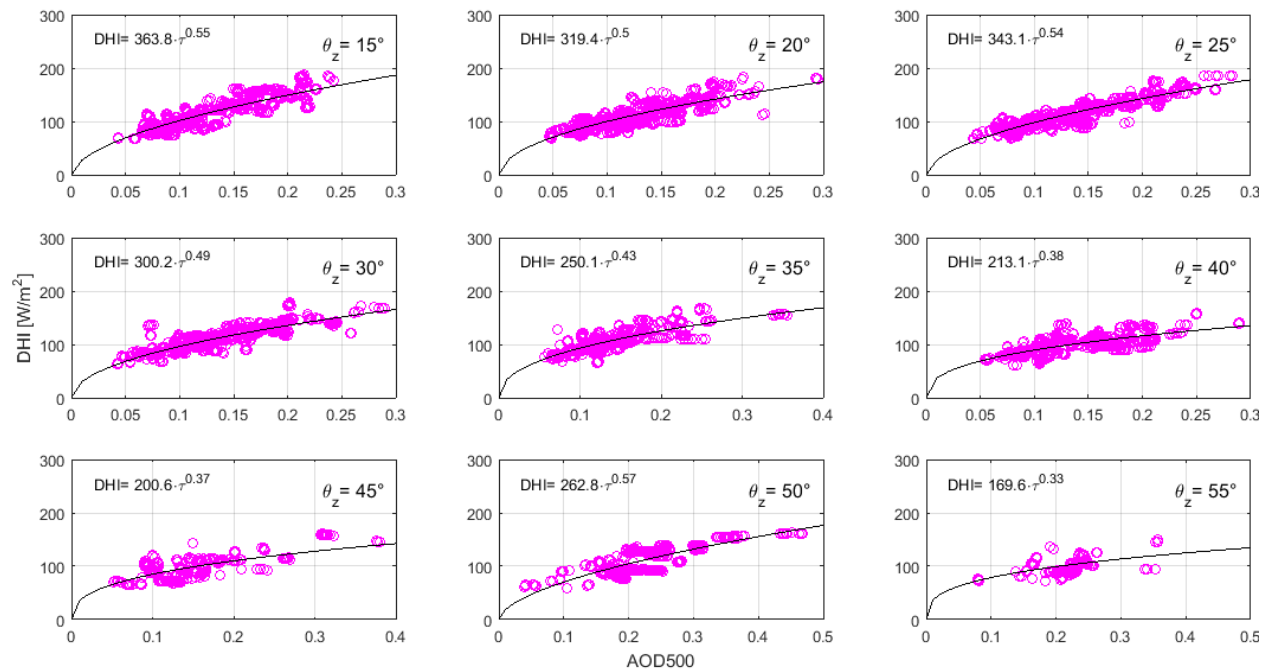


Figura 4.3: AOD versus irradiancia difusa horizontal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos. La línea negra representa el ajuste $DHI = DHI_o \cdot \tau^{DHI_m}$.

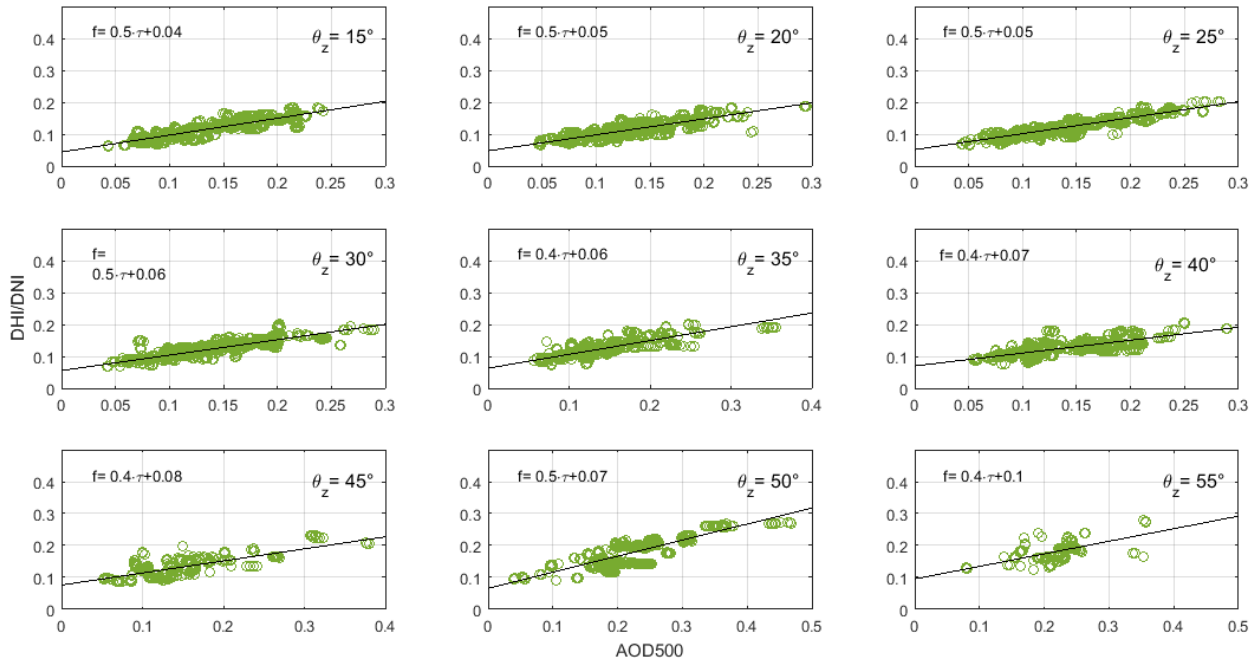


Figura 4.4: AOD versus fracción de la componente difusa horizontal sobre la componente global horizontal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos. La línea negra representa el ajuste $f = f_m \cdot \tau + f_o$.

De la Figura 4.1 se puede ver el efecto del espesor óptico de aerosoles en la componente global horizontal, mostrando que al aumentar el AOD se tiene una disminución de la GHI. Esta disminución está fuertemente relacionada con el ángulo cenital, aumentando el efecto de los aerosoles a medida que aumenta este.

Con respecto a la componente directa normal, al ver la Figura 4.2 se observa efecto similar al obtenido con la componente global horizontal pero con un efecto más marcado y notorio. Esto significa que una unidad de AOD tiene un mayor efecto en la componente directa normal que en la componente global horizontal. Además, viendo las pendientes de los ajustes en los distintos ángulos se puede ver que al aumentar el ángulo cenital se tiene un aumento del efecto de los aerosoles, debido a que la radiación tiene que atravesar una mayor masa óptica.

Por último, en la Figura 4.3 se observa el efecto de los aerosoles en la componente difusa horizontal, mostrando el claro rol dispersivo que tienen los aerosoles en la radiación solar incidente, aumentando la componente difusa a medida que aumentan los aerosoles en la columna de aire.

De la Figura 4.4 se puede observar la fracción de la componente difusa horizontal sobre la componente global horizontal versus el AOD, en donde se observa que un aumento de los aerosoles genera un aumento de esta fracción, dando indicios de que los aerosoles presentes en la ciudad generan una mayor dispersión de la radiación que absorción, lo que se relaciona con aerosoles de tipo urbano y polvo [3].

Cabe destacar que a diferencia del estudio de Xia et al.[40], en este estudio no se tienen pendientes consistentes a medida que aumenta el ángulo cenital. La causa de esto se debe principalmente a que los resultados expuestos consideran un amplio rango de vapor de agua

junto a una baja cantidad de datos para determinados ángulos cenitales, lo que generó coeficientes para los ajustes que no se condicen con lo esperado. En general, uno busca que a medida que aumenta el ángulo cenital se tenga una disminución de los coeficientes R_o en todas las componentes, ya que a medida que el ángulo cenital aumenta se tiene también una disminución de la radiación incidente en un caso sin aerosoles, debido al aumento del camino óptico. Para los coeficientes R_m (que describen el cambio de las distintas componentes al variar el AOD) se tiene un comportamiento distinto, ya que al aumentar el ángulo cenital se tiene una mayor masa óptica y por ende un mayor efecto de los aerosoles, lo que se traduce en una disminución de las componentes global horizontal y directa normal, junto a un aumento de la componente difusa horizontal. Esto último significa que los coeficientes GHI_m y DNI_m deben aumentar y el coeficiente DHI_m debe disminuir a medida que aumenta el ángulo cenital.

En el estudio realizado por Xia et al.[40] se muestran resultados muy similares a los presentados en el presente estudio, pero con diferencias generadas principalmente por la metodología aplicada y el uso de un modelo de transferencia radiativa (SBDART específicamente), lo que ayudó a normalizar los datos para las distintas componentes en función del vapor de agua.

Luego, para dar cuenta del efecto del vapor de agua en la radiación solar incidente se muestra la Figura 4.5, en donde se presentan nueve gráficos de dispersión para distintos ángulos cenitales. La barra de colores indica la cantidad de agua en la columna de medición y la línea negra muestra su ajuste respecto a la Ecuación 2.15.

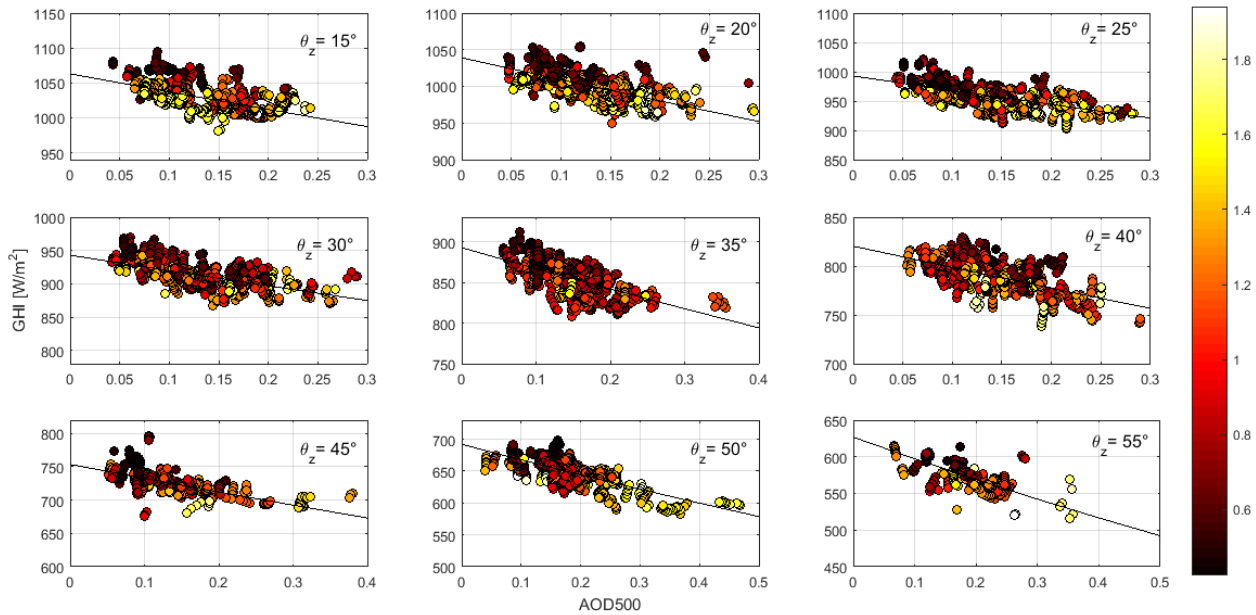


Figura 4.5: AOD versus GHI en Santiago para nueve ángulos cenitales. La línea negra representa el ajuste $GHI = GHI_o \cdot \exp(GHI_m \cdot \tau)$ y la barra de colores representa la cantidad de vapor de agua en la columna en cm.

De la figura anterior, se observa que la cantidad de vapor de agua en la columna explica la diferencia entre los valores medidos y el ajuste propuesto, en donde los datos con mayor cantidad de vapor de agua se ubican en la zona inferior de los ajustes y viceversa. Esta figura también explica las pendientes poco consistentes de los ajustes al tomar todo el rango de vapor de agua para la componente global horizontal, mostrando que en algunos ángulos cenitales la pendiente se determina en base a la cantidad de vapor de agua media y a la concentración de datos y no en base al efecto del AOD. Este mismo análisis se aplica a la componente directa normal y difusa horizontal.

Dado estos resultados, se realizaron una serie de ajustes en las componentes global horizontal, directa normal y difusa horizontal en intervalos de $\Delta 1^\circ$ para θ_z y de $\Delta 0,2$ cm para w . Esto generó parametrizaciones en función del AOD, θ_z y w . Para cada parametrización calculada se expone su ecuación, sus coeficientes según la Ecuación 3.1 con su error estándar y la comparación entre los datos medidos y los obtenidos con las parametrizaciones.

4.1.1. Parametrización para la irradiación global horizontal

Para la irradiación global horizontal se tiene que la parametrización se calcula en base a la Ecuación 2.15, es decir:

$$GHI = GHI_o \cdot \exp(GHI_m \cdot AOD_{500})$$

Donde:

$$GHI_{o/m}(\theta_z, w) = \cos(\theta_z)^a \cdot (b \cdot w + c)$$

Las Tablas 4.1 y 4.2 muestran los coeficientes a, b y c que se utilizan para calcular la irradiación global horizontal. Por último, en la Figura 4.6 se comparan los datos medidos y los obtenidos con la parametrización.

Tabla 4.1: Coeficientes para calcular GHI_o

GHI_o	
a	1.12 ± 0.007
b	-32.9 ± 2.47
c	1152 ± 3

Tabla 4.2: Coeficientes para calcular GHI_m

GHI_m	
a	1.087 ± 0.154
b	0.02 ± 0.016
c	-0.259 ± 0.026

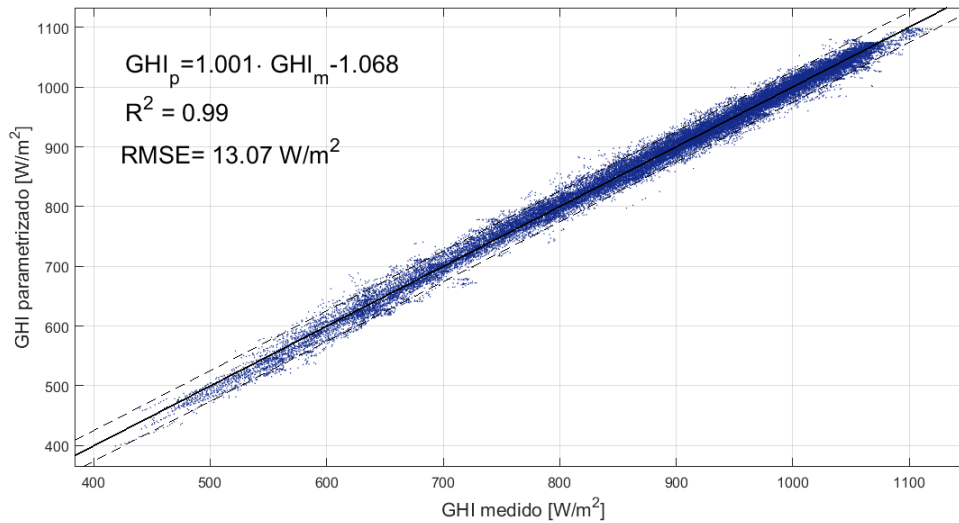


Figura 4.6: Datos medidos de irradiancia global horizontal versus datos obtenidos mediante la parametrización. Las líneas segmentadas corresponden a un intervalo de confianza del ajuste de un 95 %.

4.1.2. Parametrización para la irradiancia directa normal

La irradiancia directa normal se calcula en base a la Ecuación 2.16, es decir:

$$DNI = DNI_o \cdot \exp(DNI_m \cdot AOD_{500})$$

Donde:

$$DNI_{o/m}(\theta_z, w) = \cos(\theta_z)^a \cdot (b \cdot w + c)$$

Las Tablas 4.3 y 4.4 entregan los distintos coeficientes a, b y c para calcular la irradiancia directa normal. Por último en la Figura 4.7 se comparan los datos medidos con los obtenidos mediante la parametrización.

Tabla 4.3: Coeficientes para calcular DNI_o

DNI_o	
a	0.1686 ± 0.011
b	-25.43 ± 4.16
c	1044 ± 6

Tabla 4.4: Coeficientes para calcular DNI_m

DNI_m	
a	0.577 ± 0.078
b	-0.113 ± 0.02
c	-0.527 ± 0.03

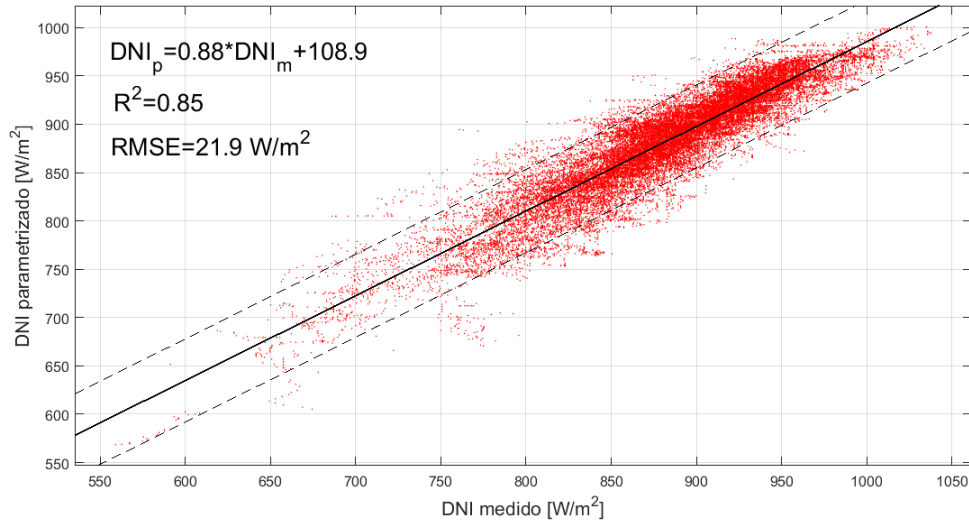


Figura 4.7: Datos medidos de irradiancia directa normal versus datos obtenidos mediante la parametrización. Las líneas segmentadas corresponden a un intervalo de confianza del ajuste de un 95 %.

4.1.3. Parametrización para la irradiancia difusa horizontal

Se utiliza la Ecuación 4.3 para calcular la irradiancia global horizontal, es decir:

$$DHI = DHI_o \cdot AOD_{500}^{DHI_m}$$

Donde :

$$DHI_{o/m}(\theta_z, w) = \cos(\theta_z)^a \cdot (b \cdot w + c)$$

De las Tablas 4.5 y 4.6 se pueden obtener los coeficientes para calcular la irradiancia difusa horizontal. Junto con esto, en la Figura 4.8 se muestran los datos medidos y los obtenidos mediante la parametrización.

Tabla 4.5: Coeficientes para calcular DHI_o

DHI_o	
a	0.2619 ± 0.063
b	148.1 ± 0.009
c	102.8 ± 0.014

Tabla 4.6: Coeficientes para calcular DHI_m

DHI_m	
a	-0.4585 ± 0.13
b	0.1841 ± 12.7
c	0.2 ± 15.89

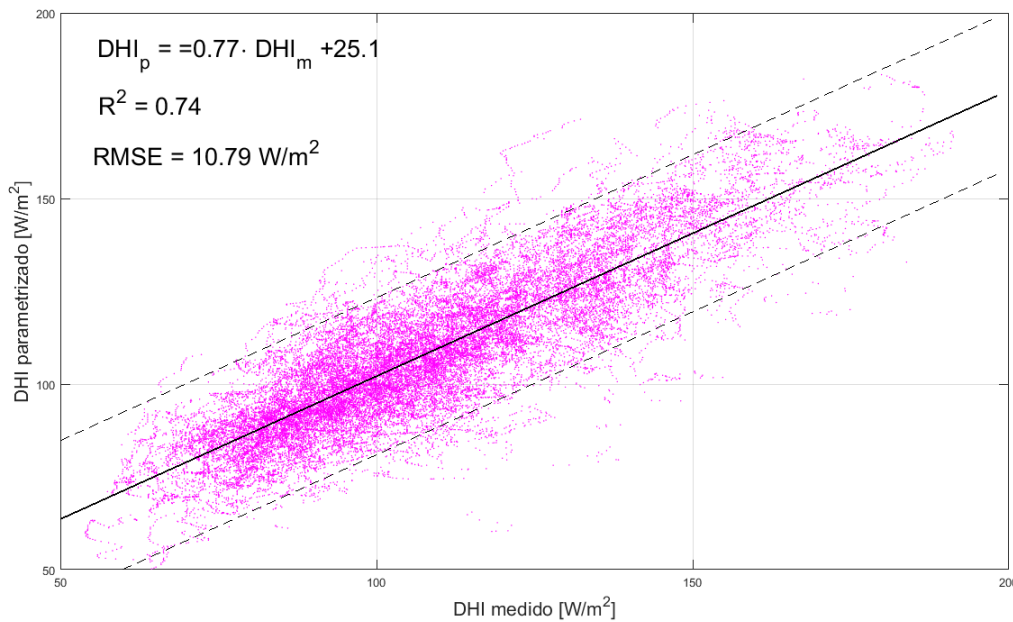


Figura 4.8: Datos medidos de irradiancia difusa horizontal versus datos obtenidos mediante la parametrización. Las líneas segmentadas corresponden a un intervalo de confianza del ajuste de un 95 %.

Para la componente global horizontal se generó una de las parametrizaciones con menor RMSE y mejor ajuste con los datos medidos. Se tiene que la diferencia entre los distintos modelos que se encuentran en la literatura es mínima, llegando a una diferencia de 0.57 W/m^2 entre el calculado en el presente trabajo y el obtenido por el modelo de Xia et al. [21], el cual fue obtenido con un método muy similar al realizado en este estudio, pero con una mayor cantidad de datos, intervalos mas acotados y una estación de medición que sigue la norma de la BSRN (Baseline Surface Radiation Network), lo que significa también un menor error en sus instrumentos de medición. Junto con esto se tiene el efecto que podría generar la posible diferencia de espesor óptico entre las dos estaciones, y que podría generar una sub estimación o sobre estimación de la radiación solar incidente.

Para la componente directa normal y difusa horizontal se generaron modelos similares, con la diferencia que los ajuste muestran una mayor variabilidad que el obtenido con la componente global horizontal, y que puede deberse a que la GHI tiene una dependencia más fuerte del ángulo cenital, lo que puede ayudar a absorber errores debido a las distintas variables que no se consideraron en el presente estudio, tales como tamaño de aerosoles, ozono, gases atmosféricos y la composición de aerosoles.

Sin embargo, y como se muestra en el histograma de residuos en el Anexo E, se ve que la diferencia entre los datos medidos y los obtenidos de las tres parametrizaciones no sobrepasa los 50 W/m^2 para GHI y DNI y 20 W/m^2 para DHI, junto con una gran cantidad de datos con residuos cercanos a cero, indicando un error acotado entre las mediciones y los datos obtenidos.

Con el objetivo de evaluar la confiabilidad de las distintas parametrizaciones se tiene la Figura 4.9, en donde se presentan las parametrizaciones generadas y los datos obtenidos para las tres componentes en cinco ángulos cenitales distintos con vapor de agua igual a 1 cm. De acá se aprecia el buen ajuste que se logra con la componente global horizontal y directa normal, con pequeñas variaciones de AOD y vapor de agua al aumentar el ángulo cenital. Sin embargo, la componente difusa horizontal muestra un comportamiento más variable, y que puede deberse a lo sensible que esta variable frente a las variaciones en la columna de aire. Una solución a esto sería usar la metodología propuesta por Xia et al. [40] y normalizar los datos de radiación incidente con datos generados mediante modelos como SOLIS o SBDART, con el fin de poder aislar el efecto del vapor de agua y así disminuir la variabilidad de los ajustes.

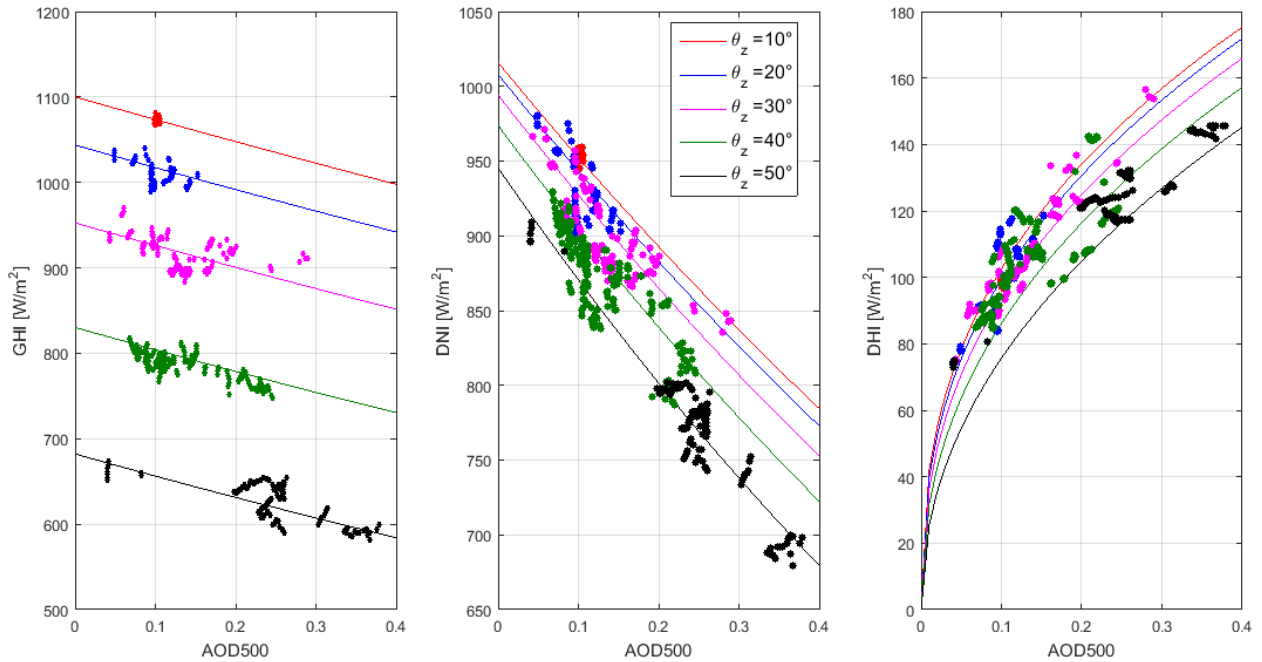


Figura 4.9: Componentes de la radiación solar versus AOD para cinco ángulos cenitales distintos, con vapor de agua constante e igual a 1 cm. Las curvas son generadas con las parametrizaciones y los datos marcados corresponden a mediciones. En a) la irradiancia global horizontal (GHI), en b) la irradiancia normal directa (DNI) y en c) la irradiancia difusa horizontal (DHI).

Luego, en la Figura 4.10 se muestran los promedios mensuales para la irradiancia medida en San Joaquín, la obtenida mediante las parametrizaciones y una estimada para un caso sin aerosoles para las tres componentes entre las 11AM y las 3PM hora local en Santiago durante los años 2015-2015. De acá se puede ver la escasa diferencia entre la irradiancia medida y la obtenida mediante las parametrizaciones para la componente global horizontal y directa normal, mostrando una ligera diferencia en el mes de Agosto, el cual se puede deber principalmente a los escasos datos que se tienen en ese mes tanto de AOD como de radiación que cumpliera con el criterio de cielo despejado, junto con la gran variabilidad que existe en el espesor óptico de aerosoles en ese mes y que se puede ver en la Figura 4.12, en donde se observa que la mediana para el AOD en este mes está muy por debajo del promedio calculado,

indicando la existencia de muchos días con bajos niveles de AOD junto a episodios puntuales críticos de contaminación. Esto último puede deberse a que Agosto del 2014 y 2015 fueron meses con frecuentes episodios de precipitación, y que puede verse en el trabajo de Urrejola et al [26]. Esto generó una limpieza constante del aire en la cuenca de Santiago, lo que generó bajos niveles de AOD, los cuales iban aumentando en el transcurso de los días debido a las bajas temperaturas y el aumento de la subsidencia luego de las lluvias.

Por otro lado, se tiene que las diferencias para la componente difusa horizontal entre los datos medidos y lo obtenidos mediante la parametrización son bajas en la época estival pero con ligeras diferencias en la época de invierno, mostrando que la parametrización subestima la DHI en ese periodo, y que puede deberse a que el modelo no logra caracterizar bien la irradiancia difusa horizontal a medida que aumenta el ángulo de incidencia. Otra razón de esto puede ser la altura de la capa limite en Santiago, la que podría afectar la forma en que la radiación se dispersa a medida que esta disminuye en altura.

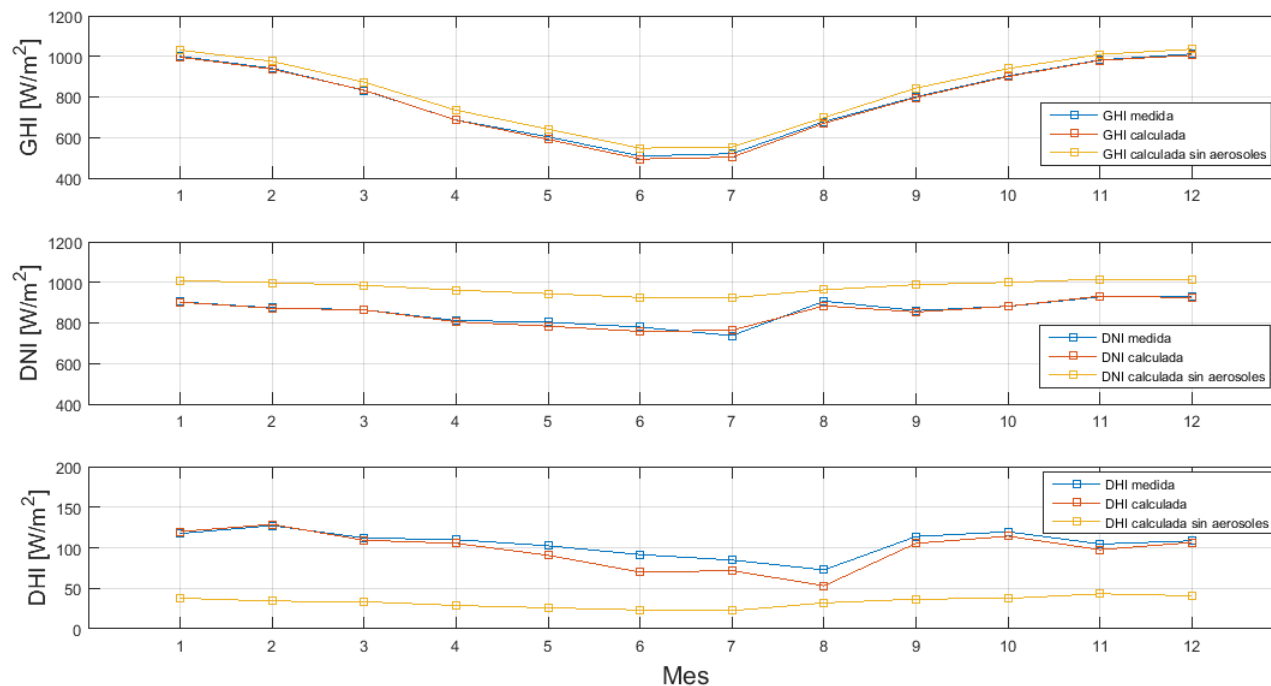


Figura 4.10: Medias mensuales de la radiación obtenida, la radiación parametrizada y la radiación en un caso sin aerosoles para las tres componentes para cielos despejados entre las 11AM y las 3PM en Santiago durante los años 2014 y 2015.

Luego, y con ayuda de las parametrizaciones se tiene la Figura 4.11, en donde se muestran distintos gráficos de caja para las fracciones entre la radiación solar incidente medida y la radiación solar incidente estimada para el caso en que no hubiesen aerosoles en Santiago para las tres componentes. De la figura es posible observar la disminución de la componente global horizontal y directa normal a medida que aumenta el espesor óptico de aerosoles (ver Figura 4.12), el cual llega a un mínimo entre los meses de Mayo y Junio, periodo en donde se tiene también la menor altura de capa de mezcla (según la Figura 2.10), lo que es un comportamiento esperado. De la misma figura se aprecia que la presencia de aerosoles puede generar una disminución de hasta 15 % en la componente global horizontal y de hasta 30 %

en la componente directa normal (considerando un rango horario entre las 11AM y las 3PM hora local).

La componente difusa horizontal por otro lado muestra un incremento a medida que el AOD aumenta, con un máximo entre los meses de Mayo y Junio. Junto con esto se tiene también un aumento de la componente difusa por sobre la global durante el año, indicando que los aerosoles presentes en Santiago dispersan mas radiación de la que absorben, comportamiento típico de aerosoles urbanos y polvo ([20], [40]). Sin embargo, el cociente para la componente difusa horizontal entre el caso medido y el estimado sin aerosoles es elevado en comparación a otros estudios encontrados [14] y que puede deberse por una parte a la subestimación de la componente difusa para el caso sin aerosoles, lo que genera grandes cocientes entre la componente difusa medida y la estimada. Aun así, se obtienen valores razonables y dentro de los márgenes para todas las componentes estudiadas.

Sumado a lo anterior se tiene que el cociente entre partículas finas y gruesas aumenta a lo largo del año, lo que se puede ver en la Figura 4.13. De acá es posible observar que el coeficiente de Ångström tiene una fuerte componente estacional y que puede deberse por un lado a que el vapor de agua fomenta la coagulación [3], incrementando el tamaño de los aerosoles presentes, por lo que a menor cantidad de agua presente en la columna se tienen aerosoles de menor tamaño y por ende un mayor coeficiente de Ångström. Este hecho también podría ser la causa del aumento de difusa con el AOD en Santiago, debido a que las partículas finas (aquellas con mayores coeficiente de Ångström) son más eficientes en la dispersión de la luz que las partículas gruesas [5].

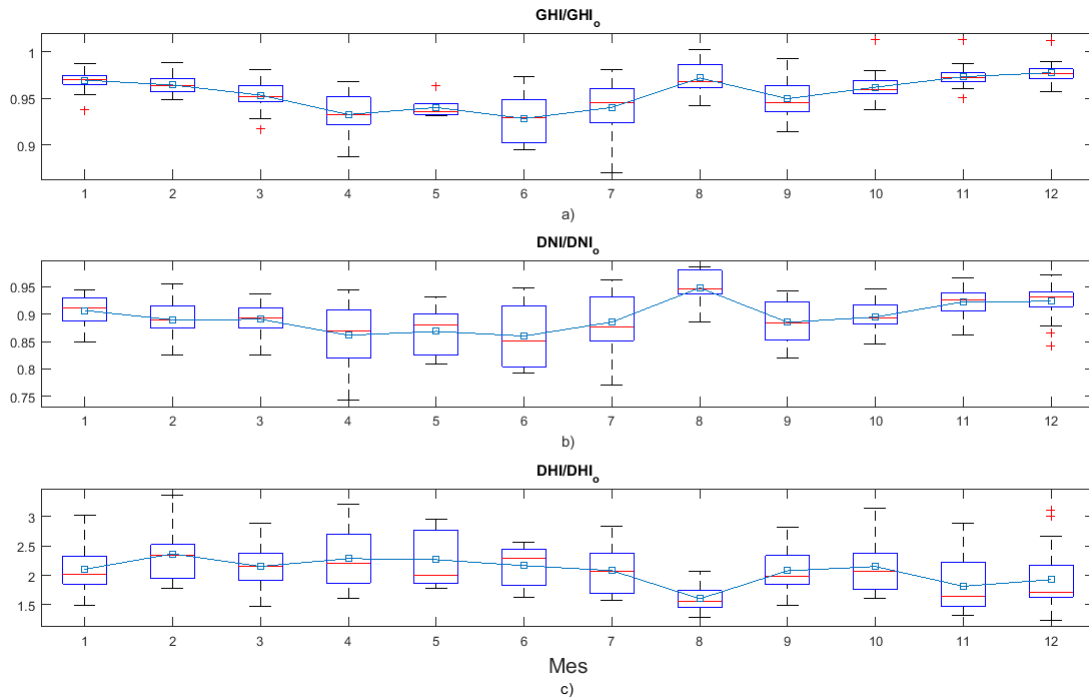


Figura 4.11: Medias mensuales para la fracción entre la irradiancia medida y la estimada para un caso sin aerosoles para a) la componente global, b) la componente directa y c) la componente difusa en Santiago entre las 11AM y las 3PM, bajo condición de cielo despejado durante los años 2014-2015.

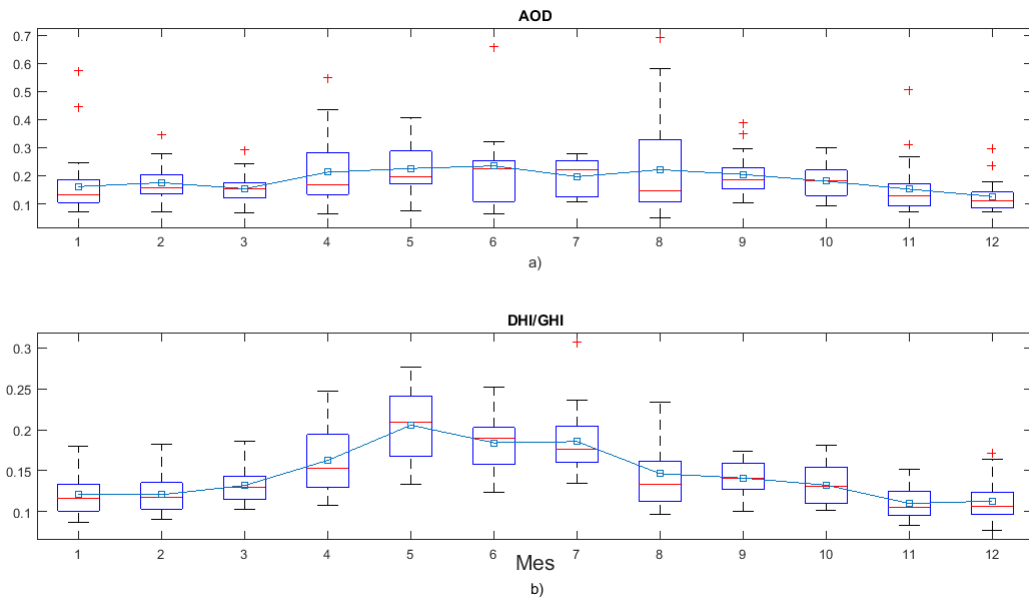


Figura 4.12: Medias mensuales de a) AOD500 y b) Fracción de componente difusa horizontal sobre la componente global horizontal en Santiago entre las 11AM y las 3PM, bajo condición de cielo despejado entre los años 2014-2015.

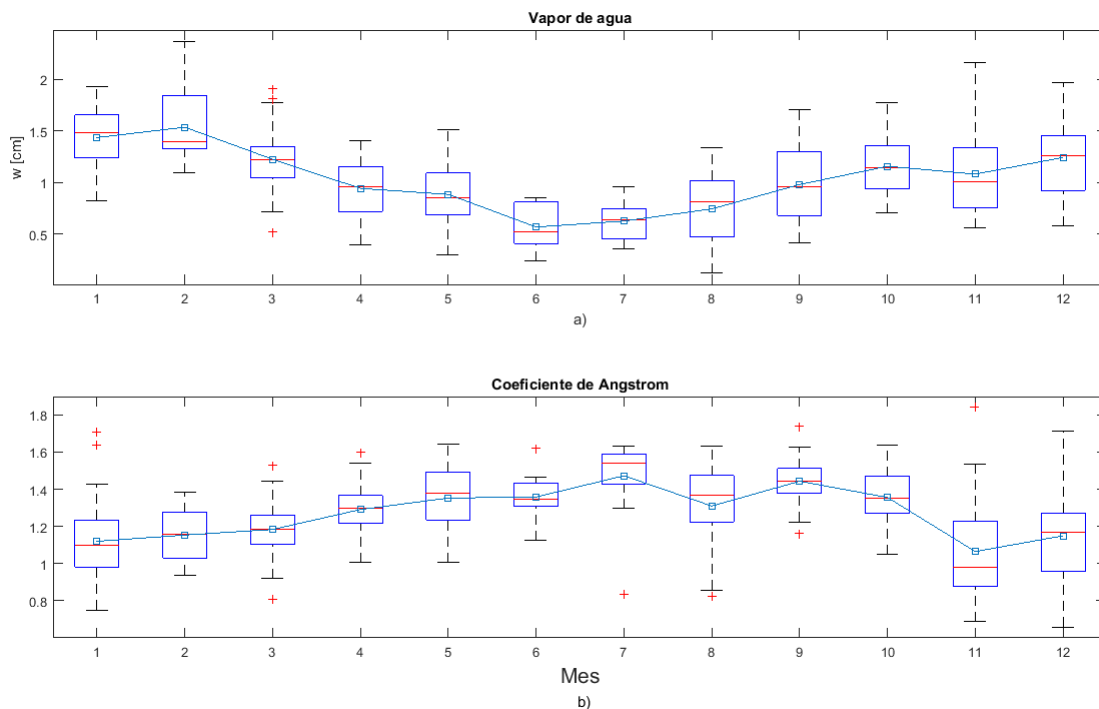


Figura 4.13: Medias mensuales de a) vapor de agua y b) coeficiente de Ångström en Santiago entre las 11AM y las 3PM durante los años 2014-2015.

Otra razón de la estacionalidad que tiene el coeficiente de Ångström puede deberse al tipo de fuentes contaminantes presente en la cuenca de Santiago y su contribución mensual, debido a que durante el invierno se tiene un aumento de fuentes que emiten partículas finas,

como la quema de biomasa para calefacción [41].

Por otro lado, se observa que en todos los gráficos existe un aumento de la variabilidad en la época de invierno con respecto a la época de verano y que se debe principalmente al aumento de precipitaciones en esta época, limpiando el aire en la cuenca de Santiago y disminuyendo los niveles de AOD.

En el Anexo F se presenta la irradiancia mensual y anual promedio bajo condición de cielo despejado para todas las componentes y la fracción entre la componente difusa horizontal y global horizontal, tanto para los datos medidos en San Joaquín como para el caso estimado en que no se tienen aerosoles en un rango horario comprendido entre las 11AM y 3PM hora local. De acá se puede ver el efecto estacional de los aerosoles en la radiación incidente en sus distintas componente, mostrando una diferencia anual de -4.2% para GHI, -12.4% para DNI y un aumento del 220% para DHI. Junto con esto se puede ver que los aerosoles generan un aumento de la componente difusa en relación a la componente global de un 240% , mostrando que los aerosoles presentes en la ciudad de Santiago generan una alta dispersión de la radiación y una baja absorción de esta.

Luego, y dado que la diferencia entre las mediciones y los resultados obtenidos con las parametrizaciones son mínimas (Ver Figura 4.10), se procedió a extrapolar los datos para abarcar una mayor cantidad de horas de estudio, calculando las distintas componentes de la radiación solar entre las 10AM y las 4PM hora local. En la Figura 4.14 se observa la irradiancia promedio mensual calculada para las tres componentes de la radiación incidente (GHI, DNI y DHI) con la carga de aerosoles en Santiago en los años de estudio y un caso en que no hubiesen aerosoles. De acá se aprecia nuevamente la leve diferencia de la componente global horizontal entre ambos casos y las diferencias estacionales en las componentes directa normal y difusa horizontal, en donde se observa una disminución de la DNI para la época de invierno de una magnitud similar al aumento que tiene la DHI.

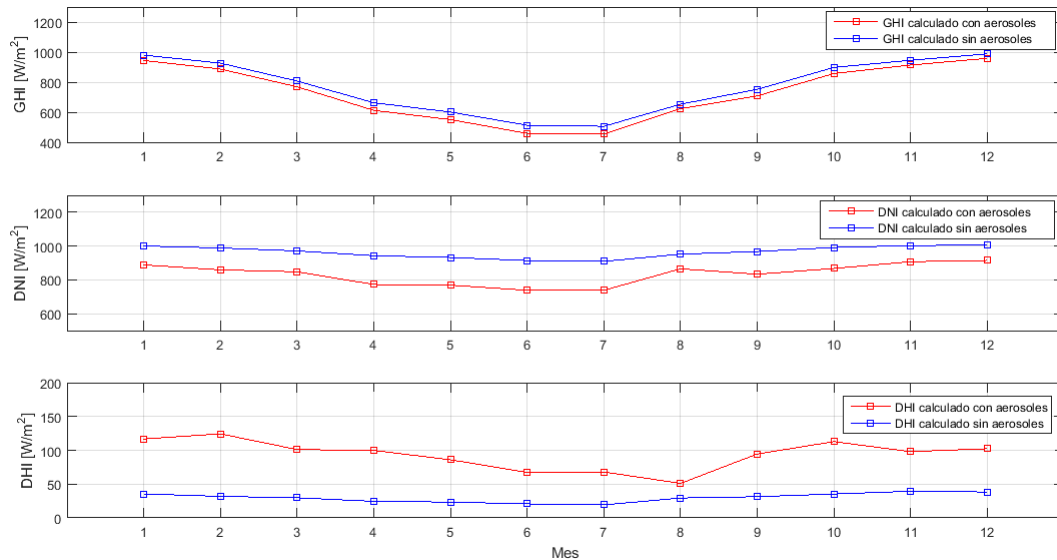


Figura 4.14: Irradiancia mensual promedio calculada para un caso con aerosoles y un caso sin aerosoles para las tres componentes entre las 10AM y las 4PM, bajo condición de cielo despejado en Santiago durante los años 2014 y 2015.

Por último, en la Tabla 4.7 es posible observar el efecto que tienen los aerosoles en las distintas componentes durante el año, mostrando una mayor diferencia entre el caso medido en San Joaquín y el extrapolado en el nuevo rango horario, y que puede deberse al aumento de material particulado que se tiene en horas de la mañana y la tarde en Santiago [42]. De acá se puede ver una diferencia porcentual entre la irradiancia calculada con aerosoles y sin aerosoles de -5.4 % para la componente global horizontal, de -13.6 % para la componente directa normal, un aumento de la componente difusa horizontal de 212 %, junto con un aumento de la fracción entre la componente difusa horizontal sobre la global horizontal de 239 %.

Tabla 4.7: Irradiancia promedio mensual y anual bajo condición de cielo despejado para GHI, DNI y DHI, junto a la fracción de la componente difusa horizontal sobre la global horizontal, entre las 10AM y 4PM hora local en Santiago para un caso calculado con aerosoles y un caso sin aerosoles entre los años 2014-2015.

GHI				DNI			
Mes	Calculado c/Aerosoles [W/m ²]	Calculado s/Aerosoles [W/m ²]	Diferencia %	Mes	Calculado c/Aerosoles [W/m ²]	Calculado s/Aerosoles [W/m ²]	Diferencia %
Enero	944	980	-3,7 %	Enero	889	1000	-11,2 %
Febrero	887	926	-4,3 %	Febrero	859	989	-13,1 %
Marzo	769	807	-4,7 %	Marzo	848	971	-12,7 %
Abril	612	663	-7,7 %	Abril	773	943	-18,0 %
Mayo	551	601	-8,4 %	Mayo	769	932	-17,6 %
Junio	459	513	-10,6 %	Junio	738	914	-19,2 %
Julio	455	506	-10,1 %	Julio	738	909	-18,8 %
Agosto	624	653	-4,5 %	Agosto	865	952	-9,1 %
Septiembre	708	752	-5,9 %	Septiembre	833	968	-13,9 %
Octubre	857	898	-4,5 %	Octubre	868	992	-12,5 %
Noviembre	914	945	-3,4 %	Noviembre	907	1003	-9,5 %
Diciembre	958	988	-3,0 %	Diciembre	915	1006	-9,0 %
Anual	728	769	-5,4 %	Anual	834	965	-13,6 %

DHI				DHI/GHI			
Mes	Calculado c/Aerosoles [W/m ²]	Calculado s/Aerosoles [W/m ²]	Diferencia %	Mes	Calculado c/Aerosoles [W/m ²]	Calculado s/Aerosoles [W/m ²]	Diferencia %
Enero	117	36	229 %	Enero	0,12	0,04	241 %
Febrero	124	32	290 %	Febrero	0,14	0,03	307 %
Marzo	101	30	240 %	Marzo	0,13	0,04	257 %
Abril	100	25	306 %	Abril	0,16	0,04	340 %
Mayo	86	23	267 %	Mayo	0,16	0,04	301 %
Junio	67	21	223 %	Junio	0,15	0,04	262 %
Julio	68	19	252 %	Julio	0,15	0,04	292 %
Agosto	51	29	74 %	Agosto	0,08	0,05	82 %
Septiembre	95	31	201 %	Septiembre	0,13	0,04	220 %
Octubre	113	35	219 %	Octubre	0,13	0,04	234 %
Noviembre	98	39	149 %	Noviembre	0,11	0,04	157 %
Diciembre	102	38	167 %	Diciembre	0,11	0,04	175 %
Anual	94	30	212 %	Anual	0,13	0,04	239 %

4.2. Efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica con tecnologías convencionales.

Para estudiar al efecto que tienen los aerosoles en la producción fotovoltaica se presenta la Figura 4.15, en donde se observa el efecto del AOD en la componente global en plano inclinado, mostrando el mismo efecto que la componente global horizontal pero con un poco mas de variación entre los datos calculados y el ajuste propuesto. Una posible razón para esto, además del efecto del vapor de agua, se puede deber a que el modelo con el que fue calculada la componente global en plano inclinado posee errores en su componente difusa, debido a que el modelo no considera el tamaño de partícula ni el efecto del espesor óptico presente en la columna de aire, y por ende, en un día despejado no puede reconocer si el aumento de fracción de difusa por sobre global (f_k en la Ecuación 2.7) es debido a partículas finas que producen mayor radiación difusa isotrópica, o bien, son partículas de mayor tamaño que producen más radiación difusa proveniente del disco solar. Un caso similar fue estudiado por Xie et al. [43], en donde se da cuenta de la incertidumbre que genera el espesor óptico en modelos isotrópicos, debido a la forma en que los aerosoles dispersan la radiación.

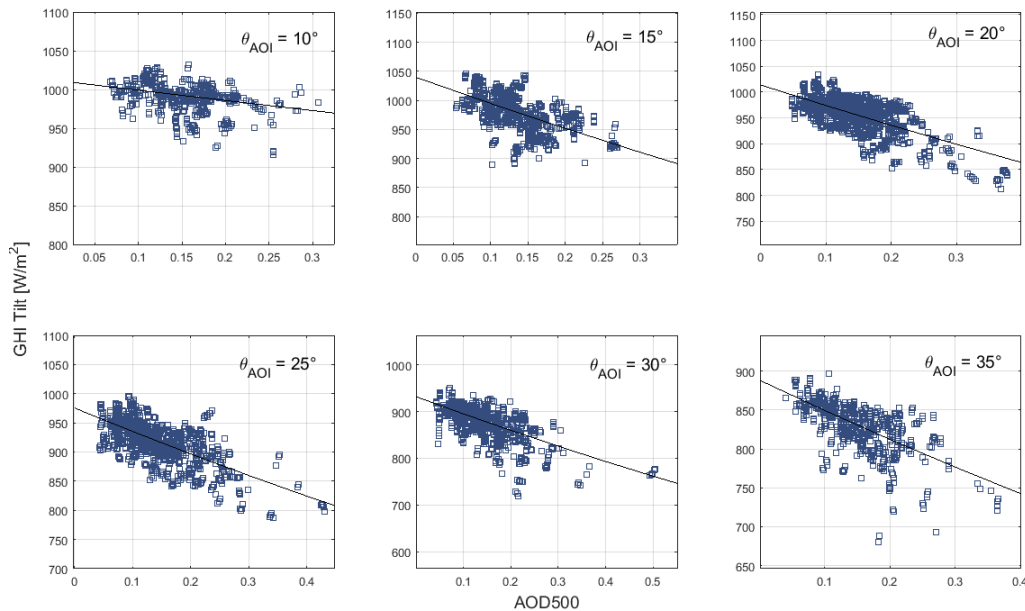


Figura 4.15: Irradiancia global en plano inclinado versus espesor óptico de aerosoles bajo condición de cielo despejado para seis ángulos de incidencia (θ_{AOI}) en Santiago entre los años 2014-2015. Los ajustes mostrados son de tipo exponencial.

Al ver el efecto de los aerosoles en la componente global en plano inclinado, se procedió a evaluar el efecto de los aerosoles en la potencia normalizada por el coeficiente de temperatura en un rango acotado de vapor de agua para las tres tecnologías estudiadas, y que se muestra en la Figura 4.16, en donde se observa que las tres tecnologías muestran tendencia a la baja a medida que aumenta el espesor óptico de aerosoles. Sin embargo, se ve que existe una diferencia importante entre los ajustes y los datos medidos, y que se debe principalmente a las variables que afectan las condiciones de operación de los módulos, como el ensuciamiento del panel o problemas de la red. Para dar cuenta de esto se tiene la Figura 4.17 en donde se

muestra nuevamente los datos ajustados pero con su coeficiente de performance corregido, mostrando que aquellas mediciones con mayor coeficiente se ubican por encima del ajuste y viceversa, indicando que a diferencia de la radiación solar incidente, un panel fotovoltaico depende fuertemente de las variables que afectan su operación. Esto motivó la incorporación de un filtro adicional en base al coeficiente de performance corregido, lo que permitió analizar los datos en base a las condiciones de operación y así aislar de mejor forma el efecto que tienen los aerosoles en las distintas tecnologías.

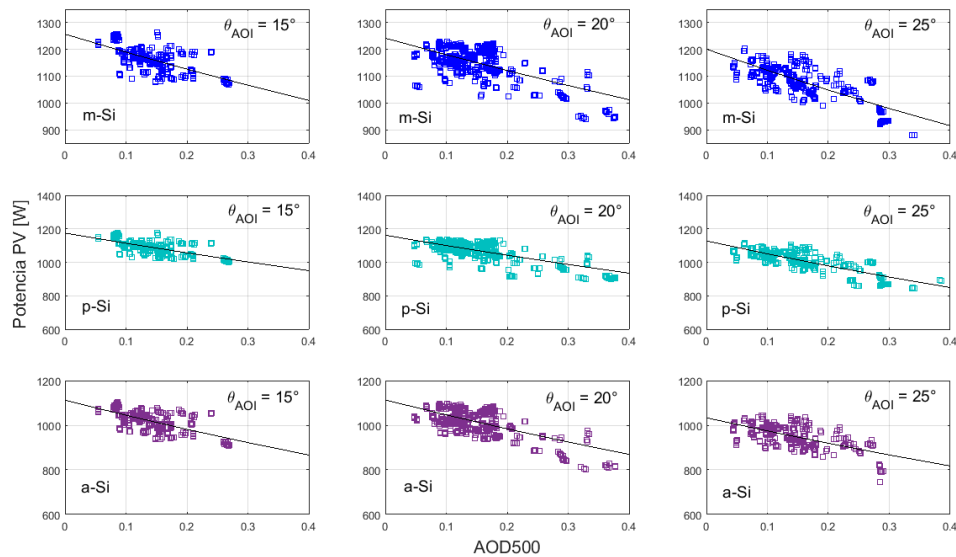


Figura 4.16: Potencia fotovoltaica de las tres tecnologías estudiadas versus espesor óptico de aerosoles para tres ángulos de incidencia en condiciones de cielo despejado. Los ajustes mostrados son de tipo exponencial y los datos fueron filtrados en base al vapor de agua.

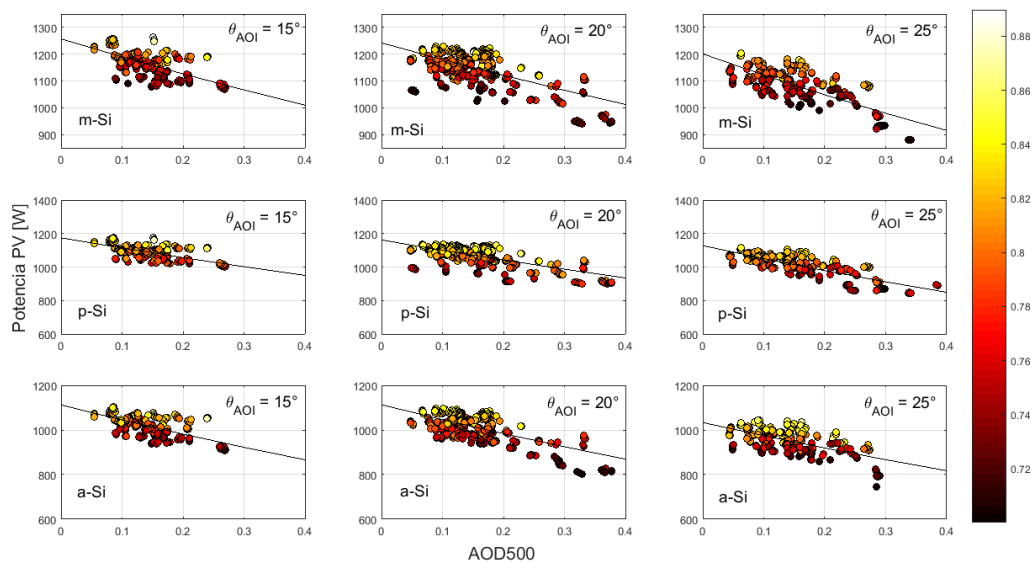


Figura 4.17: Potencia fotovoltaica de las tres tecnologías estudiadas versus AOD bajo condición de cielo despejado para tres ángulos de incidencia. Los ajustes mostrados son de tipo exponencial, los datos fueron filtrados en base al vapor de agua y la barra de colores representa el coeficiente de performance corregido.

Con esto, y para las tres tecnologías, se graficaron solo los datos en un rango determinado para el vapor de agua y para el coeficiente de performance corregido, lo que se puede ver en la Figura 4.18. De acá observa de forma más clara el efecto que tienen los aerosoles en los tres tipos de celdas estudiadas, en donde se puede ver un ligero aumento de la pendiente al aumentar el ángulo de incidencia.

Por otro lado, el efecto del aumento de fracción entre la componentes difusa sobre la global en plano inclinado sobre la potencia de salida de los módulos se puede ver en la Figura 4.19, el cual muestra un comportamiento muy similar al mostrado en la Figura 4.18. Sin embargo no queda claro si es que este efecto es debido al aumento de la componente difusa por sobre la global, o bien, es debido al espesor óptico de aerosoles y su efecto en el espectro de respuesta de las distintas celdas.

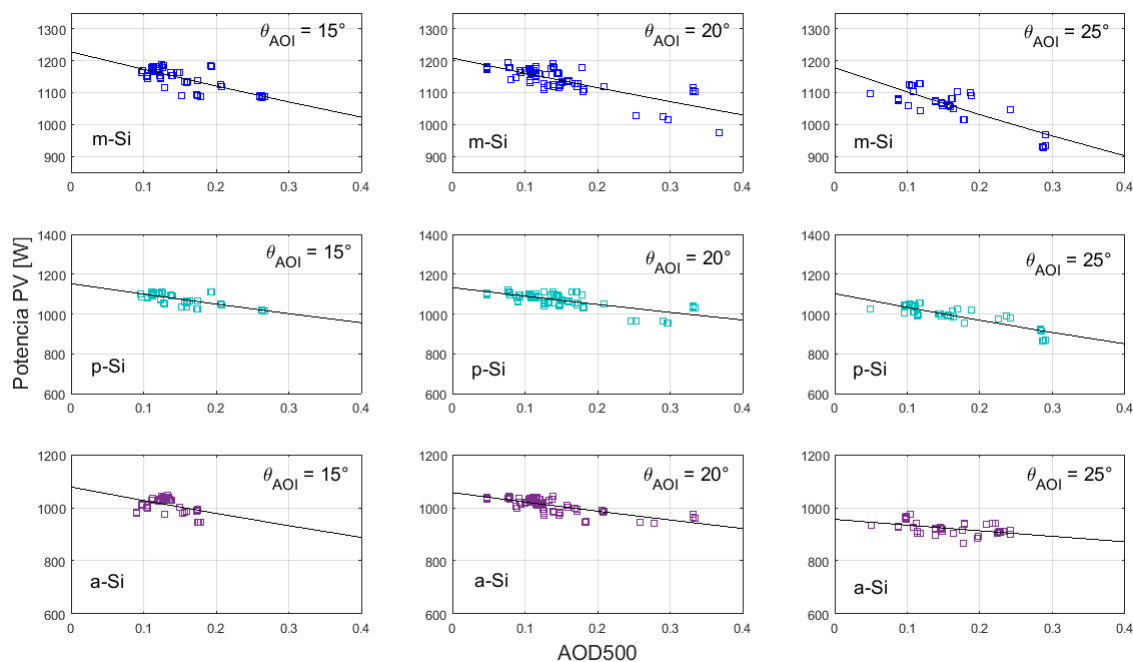


Figura 4.18: Potencia normalizada versus AOD para las distintas tecnologías en tres ángulos de incidencia durante los años 2014-2015 entre las 11AM y las 3PM en Santiago bajo condición de cielo despejado, filtrado en base a la mediana del coeficiente del performance y el vapor de agua.

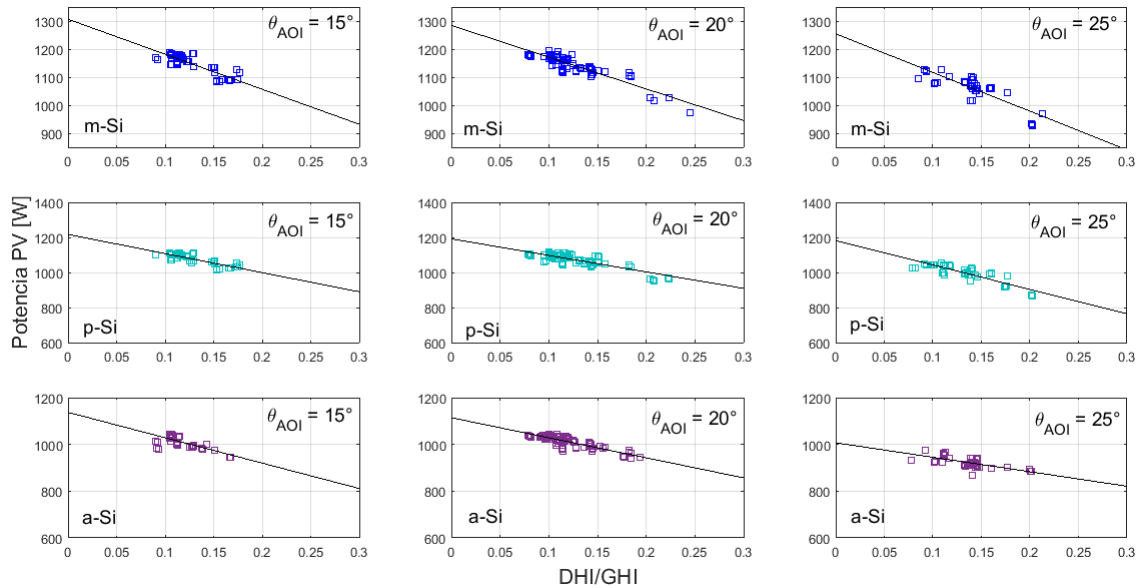


Figura 4.19: Potencia normalizada versus fracción de la componente difusa sobre la componente global en plano inclinado de las distintas tecnologías y tres ángulos de incidencia entre las 11AM y las 3PM durante los años 2015-2015 en Santiago bajo condición de cielo despejado, filtradas en función de la mediana del coeficiente de performance y el vapor de agua.

Luego, y dado que los datos no permiten generar parametrizaciones como las realizadas con las distintas componentes de la radiación solar incidente, se procedió a estimar las pérdidas usando el coeficiente de performance corregido. En el Anexo G se puede observar la diferencia entre la potencia medida y la potencia estimada mediante la Ecuación 3.2 para tres coeficientes de performance corregidos. De esta figura es posible ver que la diferencia entre la potencia estimada y la potencia medida es baja, con R^2 mayores al 85 % para todos los ajustes. La variabilidad que existe entre los datos medidos y los calculados se pueden deber a que no se consideran los efectos espectrales en las celdas, junto con la diferencia que podría existir en la temperatura de celda estimada y la temperatura real de la celda. Por otro lado, llamó la atención la diferencia que se tiene en la densidad de datos para la tecnología policristalina en comparación a la tecnología monocristalina y amorfa para los distintos coeficientes de performance, indicando que la tecnología policristalina tiene un mayor coeficiente de performance que las otras tecnologías estudiadas, lo que se condice con lo presentado por Urrejola et al.[26]. Esto puede deberse principalmente a los coeficientes usados para calcular la temperatura de la celda, los cuales podrían no corresponder al arreglo que se tiene, y que junto a la menor potencia del arreglo genera mayores coeficientes de performance en relación a las otras tecnologías.

Con esto, y con la ayuda de las parametrizaciones, se calculó la irradiancia global en plano inclinado para un caso sin aerosoles, para posteriormente estimar la potencia de los arreglos de las tres tecnologías usando la Ecuación 3.2. En la Figura 4.20 se muestran los promedios mensuales de las potencias obtenidas y estimadas tanto para las condiciones medidas como para el caso estimado sin aerosoles para las tres tecnologías entre los años 2014-2015 al asumir que los módulos operan durante todo el año bajo una condición de operación constante, en

base a un coeficiente de performance corregido del 75 %. Para el caso medido se realizó un filtro en base a este coeficiente de performance.

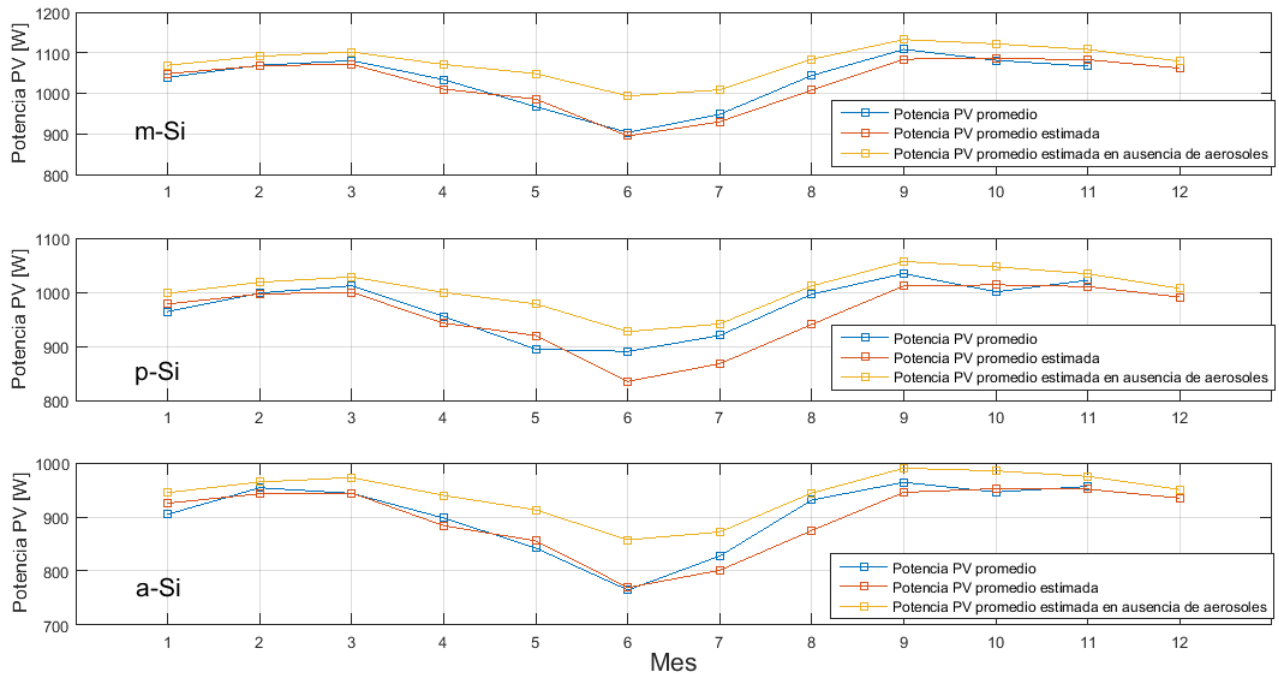


Figura 4.20: Potencia fotovoltaica mensual promedio para el caso medido, calculado y estimado para un caso sin aerosoles para las distintas tecnologías entre las 11AM y las 15PM hora local en Santiago durante los años 2014-2015. Se asume operación constante durante todo el año, con un coeficiente de performance corregido del 75 %.

De acá se observa que existe una leve diferencia entre las potencias calculadas y las medidas para la tecnología monocristalina y amorfa, junto con diferencias más notorias en la tecnología policristalina, debido principalmente a los coeficientes usados para calcular la temperatura de la celda. Junto con esto se observa que la diferencia entre la potencia medida y la estimada para un caso sin aerosoles, es más notoria en los meses de invierno, producto del aumento del ángulo de incidencia, lo que aumenta el efecto de los aerosoles. El efecto de los aerosoles disminuye considerablemente al acercarse a los equinoccios debido principalmente a que en esta época se generan los menores ángulos de incidencia por la inclinación de los módulos.

Al ver la diferencia entre la potencia de salida medida de los arreglos y la estimada para un caso sin aerosoles, se ve que esta puede llegar a 100 W promedio en la época de invierno, lo que en largos periodos puede significar una pérdida en la producción fotovoltaica importante. Para verificar esto se calculó la producción promedio mensual de los arreglos, y que se muestra en el Anexo H, la cual se obtuvo usando la Ecuación 3.3. De acá se observa que las pérdidas debido a la contaminación atmosférica en Santiago son estacionales, siendo más importantes en los meses de invierno, época en que aumenta el ángulo de incidencia y se tiene una carga de aerosoles importante en la cuenca. Esta diferencia va disminuyendo a medida que avanza el año, alcanzando un mínimo en las épocas de Otoño-Primavera. Las pérdidas para cada tecnología son del orden del 4 % anual, el cual no es un valor significativo y que se explica por la forma en que están dispuestos los arreglos, debido a que la inclinación que

poseen los paneles minimiza los ángulo de incidencia en épocas en donde se tienen mayores espesores ópticos de aerosoles, lo que ayuda a mitigar los efectos que generan los aerosoles en la radiación solar incidente. Este porcentaje de pérdidas podría aumentar, debido a que se consideró un periodo muy acotado del día, junto con que las horas analizadas en el presente estudio corresponden al periodo más estable y con menor AOD en el día en comparación a las horas de la mañana y la tarde (luego de las 4-5PM).

Luego, y al ver los buenos resultados que se obtuvieron de las parametrizaciones versus los datos medidos, se extrapolaron los resultados al igual que en las distintas componentes de la radiación solar. La Figura 4.21 muestra las diferencias entre la potencia mensual promedio de las distintas tecnologías estudiadas para el caso calculado con la carga de aerosoles de Santiago y un caso sin aerosoles, en donde se observa el marcado efecto que tienen el AOD en la potencia de salida de los módulos en la época de invierno para todas las tecnologías, sobre todo en los meses de Mayo hasta Agosto. En la Tabla 4.8 se muestra en detalle la potencia calculada en ambos casos y la diferencia porcentual mensual y anual para todas las tecnologías durante el año, mostrando que para todas las tecnologías se tiene una disminución de la producción fotovoltaica del orden del -4.5 %.

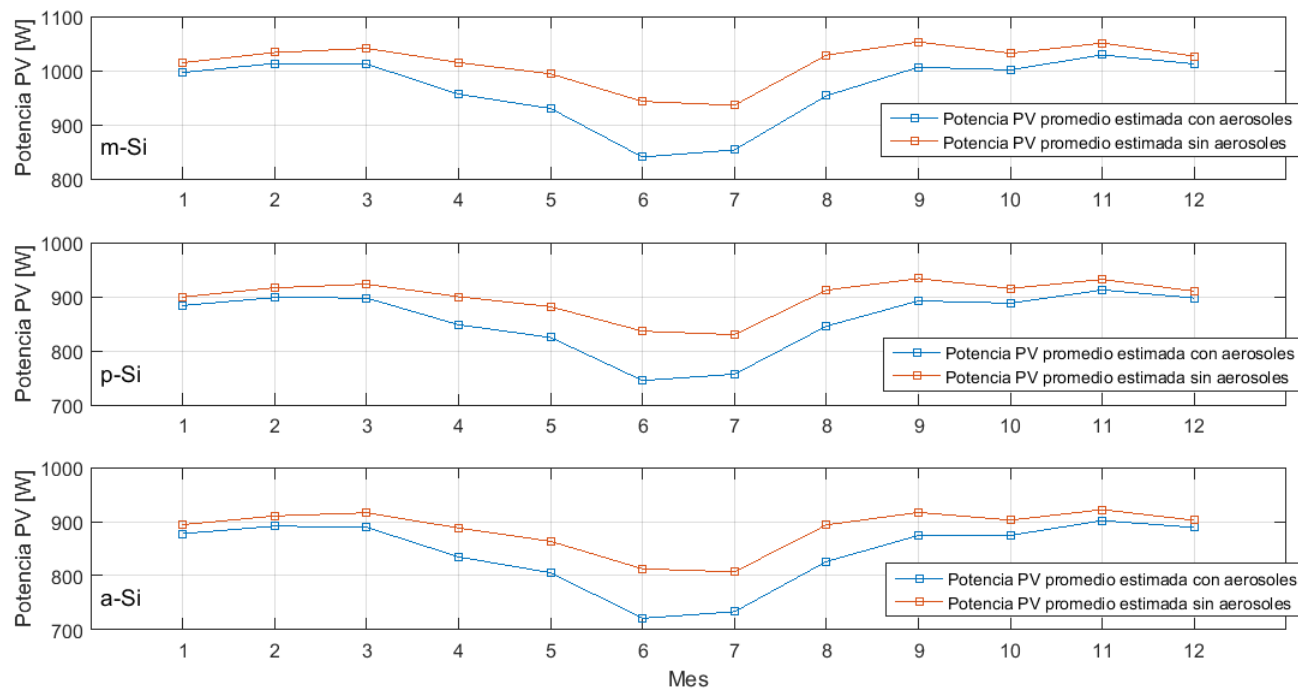


Figura 4.21: Potencia fotovoltaica mensual promedio calculada de las distintas tecnologías para un caso con aerosoles y un caso sin aerosoles en Santiago, entre las 10AM y las 4PM durante los años 2014-2015. La potencia se calculó en base a un coeficiente de performance corregido del 75 %.

Tabla 4.8: Producción fotovoltaica mensual calculada para un caso con aerosoles y un caso sin aerosoles en condición de cielo despejado para el rango horario comprendido entre las 10AM y las 4PM durante los años 2014-2015 en Santiago. La potencia se calculó en base a un coeficiente de performance corregido del 75%.

Mes	Producción PV calculada con aerosoles [kWh]			Producción PV calculada sin aerosoles [kWh]			Diferencia %		
	m-Si	p-Si	a-Si	m-Si	p-Si	a-Si	m-Si	p-Si	a-Si
Enero	148	131	130	150	133	133	-1,8 %	-1,8 %	-1,9 %
Febrero	135	120	119	138	122	121	-2,0 %	-2,0 %	-2,1 %
Marzo	134	119	118	138	123	122	-2,8 %	-2,8 %	-2,9 %
Abril	111	99	97	118	105	104	-5,8 %	-5,8 %	-6,0 %
Mayo	89	79	77	95	84	82	-6,4 %	-6,4 %	-6,7 %
Junio	72	64	62	81	72	70	-10,9 %	-10,9 %	-11,2 %
Julio	55	49	48	61	54	52	-8,8 %	-8,8 %	-9,1 %
Agosto	74	66	64	80	71	69	-7,3 %	-7,3 %	-7,6 %
Septiembre	72	64	63	75	67	66	-4,4 %	-4,4 %	-4,6 %
Octubre	105	93	91	108	96	94	-3,0 %	-3,0 %	-3,1 %
Noviembre	126	112	110	128	114	113	-2,1 %	-2,1 %	-2,2 %
Diciembre	135	119	118	137	121	120	-1,4 %	-1,4 %	-1,5 %
Anual	1122	995	979	1173	1040	1026	-4,4 %	-4,4 %	-4,5 %

4.3. Efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica con módulos CPV.

Para analizar el efecto de los aerosoles en este tipo de tecnología, se presenta la Figura 4.22, que muestra la potencia media mensual simulada de un panel CPV en Santiago durante los años 2014 y 2015 entre las 11AM y las 3PM hora local. Primero se observa la variación estacional de la potencia del módulo, debido a la componente estacional de la componente directa normal y al aumento de aerosoles que se tiene en la época de invierno, mostrando un mínimo en el mes de Junio. Como los aerosoles generan una disminución en la radiación incidente en el módulo, junto con pérdidas espectrales y ópticas, se tiene la Figura 4.23, la cual muestra la fracción media mensual entre la potencia calculada con la carga de aerosoles en Santiago y la potencia estimada para un caso sin aerosoles, en donde se ve que el efecto de los aerosoles genera una diferencia de hasta -30 % en la potencia de salida, con una media del -20 % para el mes de Junio.

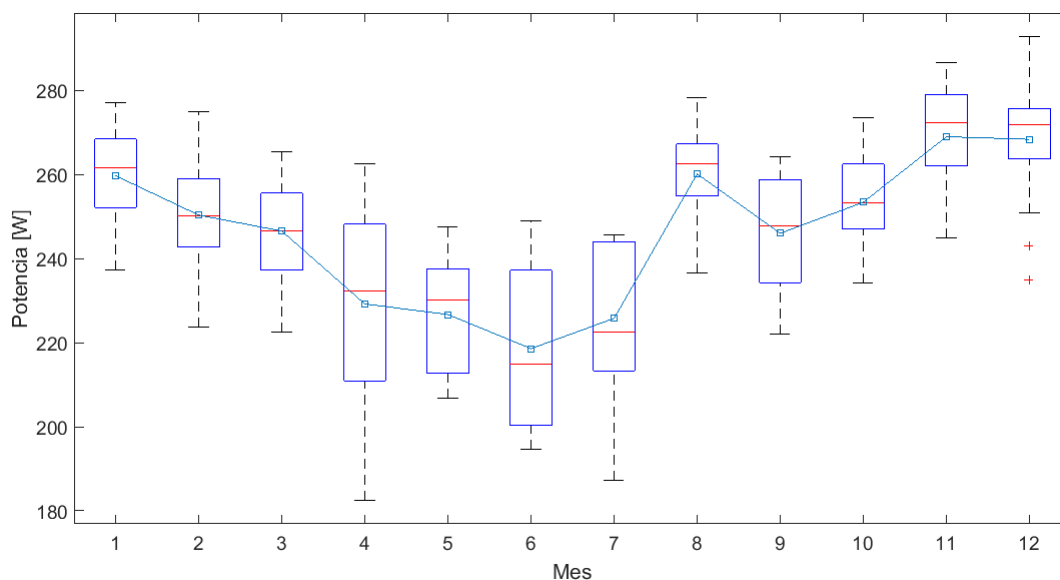


Figura 4.22: Potencia mensual promedio obtenida entre las 11AM y las 3PM de un módulo CPV en Santiago bajo condición de cielo despejado durante los años 2015-2015.

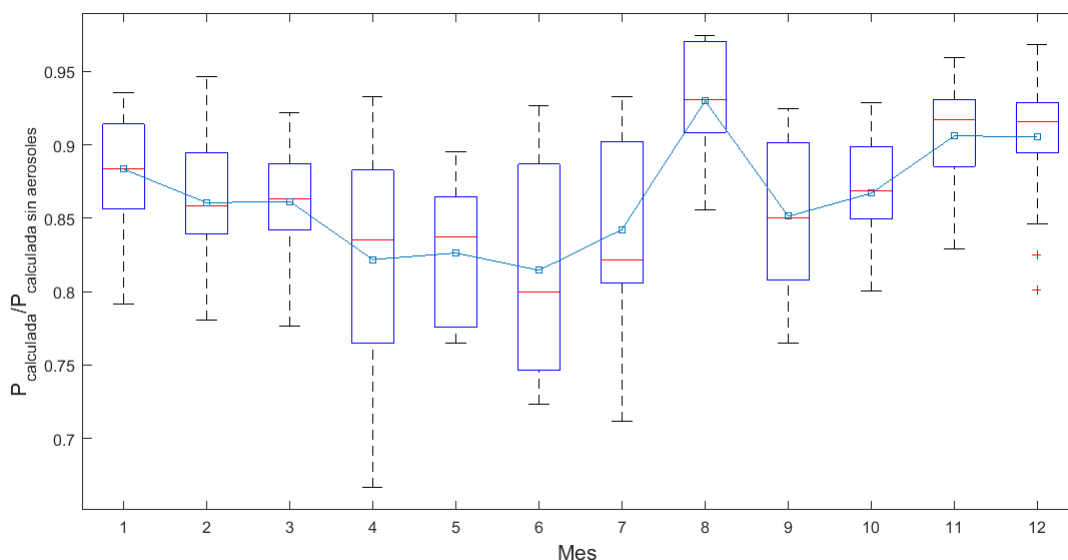


Figura 4.23: Fracción entre la potencia simulada de un módulo CPV y la potencia simulada para un caso sin aerosoles en Santiago, entre las 11AM y las 3PM durante los años 2014-2015 bajo condición de cielo despejado.

En la Tabla 4.9 se presenta la generación estimada del panel CPV a lo largo del año bajo cielos despejados, el cual tiene un comportamiento estacional similar al de las tecnologías fotovoltaicas convencionales, pero con diferencias más marcadas si se compara con el caso de sin aerosoles. Esto se debe a que estos módulos son más sensibles a los cambios de radiación directa normal, debido principalmente a la óptica con que funcionan, por lo que el efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica será mucho más acentuada.

Al realizar una comparación entre las tecnologías convencionales y las de concentración, se puede ver que las variables atmosféricas afectan en mayor medida a las tecnologías de concentración (-4 % anual para celdas convencionales versus -13.2 % para las celdas de concentración). Sin embargo, se puede ver que la producción fotovoltaica sigue siendo mayor en celdas de concentración que en celdas convencionales, lo que sumado a que este tipo de celdas posee casi el doble de potencia por metro cuadrado, se tiene que este tipo de tecnología es técnicamente competitiva en comparación a las tecnologías basadas en silicio para condiciones de cielos despejados en Santiago. Sin embargo, un estudio considerando cielos cubiertos o con nubosidad es necesario para analizar la factibilidad de este tipo de tecnología en un entorno urbano como Santiago a lo largo del año.

Cabe destacar también que dentro de este análisis existe un efecto debido a la masa atmosférica y la temperatura de la celda. Sin embargo, y como se ve en el Anexo I, el efecto de la masa atmosférica es casi nulo debido a que a lo largo del año existe una época muy acotada en donde se llega al umbral en que la masa atmosférica genera pérdidas de eficiencia en las celdas. Junto con esto, las temperaturas de la celda en invierno disminuye por lo que la eficiencia de la celda aumenta en la época en que se tiene el mayor efecto por aerosoles. Además, en un caso hipotético en que no hayan aerosoles y la temperatura de la celda sea en todo momento la temperatura en condiciones STC, se tiene que los niveles de radiación permiten obtener la potencia máxima en condiciones STC en los meses de invierno.

Tabla 4.9: Producción mensual y anual estimada de un panel CPV entre las 11AM y las 3PM bajo condición de cielo despejado en Santiago para los años 2014-2015

Mes	Producción CPV estimada [kWh]	Producción CPV estimada para un caso sin aerosoles [kWh]	Diferencia %
Enero	103	116	-11,7 %
Febrero	89	103	-13,9 %
Marzo	87	101	-13,8 %
Abril	71	87	-17,7 %
Mayo	58	70	-17,3 %
Junio	50	61	-17,9 %
Julio	39	47	-15,9 %
Agosto	54	58	-7,0 %
Septiembre	47	55	-14,4 %
Octubre	71	82	-13,3 %
Noviembre	88	97	-9,4 %
Diciembre	95	105	-9,5 %
Anual	852	981	-13,2 %

Capítulo 5

Conclusiones

Se presentó un estudio del efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación solar, junto con el efecto que generan los aerosoles en diversas tecnologías fotovoltaicas en Santiago.

Por un lado se ve que los aerosoles no solo generan atenuación, sino que también una gran dispersión de la radiación incidente, lo que explica el aumento de DHI a medida que aumenta el espesor óptico de aerosoles. Junto con esto, la dispersión generada se puede deber al tipo de aerosoles presente en la ciudad de Santiago, en donde el polvo y el aerosol de tipo urbano son el tipo de aerosoles que más explica el comportamiento dispersivo obtenido. Para confirmar esto se hace necesario un análisis más riguroso del tipo de aerosol presente en Santiago, sobre todo de sus propiedades ópticas.

También se generaron distintas parametrizaciones que buscaron caracterizar el efecto de los aerosoles y el vapor de agua sobre la radiación incidente a lo largo del año, las cuales mostraron buenos resultados al compararlas con las mediciones obtenidas, sobre todo de la componente global horizontal. Estas sirvieron para estimar la irradiancia en el caso de no tener aerosoles en Santiago, lo que ayudó a mostrar de mejor forma el efecto en la partición de las componentes. Sin embargo, se hace necesario una mayor cantidad de datos para generar modelos más precisos, sobre todo para la componente difusa horizontal, la cual muestra las mayores diferencias entre los datos modelados y medidos.

Con ayuda de las parametrizaciones se estimó el efecto de los aerosoles en las distintas componentes, el cual mostró una diferencia anual de -6.3% para la componente global horizontal, -15.3% para la componente directa normal y 253% para la componente difusa horizontal al comparar un caso con aerosoles y un caso sin aerosoles. Por otro lado se ve que el aumento de difusa en relación a la componente global muestra una diferencia de un 290% , lo que vuelve a mostrar el efecto dispersivo de los aerosoles en la radiación incidente en Santiago.

Luego, al analizar el efecto de los aerosoles en sistemas de generación se ve estos sí generan una disminución en la potencia de salida de los paneles y por ende una pérdida en la producción. Esta pérdida también depende en gran parte del tipo de celda utilizada. Del presente

trabajo se puede ver que existen diferencias del orden de -4.5 % para todas las tecnologías.

Junto con esto, se analizó el efecto que tiene la partición entre la componente difusa y global en plano inclinado en los distintos módulos, el cual arrojó resultados que no son concluyentes, debido a que no queda claro si la disminución en potencia es generado por la partición de las componentes de la radiación, o bien, es el efecto que los aerosoles producen en el espectro de respuesta de las celdas. Para esclarecer esto se podría generar un estudio de laboratorio, en donde se haga incidir distintas proporciones de radiación directa y difusa en las distintas tecnologías, para así determinar si existe algún efecto debido al tipo de componente que incide en el panel.

Cabe destacar que el análisis del efecto de los aerosoles que se realiza en el presente estudio considera la radiación solar integrada en todo el espectro radiativo, por lo que los gráficos mostrados anteriormente dan cuenta por una parte del efecto que tienen los aerosoles en la radiación incidente y que por ende afectan en la generación. Sin embargo, el efecto del espesor óptico de aerosoles en las celdas fotovoltaicas se explica en mayor parte por el efecto que tiene el AOD en el espectro tanto de la radiación incidente como en el de respuesta de los distintos módulos estudiados. Por ejemplo, se sabe que los aerosoles tienen un efecto importante en las zonas cercanas al espectro visible, como se ve en la Figura 2.8 y 2.9, lo que coincide con las zonas en donde se tiene una mayor respuesta espectral de las celdas de capa fina, como se muestra en la Figura 2.17, junto con el hecho de que las celdas de capa fina poseen un ancho de respuesta espectral mas pequeño. De esto se deduce que los aerosoles tendrán un impacto más fuerte en este tipo de tecnología versus las celdas monocristalinas y policristalina ([12] y [30]). Este efecto espectral más marcado también podría ser la causa de las grandes diferencias en la época de invierno del coeficiente de performance en las celdas de capa fina mostrados por Urrejola et al [26].

Por último, se simuló una módulo compuesto por celdas de concentración en Santiago, el cual mostró pérdidas anuales debido a los aerosoles de -13.2 %. Sin embargo, se ve que la producción por metro cuadrado en comparación a celdas convencionales es mayor, lo que indica que aunque esta tecnología se vea más afectada por el espesor óptico de aerosoles y las variables meteorológicas, estas siguen siendo más eficiente que las celdas convencionales, lo que da razones para no descartar de lleno esta tecnología en entornos urbanos. Sin embargo, se hace necesario un estudio de la producción en días cubiertos y despejados, junto a un análisis económico que permita enlazar si este tipo de tecnología es viable en Santiago.

De lo anterior se tienen los primeros indicios de que los aerosoles si generan un efecto en la producción fotovoltaica en Santiago. Sin embargo, se requieren mediciones de espesor óptico de aerosoles y vapor de agua en una mayor rango horario durante el año en Santiago y se requieren de diversos estudios para determinar con mayor precisión el efecto que se tiene en los distintos tipos de celdas solares. Entre ellos un estudio más profundo del efecto que tiene el AOD en el espectro tanto radiativo como en el espectro de respuesta de los distintos tipos de tecnología fotovoltaica en Santiago, junto con mediciones más frecuentes del espectro radiativo, como los realizados por Cordero et al.[44], y pruebas que determinen la respuesta espectral de los distintos paneles instalados en San Joaquín, como se muestra en trabajo de Litjens et al.[12]. Una investigación como la de Fernández et al.[30] pero realizada en Santiago, en donde se compare el efecto espectral generado por diversas variables atmosféricas

en distintos tipos de tecnologías fotovoltaicas sería de gran aporte para cuantificar de mejor forma el efecto que tiene la contaminación atmosférica en la producción fotovoltaica, lo que ayudaría sobre todo en la toma de decisiones en torno a la elección del tipo de módulo que debe instalarse para un entorno urbano.

Bibliografía

- [1] R. Rondanelli, A. Molina, and M. Falvey, “The Atacama surface solar maximum,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96, no. 3, pp. 405–418, 2015.
- [2] X. Zhu, X. Li, M. Cai, S. Zhou, Y. Zhu, F.-F. Jin, X. Zou, and M. Zhang, *Observation, Theory and Modeling of Atmospheric Variability*, ser. World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate. WORLD SCIENTIFIC, feb 2004, vol. 3. [Online]. Available: <http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/5431>
- [3] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2006, vol. 2nd. [Online]. Available: <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=2126>
- [4] F. Vignola, J. Michalsky, and T. L. Stoffel, *Solar and infrared radiation measurements*. CRC Press, 2012.
- [5] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, 1983.
- [6] W. Technology, “Evaluation of models to predict solar radiation on tilted surfaces for the,” *Solar & Wind Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 585–589, 1990.
- [7] B. Liu and R. Jordan, “Daily insolation on surfaces tilted towards equator,” *ASHRAE J.; (United States)*, vol. 10, 1961.
- [8] R. C. Temps and K. L. Coulson, “Solar radiation incident upon slopes of different orientations,” *Solar Energy*, vol. 19, no. 2, 1977, p. 179-184., vol. 19, pp. 179–184, 1977.
- [9] A. A. Lacis and J. Hansen, “A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth’s Atmosphere,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 31, no. 1, pp. 118–133, jan 1974.
- [10] M.-D. Chou and K.-T. Lee, “Parameterizations for the Absorption of Solar Radiation by Water Vapor and Ozone,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 53, no. 8, pp. 1203–1208, apr 1996.
- [11] J. E. McDonald, “Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor,” *Journal of Meteorology*, vol. 17, no. 3, pp. 319–328, jun 1960.
- [12] G. Litjens and G.B.M.A., “Investigation of Spectral Effects on Photovoltaic Technologies by Modelling the Solar Spectral Distribution,” 2013.

- [13] C. N. Long and T. P. Ackerman, “Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 105, no. D12, pp. 15 609–15 626, jun 2000. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1029/2000JD900077>
- [14] X. Xia, Z. Li, P. Wang, H. Chen, and M. Cribb, “Estimation of aerosol effects on surface irradiance based on measurements and radiative transfer model simulations in northern China,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, no. D22, p. D22S10, aug 2007. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1029/2006JD008337>
- [15] A. Oyanedel, D. Painemal, I. J.F. León, and C. y L. Gallardo, “Aerosol loading over santiago de chile: A comparison between satellite and in situ measurements.” in *8 ICSHMO*.
- [16] R. Garreaud and J. Rutllant, *Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica en Santiago*, pp. 36–53.
- [17] J. Escribano, L. Gallardo, R. Rondanelli, and Y. S. Choi, “Satellite retrievals of aerosol optical depth over a subtropical urban area: The role of stratification and surface reflectance,” *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 14, no. 3, pp. 596–607, 2014. [Online]. Available: <http://www.aaqr.org/Doi.php?id=2{ }AAQR-13-03-OA-0082{&}v=14{&}i=3{&}m=4{&}y=2014>
- [18] K. D. Kanniah, J. Beringer, N. J. Tapper, and C. N. Long, “Aerosols and their influence on radiation partitioning and savanna productivity in northern Australia,” *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 100, no. 3, pp. 423–438, 2010.
- [19] S. Si-Ya and Z. Jing, “All-sky direct radiative effects of urban aerosols in beijing and shanghai, china,” *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 295–300, 2015. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3878/AOSL20150017>
- [20] I. Foyo-Moreno, I. Alados, M. Antón, J. Fernández-Gálvez, A. Cazorla, and L. Alados-Arboledas, “Estimating aerosol characteristics from solar irradiance measurements at an urban location in southeastern Spain,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 119, no. 4, pp. 1845–1859, feb 2014. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/2013JD020599>
- [21] X. Xia, M. Wild, L. M. Mercado, K. C. Wang, R. E. Dickinson, S. K. Satheesh, V. Ramanathan, W. C. Conant, U. C. Dumka, X. A. Xia, Z. Q. Li, H. B. Chen, M. Cribb, J. Huttunen, C. Gueymard, V. Badescu, M. J. Reno, C. W. Hansen, J. S. Stein, C. A. Gueymard, J. A. Ruiz-Arias, W. Conant, R. J. Allen, J. R. Norris, M. Wild, C. N. Long, T. P. Ackerman, X. Xia, R. Levy, A. Ohmura, L. M. Hinkelman, P. W. Stackhouse, B. A. Wielicki, T. P. Zhang, S. R. Wilson, J. Q. Qiu, D. Diermendjian, C. Gueymard, J. Garrison, T. Eck, B. N. Holben, T. F. Eck, O. Dubovik, M. D. King, O. E. García, Z. Li, K. Lee, Y. Wang, J. Xin, and W. Hao, “Parameterization of clear-sky surface irradiance and its implications for estimation of aerosol direct radiative effect and aerosol optical depth,” *Scientific Reports*, vol. 5, p. 14376, sep 2015. [Online]. Available: <http://www.nature.com/articles/srep14376>

-
- [22] T. N. Creekmore, E. Joseph, C. N. Long, and S. Li, “Quantifying aerosol direct effects from broadband irradiance and spectral aerosol optical depth observations,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 119, no. 9, pp. 5464–5474, may 2014. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/2013JD021217>
- [23] J.J.Escribano, “Capa límite, reflectancia y espesor óptico de aerosoles sobre Santiago.” *Universidad de Chile*, 2012.
- [24] M. M. Préndez, M. Egido, C. Tomas, J. Seco, A. Calvo, and H. Romero, “Correlation between solar radiation and total suspended particulate matter in Santiago, Chile- Preliminary results,” *Atmospheric Environment*, vol. 29, no. 13, pp. 1543–1551, 1995.
- [25] R. C. Muñoz and A. A. Undurraga, “Daytime mixed layer over the Santiago Basin: Description of two years of observations with a lidar ceilometer,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 49, no. 8, pp. 1728–1741, 2010.
- [26] E. Urrejola, J. Antonanzas, P. Ayala, M. Salgado, G. Ramírez-Sagner, C. Cortés, A. Pino, and R. Escobar, “Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile,” *Energy Conversion and Management*, vol. 114, pp. 338–347, 2016.
- [27] D. Y. Goswami, *Principles of Solar Engineering, Third Edition*. CRC Press, 2015, vol. 1. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?id=v4GbBgAAQBAJ&pgis=1>
- [28] W. Shockley and H. J. Queisser, “Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells,” *Journal of Applied Physics*, vol. 32, no. 3, p. 510, 1961. [Online]. Available: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/32/3/10.1063/1.1736034>
- [29] Solar energy et3034x. [Online]. Available: <https://www.edx.org/course/solar-energy-delftx-et3034x-0>
- [30] E. F. Fernández, A. Soria-Moya, F. Almonacid, and J. Aguilera, “Comparative assessment of the spectral impact on the energy yield of high concentrator and conventional photovoltaic technology,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 147, pp. 185–197, apr 2016. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024815006510>
- [31] T. Dierauf, A. Growitz, S. Kurtz, and C. Hansen, “Weather-Corrected Performance Ratio,” *NREL Technical Report NREL/TP-5200-57991*, no. April, pp. 1–16, 2013.
- [32] D. L. King, W. E. Boyson, and J. A. Kratochvil, “Photovoltaic array performance model,” *Sandia Report No. 2004-3535*, vol. 8, pp. 1–19, 2004. [Online]. Available: http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=919131
- [33] E. F. Fernández, F. Almonacid, J. Ruiz-Arias, and A. Soria-Moya, “Analysis of the spectral variations on the performance of high concentrator photovoltaic modules operating under different real climate conditions,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 127, pp. 179–187, aug 2014. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024814002347>

- [34] E. F. Fernández, F. Almonacid, J. A. Ruiz-Arias, and A. Soria-Moya, “Analysis of the spectral variations on the performance of high concentrator photovoltaic modules operating under different real climate conditions,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 127, pp. 179–187, 2014.
- [35] E. P. Shettle and R. W. Fenn, “Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties,” *Environmental Research Paper Air Force Geophysics Lab., Hanscom AFB, MA. Optical Physics Div.*, 1979.
- [36] W. Tian, Y. Wang, J. Ren, and L. Zhu, “Effect of urban climate on building integrated photovoltaics performance,” *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 1, pp. 1–8, 2007.
- [37] M. Chegaar and P. Mialhe, “Effect of atmospheric parameters on the silicon solar cells performance,” *Journal of Electron Devices*, vol. 6, pp. 173–176, 2008. [Online]. Available: <http://www.jeldev.org/6CHEGAAR.pdf>
- [38] D. Calinoiu, M. Paulescu, I. Ionel, N. Stefu, N. Pop, R. Boata, A. Pacurar, P. Gravi-la, E. Paulescu, and G. Trif-Tordai, “Influence of aerosols pollution on the amount of collectable solar energy,” *Energy Conversion and Management*, vol. 70, pp. 76–82, 2013.
- [39] R. Schmitz, “Modelling of air pollution dispersion in Santiago de Chile,” *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 11, pp. 2035–2047, 2005.
- [40] X. Xia, “A critical assessment of direct radiative effects of different aerosol types on surface global radiation and its components,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 149, pp. 72–80, 2014.
- [41] M. Mena-Carrasco, E. Oliva, P. Saide, S. N. Spak, C. de la Maza, M. Osses, S. Tolvett, J. E. Campbell, T. e. C.-C. Tsao, and L. T. Molina, “Estimating the health benefits from natural gas use in transport and heating in Santiago, Chile,” *Science of The Total Environment*, vol. 429, pp. 257–265, 2012.
- [42] K. M. Ragsdale, B. S. Barrett, and A. P. Testino, “Variability of particulate matter (PM10) in Santiago, Chile by phase of the Madden-Julian Oscillation (MJO),” *Atmospheric Environment*, vol. 81, pp. 304–310, dec 2013. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231013006997>
- [43] J. Xie and M. Sengupta, “Performance Analysis of Transposition Models Simulating Solar Radiation on Inclined Surfaces,” in *European PV Solar Conference and Exhibition (EU PVSEC)*, vol. 18302, 2016.
- [44] R. Cordero, G. Seckmeyer, A. Damiani, J. Jorquera, J. Carrasco, R. Muñoz, L. Da Silva, F. Labbe, and D. Laroze, “Aerosol effects on the UV irradiance in Santiago de Chile,” *Atmospheric Research*, vol. 149, pp. 282–291, nov 2014. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169809514002646>

Anexos

Anexo A: Ubicación de las estaciones San Joaquín y Beauchef en Santiago.

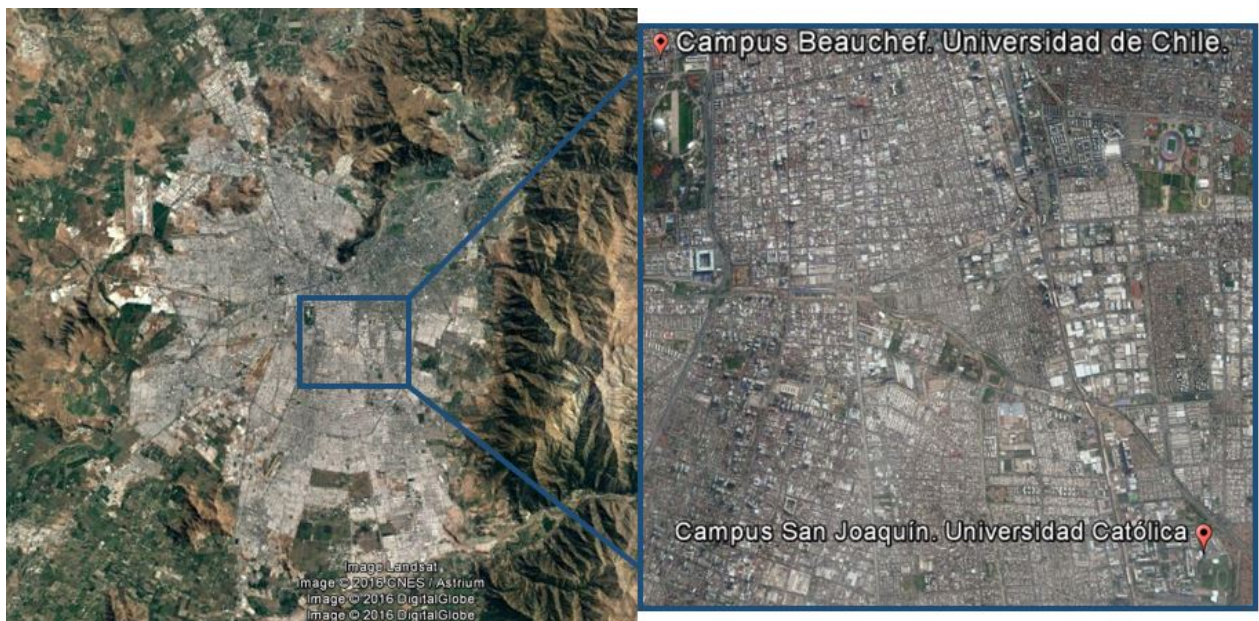


Figura A.1 : Ubicación de las estaciones San Joaquín y Beauchef en Santiago.

Anexo B: Series de tiempo para el AOD y las distintas variables meteorológicas

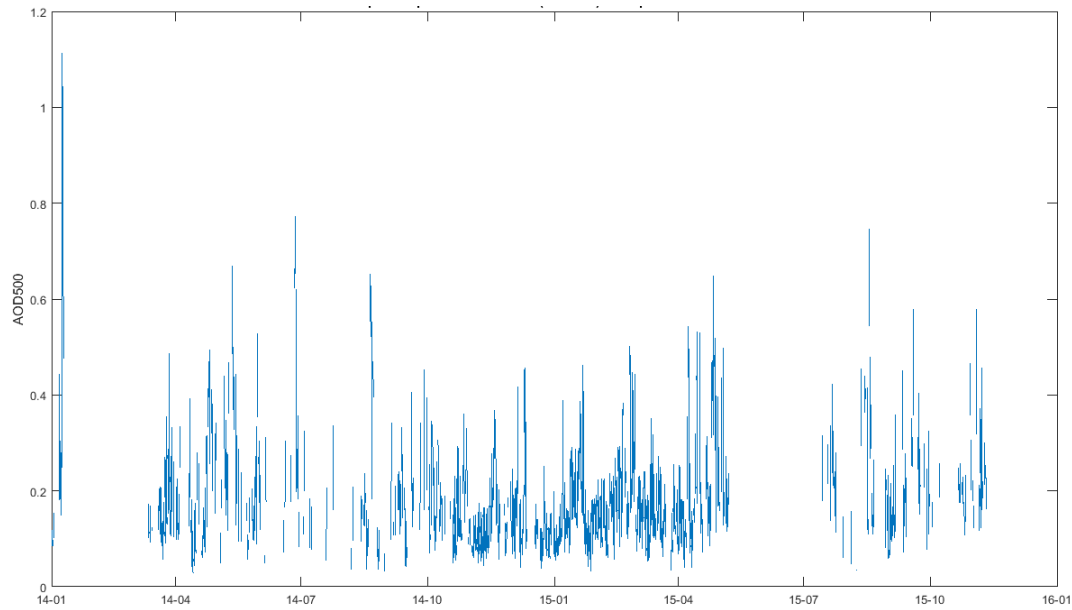


Figura B.1 : Espesor óptico de aerosoles (AOD) en Santiago para los años 2014-2015.

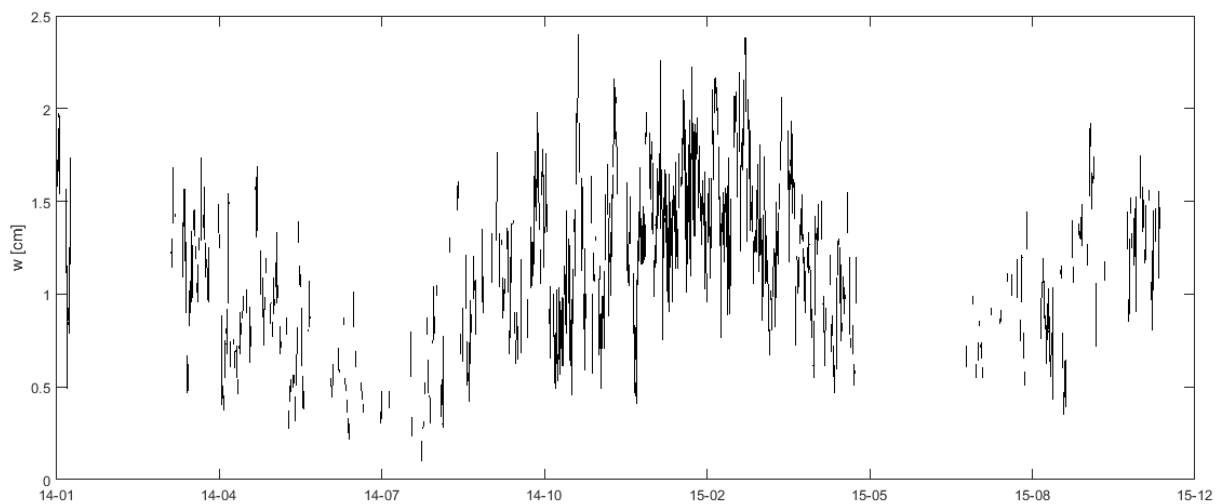


Figura B.2 : Cantidad de agua precipitable (w) en Santiago para los años 2014-2015.

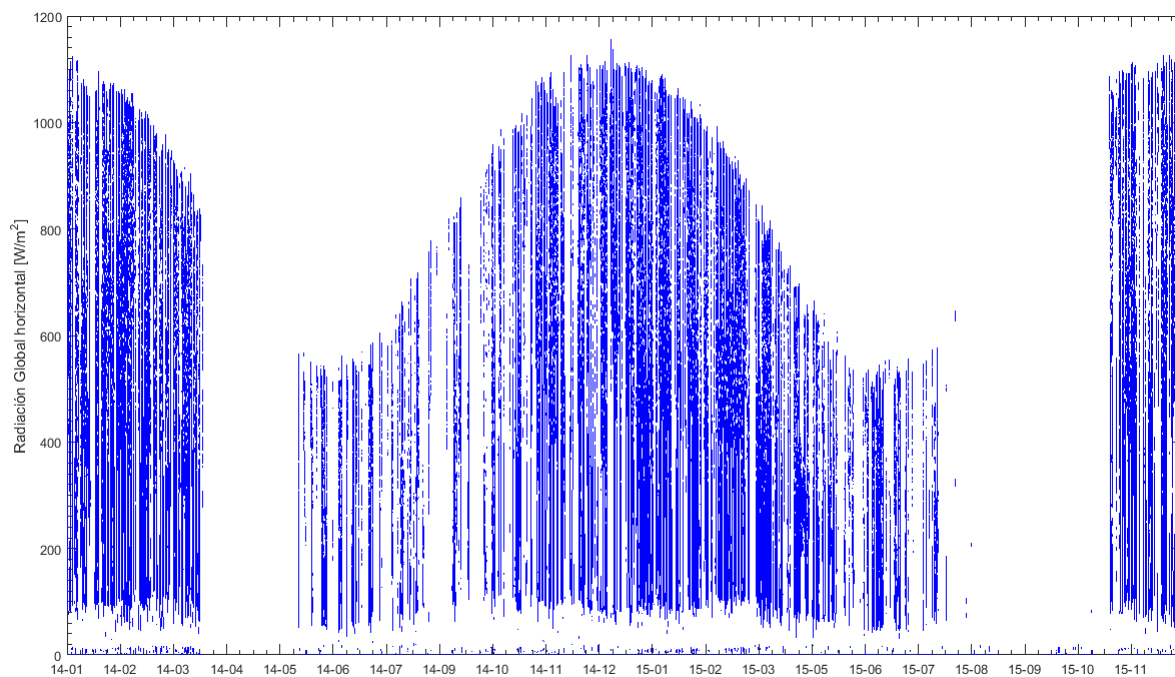


Figura B.3 : Irradiancia Global Horizontal (GHI) en Santiago para los años 2014-2015, utilizando el algoritmo de detección de cielos despejados.

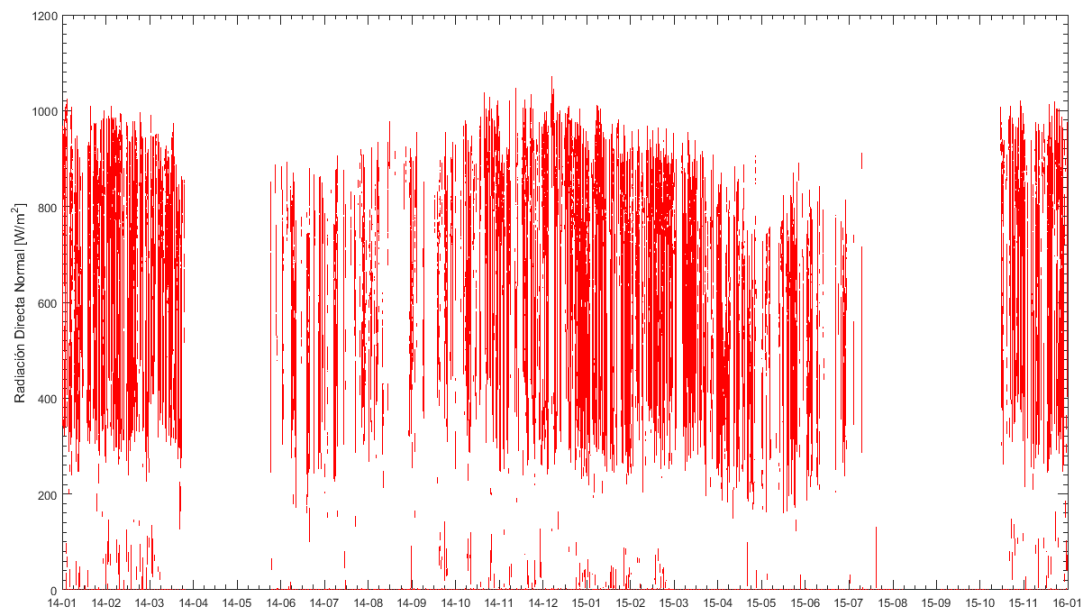


Figura B.4 : Irradiancia Directa Normal (DNI) en Santiago para los años 2014-2015, utilizando el algoritmo de detección de cielos despejados.

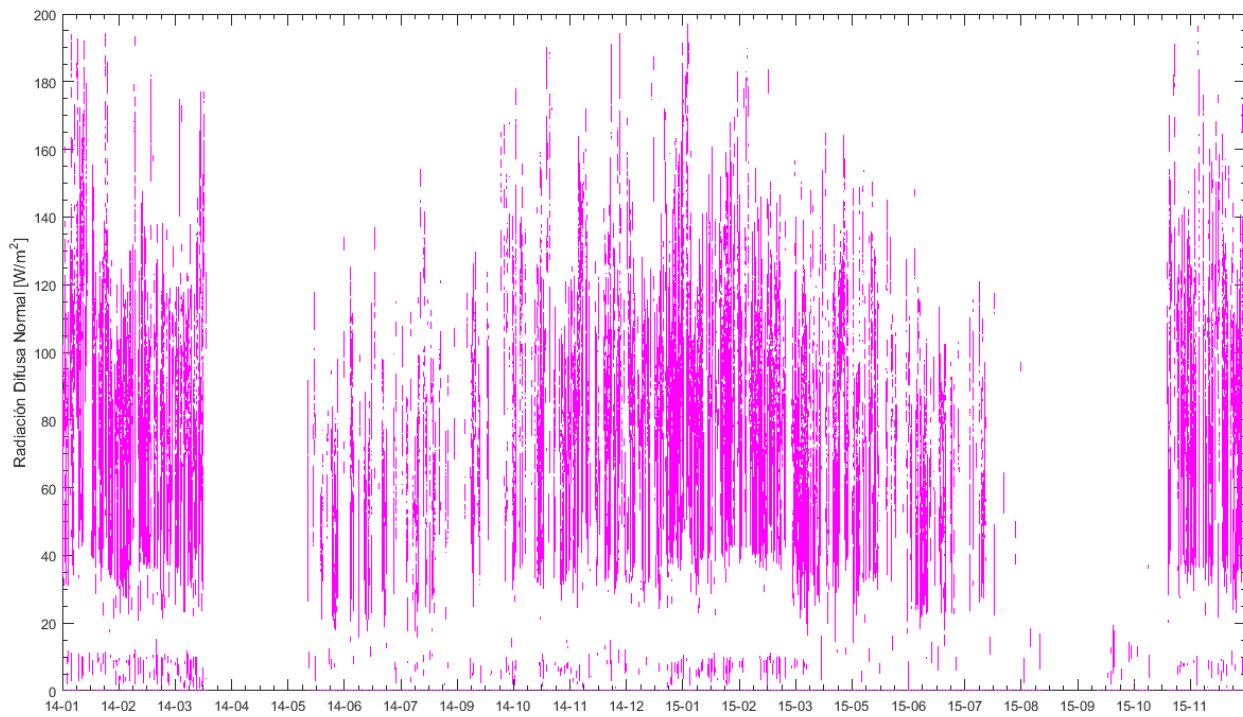


Figura B.5 : Irradiancia Difusa Horizontal (DHI) en Santiago para los años 2014-2015, utilizando el algoritmo de detección de cielos despejados.

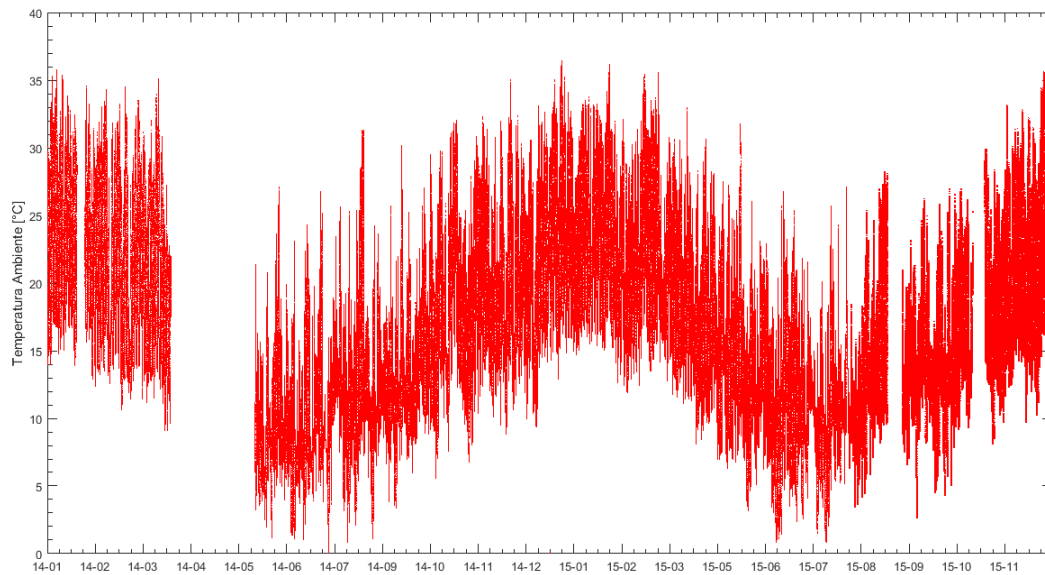


Figura B.6 : Temperatura en °C en Santiago para los años 2014-2015.

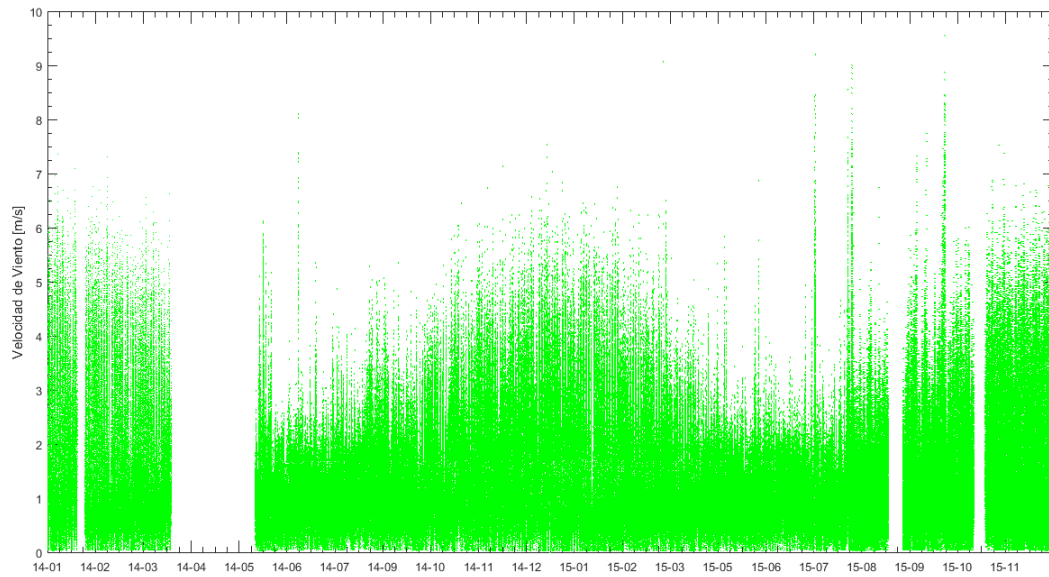


Figura B.7 : Velocidad de viento en m/s en Santiago para los años 2014-2015.

Anexo C: Horas de sol mensuales para Santiago

Tabla C.1 : Horas de sol promedio entre los años 2014-2015, Horas de Sol teóricas y porcentaje de horas con cielos despejados para Santiago.

Mes	Horas de sol mensuales promedio entre los años 2014-2015	Horas de sol teóricas	% de horas con cielos despejados
Enero	344,2	431,8	80 %
Febrero	293,15	369,4	79 %
Marzo	270,4	378,5	71 %
Abril	216,8	334,9	65 %
Mayo	163,3	318,7	51 %
Junio	141,1	295,2	48 %
Julio	108,8	311,4	35 %
Agosto	140,1	335,2	42 %
Septiembre	141,1	354,8	40 %
Octubre	224,2	399,0	56 %
Noviembre	280,1	412,3	68 %
Diciembre	314,1	439,2	72 %

Anexo D: Cantidad de data utilizada en el presente estudio

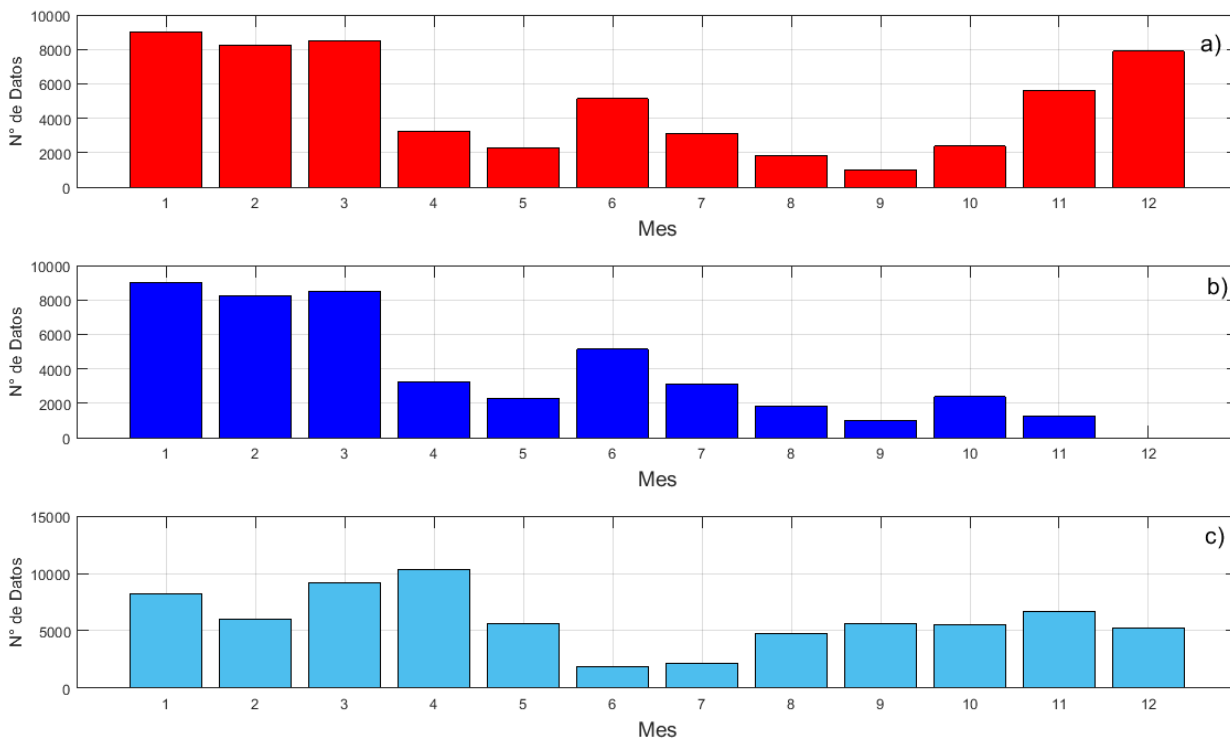


Figura D.1: Cantidad de data por mes disponible para el presente estudio entre los años 2014-2015. En a) se muestra la data disponible de radiación que cumple con el criterio de días despejados entre las 11AM y las 3PM. En b) se muestra la data correspondiente a las potencias obtenidas de los arreglos para las tres tecnologías en periodos sin nubosidad, mientras que en c) se muestra la data descargada de AERONET disponibles para el periodo.

Anexo E: Histograma de residuos entre los datos medidos y las parametrizaciones

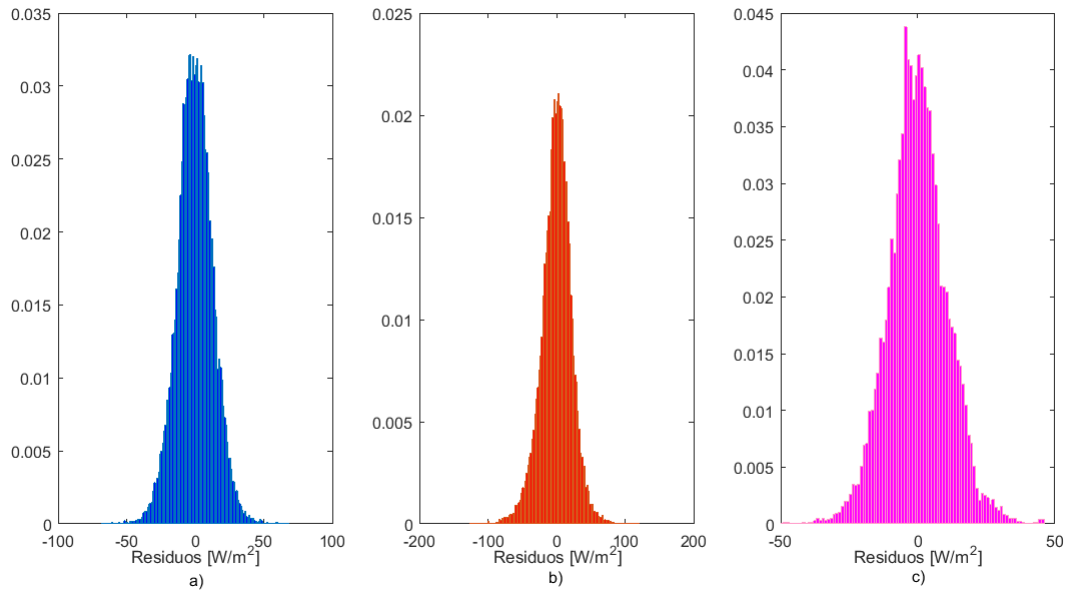


Figura E.1: Histograma de residuos entre los datos medidos y los obtenidos mediante las parametrizaciones para a) la componente global horizontal (GHI), b) la componente normal directa (DNI) y c) la componente difusa horizontal (DHI).

Anexo F: Irradiancia promedio medida y calculada para un caso sin aerosoles en Santiago

Tabla F.1: Irradiancia promedio mensual y anual, medidas y calculadas para un caso sin aerosoles bajo condición de cielo despejado para las componentes GHI, DNI y DHI, junto a la fracción de DHI sobre GHI, entre las 11AM y 3PM hora local en Santiago durante los años 2014-2015.

Mes	GHI			DNI		
	Medido [W/m ²]	Calculado s/Aerosoles [W/m ²]	Diferencia %	Medido [W/m ²]	Calculado s/Aerosoles [W/m ²]	Diferencia %
Enero	1000	1031	-3,0 %	904	1009	-10,5 %
Febrero	941	976	-3,6 %	874	998	-12,4 %
Marzo	832	873	-4,7 %	865	986	-12,3 %
Abril	686	735	-6,6 %	812	962	-15,6 %
Mayo	603	641	-5,9 %	804	944	-14,8 %
Junio	509	547	-7,1 %	779	926	-15,8 %
Julio	520	553	-6,0 %	738	925	-20,2 %
Agosto	678	698	-2,8 %	907	964	-5,8 %
Septiembre	801	844	-5,1 %	861	989	-12,9 %
Octubre	904	940	-3,8 %	882	1000	-11,8 %
Noviembre	982	1010	-2,7 %	928	1016	-8,6 %
Diciembre	1012	1036	-2,3 %	928	1015	-8,5 %
Anual	789	824	-4,2 %	857	978	-12,4 %

Mes	DHI			DHI/GHI		
	Medido [W/m ²]	Calculado s/Aerosoles [W/m ²]	Diferencia %	Medido	Calculado s/Aerosoles	Diferencia %
Enero	118	38	211 %	0,12	0,04	221 %
Febrero	127	34	272 %	0,14	0,04	286 %
Marzo	112	34	234 %	0,13	0,04	250 %
Abril	110	29	281 %	0,16	0,04	308 %
Mayo	102	26	294 %	0,17	0,04	319 %
Junio	92	23	293 %	0,18	0,04	323 %
Julio	85	23	277 %	0,16	0,04	301 %
Agosto	73	32	127 %	0,11	0,05	133 %
Septiembre	114	37	210 %	0,14	0,04	227 %
Octubre	120	38	218 %	0,13	0,04	231 %
Noviembre	105	43	142 %	0,11	0,04	148 %
Diciembre	109	41	166 %	0,11	0,04	173 %
Anual	105	33	219 %	0,14	0,04	242 %

Anexo G: Potencia PV medida versus potencia PV estimada en Santiago.

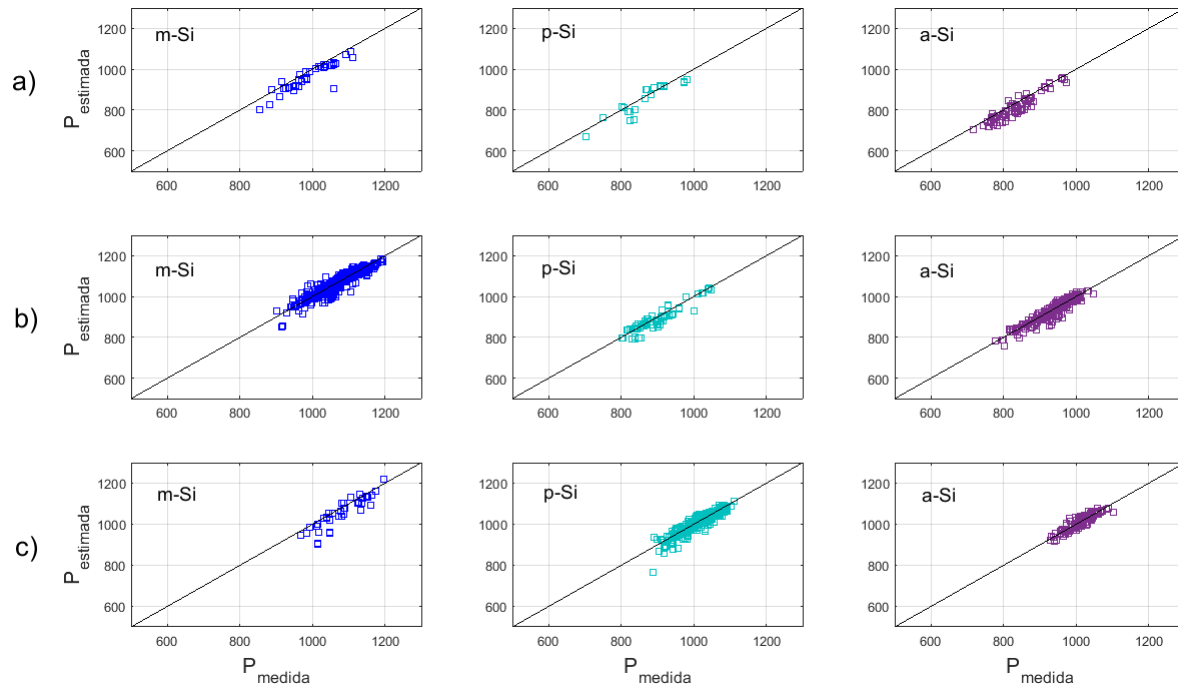


Figura G.1: Potencia medida versus la potencia estimada bajo condición de cielo despejado en base a tres coeficientes de performance corregidos en Santiago entre las 11AM y 3PM hora local durante los años 2014-2015. En la fila a) se tiene un coeficiente de performance corregido del 70 %, en la b) un coeficiente de 75 % y en la fila c) un coeficiente de 80 %. La curva presentada en los gráficos corresponde a una recta con ecuación $P_{estimada} = P_{medida}$.

Anexo H: Producción PV mensual y anual en base a datos medidos en San Joaquín y calculada para un caso sin aerosoles en Santiago.

Tabla H.1: Producción fotovoltaica mensual y anual estimada en base a los datos medidos en San Joaquín junto a la producción fotovoltaica calculada para un caso sin aerosoles en condición de cielo despejado para el rango horario comprendido entre las 11AM y las 3PM hora local durante los años 2014-2015 en Santiago. El promedio anual se calculó entre los meses de Enero a Noviembre.

Mes	Producción PV obtenida en San Joaquín [kWh]			Producción PV para un caso sin aerosoles [kWh]			% de pérdida		
	m-Si	p-Si	a-Si	m-Si	p-Si	a-Si	m-Si	p-Si	a-Si
Enero	103	95	89	106	99	93	-2,8 %	-3,4 %	-4,3 %
Febrero	95	89	85	97	91	86	-2,0 %	-2,0 %	-1,1 %
Marzo	96	90	84	98	92	86	-2,0 %	-1,6 %	-3,0 %
Abril	80	74	70	83	78	73	-3,5 %	-4,4 %	-4,5 %
Mayo	61	57	54	67	62	58	-7,8 %	-8,6 %	-7,7 %
Junio	52	51	44	57	53	49	-9,1 %	-3,9 %	-10,8 %
Julio	41	40	36	44	41	38	-6,0 %	-2,3 %	-5,1 %
Agosto	54	52	48	56	52	49	-3,7 %	1,5 %	-1,4 %
Septiembre	53	49	46	54	50	47	-2,1 %	-2,1 %	-2,6 %
Octubre	75	70	66	78	73	69	-3,6 %	-4,4 %	-4,0 %
Noviembre	87	83	78	90	84	80	-3,7 %	-1,2 %	-1,9 %
Diciembre	-	-	-	96	89	84	-	-	-
Anual	797	750	699	830	774	728	-3,9 %	-3,2 %	-3,9 %

Anexo I: Evaluación de distintas variables que afectan la potencia de un módulo CPV

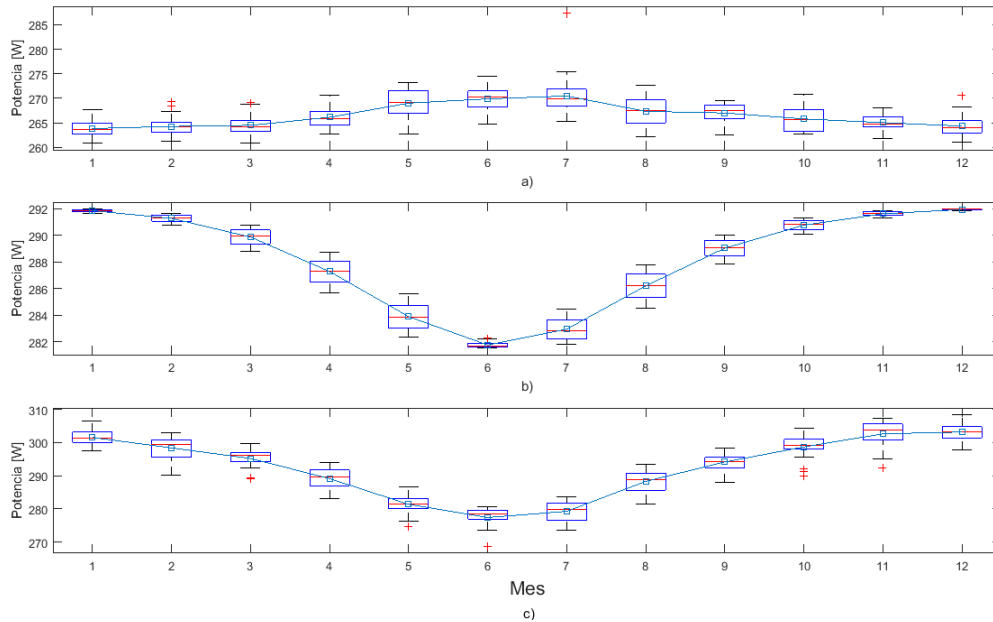


Figura I.1 : Evaluación de distintas variables que afectan la potencia del módulo CPV estudiado. En a) se muestra el efecto de la temperatura de la celda en condiciones ideales de irradiancia, AOD y AM. En b) se muestra el efecto de la masa atmosférica, en condiciones ideales de AOD, irradiancia y temperatura de la celda. Por último en c) se muestra la potencia ideal en un caso sin aerosoles, con temperatura de celda en condiciones STC y masa atmosférica igual al umbral.

