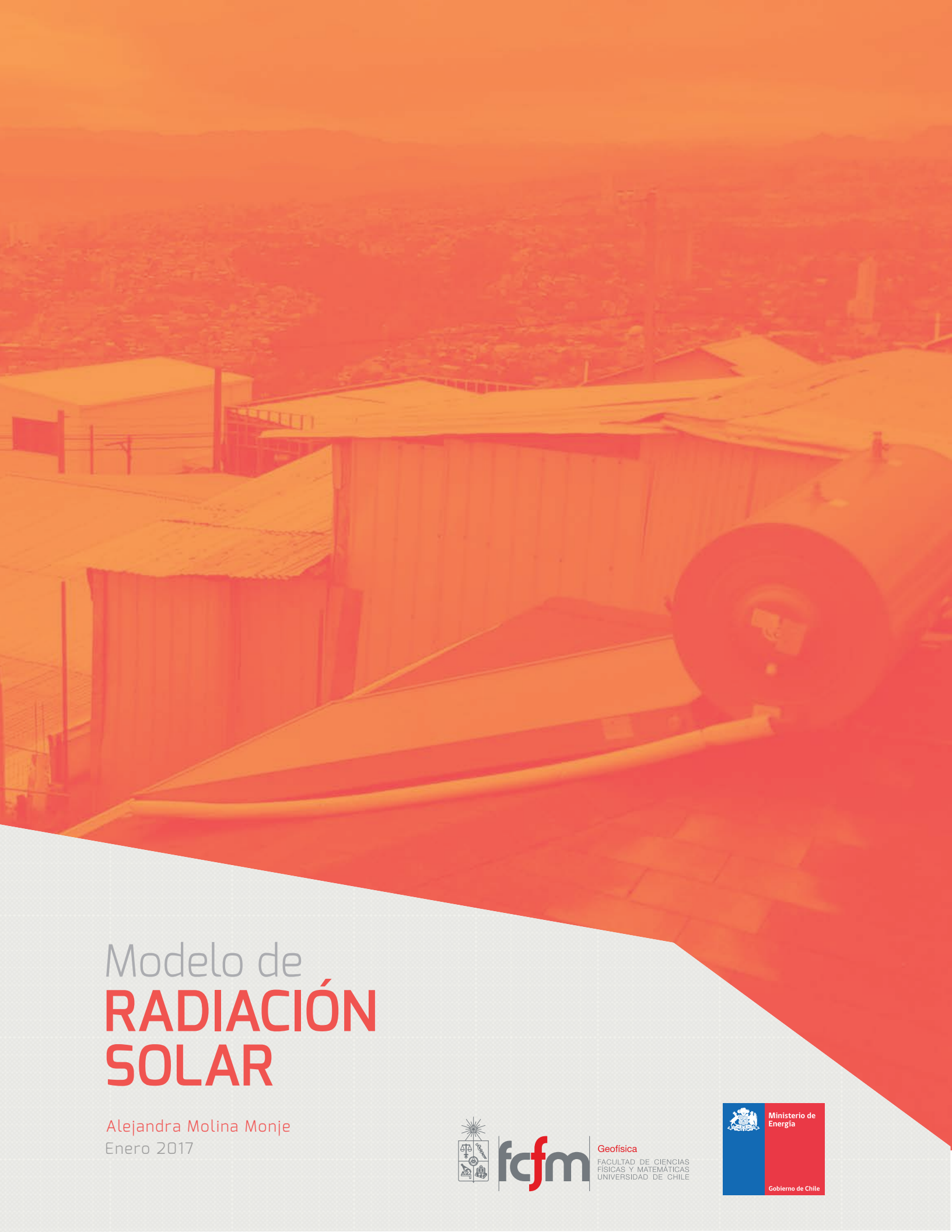




Modelo de **RADIACIÓN SOLAR**

Alejandra Molina Monje
Enero 2017



fcfm

Geofísica

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Ministerio de
Energía

Gobierno de Chile

Contenidos

CONTENIDOS	2
1 INTRODUCCIÓN	3
1 CÁLCULO DE RADIACIÓN	4
1.1 RADIACIÓN EN CIELO DESPEJADO: MODELO DE TRANSFERENCIA RADIATIVA	5
1.2 RADIACIÓN EN CIELO CON NUBOSIDAD	6
1.2.1 MODELO EMPÍRICO SIMPLE DE ATENUACIÓN POR NUBOSIDAD	6
1.2.2 BASE DE DATOS SATELITAL	7
1.2.3 DETECCIÓN DE NUBOSIDAD EN ZONA NORTE, CENTRO Y SUR	8
1.2.4 DETECCIÓN DE NUBOSIDAD EN EXTREMO SUR DEL PAÍS	9
1.2.5 SECTORES CON NIEVE	9
1.3 AEROSOL EN ÁREAS URBANAS	10
1.4 SOMBRAS DEBIDO A LA TOPOGRAFÍA	11
2 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO	12
2.1 BASE DE DATOS DE MEDICIONES	12
2.2 VALIDACIÓN DE LA DETECCIÓN DE NUBOSIDAD	13
2.3 VALIDACIÓN DE LA RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL	14
2.4 VALIDACIÓN DE LA RADIACIÓN DIRECTA	17
3 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS	18
4 REFERENCIAS	19

1 Introducción

La energía solar es la fuente de energía primordial del planeta. Las otras fuentes energéticas, como la energía hidroeléctrica o la energía química almacenada en combustibles, son meras transformaciones de la energía solar, que ocurren en escalas de tiempo pequeñas o grandes. El planeta recibe energía solar de manera abundante, sin embargo, su disponibilidad presenta grandes variaciones temporales y espaciales debido a la variabilidad de la atmósfera y por lo tanto el diseño de plantas que utilicen directamente la energía solar requiere de conocer la distribución de este recurso a un gran nivel de detalle espacial y temporal.

El Explorador de Energía Solar tiene como objetivo el proporcionar esta herramienta para el territorio chileno. Basándose en información de satélites que cubren regularmente el país y combinando esto con la modelación de los procesos en los que la radiación solar es modificada en su paso por la atmósfera, ha sido posible construir campos de alta resolución espacial y temporal de la radiación solar incidente.

En este documento se detalla toda la información necesaria para comprender el proceso de generación de la base de datos de radiación solar, nubosidad y sombras que se encuentran en el Explorador de Energía Solar.

1 Cálculo de radiación

La radiación que alcanza la superficie del planeta, depende de la composición de la columna de aire que atraviesa el rayo desde el tope de la atmósfera hasta el suelo. El componente más variable de la atmósfera es el agua, ya sea en forma de vapor o como nubes.

La parametrización de la nubosidad es uno de los aspectos más complejos de representar en modelos numéricos del tiempo, y por lo tanto, un producto de radiación solar superficial basado exclusivamente en la nubosidad generada por un modelo numérico de la atmósfera, puede contener grandes sesgos y errores sistemáticos.

Estos resultados pueden ser mejorados considerablemente cuando se utilizan imágenes satelitales para incorporar la variabilidad de la nubosidad.

La metodología que se describe en este trabajo incluye el cálculo de la radiación solar en superficie con un modelo de transferencia radiativa, para calcular la radiación solar en cielo despejado, y posteriormente considera la interacción de la radiación con los distintos tipos de nubes, cuyas características son estimadas a partir de imágenes del satélite geoestacionario GOES EAST, a través de un modelo empírico basado en una red de observaciones locales de irradiancia superficial.

Se han hecho correcciones en lugares con nieve utilizando los productos satelitales MODIS. Además, se ha considerado las pérdidas de radiación por efecto de las sombras que proyecta la topografía y las pérdidas debido a la mayor cantidad de aerosoles presentes en los principales centros urbanos.

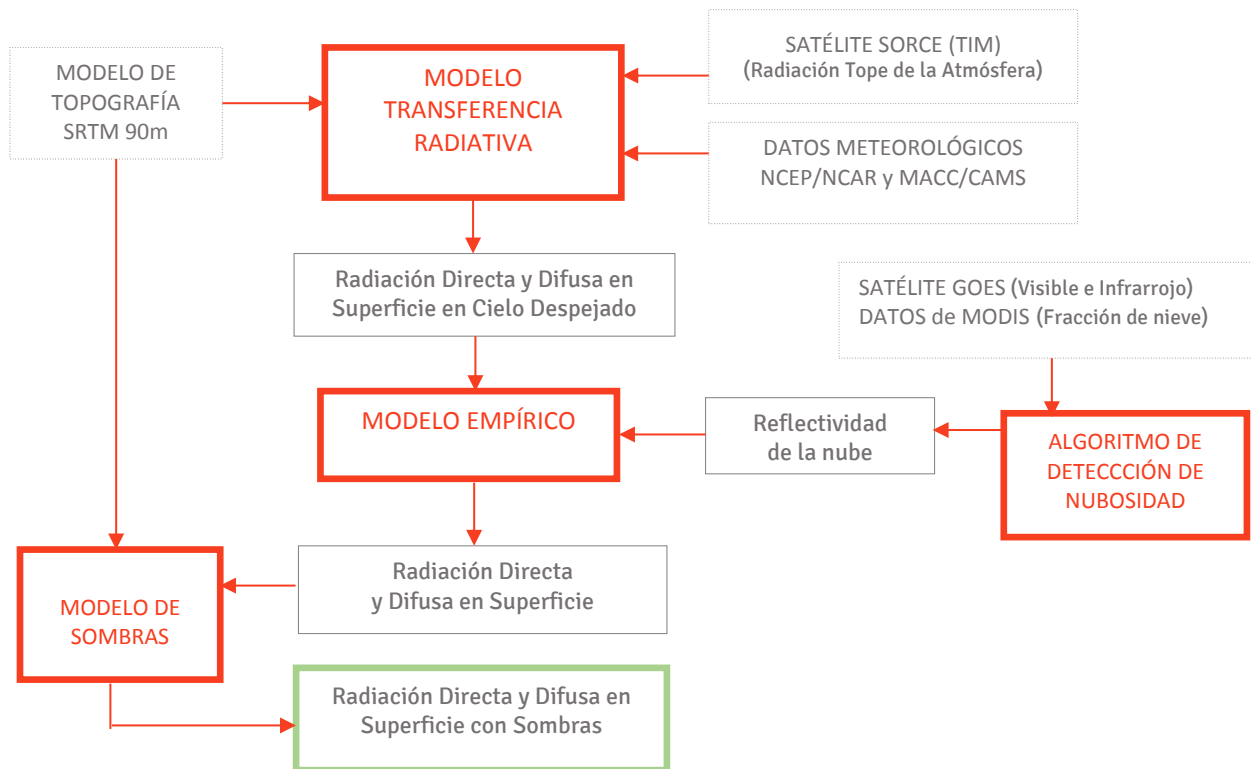


Figura 1: Esquema de metodología para el cálculo de radiación solar incidente en superficie.

1.1 Radiación en cielo despejado: Modelo de transferencia radiativa

Un modelo de transferencia radiativa es un conjunto de ecuaciones que considera todas las interacciones que tiene un rayo de luz proveniente del sol con los distintos componentes de la atmósfera. En el caso de este proyecto se está utilizando el modelo CLIRAD-SW (Chou y Suárez, 1999). El modelo CLIRAD-SW es un código de transferencia radiativa que se caracteriza por su eficiencia computacional y fue diseñado originalmente para modelos de circulación general de la atmósfera, que requieren realizar muchos cálculos radiativos a bajo costo computacional. El modelo separa la radiación del sol en 8 bandas espectrales y considera las interacciones de la atmósfera con la radiación en cada banda de forma independiente.

N° Bandas	Rango espectral (μm)	Absorción	Dispersión
1 - 4	UV: 0.175 - 0.4	O3	Rayleigh
		O2	
		CO2	
5	VIS: 0.4 - 0.7	O3	Rayleigh
		H2O	
		O2	
6 - 8	IR: 0.7 - 10	CO2	Rayleigh
		H2O	
		O2	

Tabla 1: Interacciones de las distintas bandas de radiación con los componentes de la atmósfera que son consideradas en el modelo.

Los componentes más importantes que interactúan con la radiación proveniente del sol son el ozono, el agua, el dióxido de carbono y los aerosoles, además de la atenuación producida por la dispersión de la luz al chocar con las distintas moléculas que componen la atmósfera.

El modelo considera una columna atmosférica, desde la superficie de la tierra hasta el tope de la atmósfera, con 100

niveles de altura (número que ha sido determinado de modo de minimizar el tiempo de ejecución sin perder precisión en el resultado). En el nivel superior ingresa la cantidad de radiación solar medida por el radiómetro TIM (Total Irradiance Monitor) a bordo del satélite SORCE, que considera la variabilidad de la radiación solar en el tope de la atmósfera generada tanto por el ciclo anual de la distancia al Sol como por los ciclos de actividad solar, corregida de acuerdo a la latitud de cada lugar, la fecha y la hora. El valor de la radiación solar en el tope de la atmósfera es para todos los efectos prácticos exacto.

Posteriormente, el modelo calcula cuanta radiación pasa a los niveles inferiores, para cada banda del espectro, de acuerdo a la temperatura de cada nivel, la humedad específica, la concentración de ozono, dióxido de carbono y aerosoles, y por supuesto considerando la dispersión, que dependerá de la masa atmosférica y de la geometría del rayo de luz.

Los campos de temperatura y humedad específica de toda la atmósfera han sido extraídos de los reanálisis NCEP/NCAR de la NOAA/ESRL Physical Sciences Division. Los reanálisis cuentan con información meteorológica histórica de gran escala cada 6 horas desde el año 1948 hasta el presente con una resolución espacial horizontal de 2.5×2.5 grados y 10 niveles verticales. Los reanálisis no son datos en estricto rigor, sino más bien, una combinación entre datos observacionales provenientes de la red mundial de radiosondeos y un modelo de circulación general, alimentado por dichos datos, que es entonces capaz de generar información meteorológica en lugares en donde no existen mediciones directas.

En el caso de los perfiles de ozono y CO2, el modelo de transferencia radiativa es alimentado con las concentraciones medias del planeta. Los aerosoles han sido extraídos de los reanálisis del proyecto MACC (Monitoring Atmospheric Composition and Climate) hasta el 2012 y CAMS a partir de entonces (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), que combinan la información del modelo ECMWF con datos de monitoreo de la composición atmosférica a nivel mundial, esta base de datos cubre el período 2003 en adelante, con datos cada 3 horas y una resolución horizontal de 25 kilómetros.

El espesor de cada columna es determinado de acuerdo a la altura del terreno en cada punto. Para Chile, se ha usado una topografía proveniente de la base de datos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de 90 metros de resolución.

Finalmente, con este modelo se obtiene la radiación global horizontal y la radiación directa horizontal en superficie, con una resolución espacial de 90 metros, bajo condiciones de cielo despejado.

1.2 Radiación en cielo con nubosidad

1.2.1 Modelo empírico simple de atenuación por nubosidad

Se ha calculado una función empírica para describir la relación entre el porcentaje de atenuación de la radiación producido por una nube y la reflectividad, o albedo, de ésta. Se han utilizado 82 estaciones que miden radiación global horizontal a lo largo de todo el país y para cada una se han detectado los instantes con nubosidad, usando un algoritmo que compara el ciclo diario observado con un ciclo diario sintético escalado para esa estación en la misma fecha.

Primero el modelo calcula una primera aproximación de la radiación en cielo con nubosidad (GHI_{nub0}), restándole a la radiación de cielo despejado (GHI_{desp}) la radiación reflejada por las nubes. El porcentaje de radiación reflejado por las nubes corresponde a la

reflectividad (r) medida por el satélite en el sitio donde hay nubosidad. Así, la radiación que llegaría a la superficie queda dada por

$$GHI_{nub0} = GHI_{desp} \cdot (1 - r)$$

Se ha encontrado una función cuadrática que relaciona esta radiación en cielo con nubosidad aproximada con la radiación en cielo con nubosidad medida (ver figura 2), de modo que

$$GHI_{nub} = A \cdot GHI_{nub0}^2 + B \cdot GHI_{nub0} + C$$

Esta función cuadrática da cuentas de las pérdidas de radiación por absorción dentro de la nube y por la sobreestimación de la reflectividad medida por el satélite, debido a que parte de la radiación detectada proviene de la reflexión en el suelo y el resto de la atmósfera.

Una metodología similar fue aplicada para determinar la radiación directa en caso de nubosidad. Para ajustar el modelo empírico fueron utilizadas las mediciones de radiación directa de la red del Ministerio de Energía y GIZ.

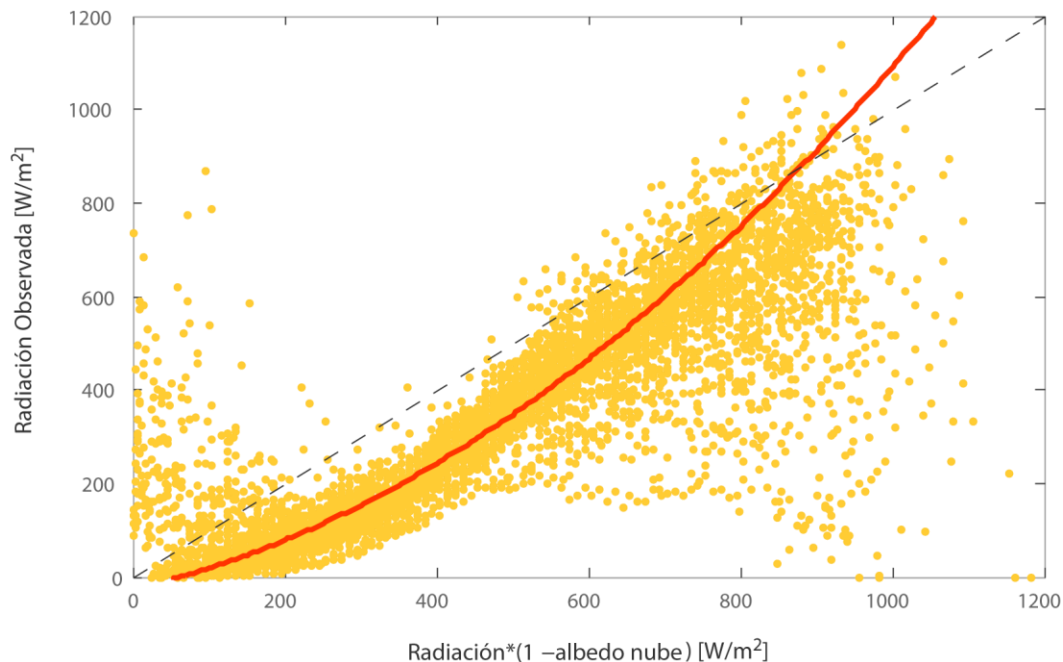


Figura 2: Diagrama de dispersión entre la radiación aproximada en condiciones de nubosidad (radiación de cielo despejado menos la radiación reflejada por la nube) y la radiación observada en los mismos instantes. La curva roja muestra la relación cuadrática entre estas dos variables.

1.2.2. Base de datos satelital

El proyecto GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) contiene, dentro de su red de satélites, al satélite GOES EAST que está ubicado en una órbita geoestacionaria a los 75 grados de longitud oeste, y por lo tanto, toma imágenes sobre el continente americano.

Se han utilizado las imágenes de los satélites GOES 12 durante el período 2004 a 2010 y GOES 13 durante el período 2010 en adelante. Las imágenes para el sector desde el límite con Perú y los 18 grados de latitud sur corresponden al segmento “Northern Hemisphere Extended” con una resolución temporal de 30 minutos durante casi todo el año, salvo eventos excepcionales en el hemisferio norte, en que la frecuencia se reduce a una imagen cada 3 horas. El sector entre 18 y 45 grados de latitud sur corresponde al segmento “Southern Hemisphere” con la misma resolución temporal.

Para el sector ubicado al sur de los -45 grados de latitud solo están disponibles las imágenes “Full Disk” que tienen una resolución temporal de una imagen cada 3.

Las imágenes son tomadas en 5 canales espectrales, uno visible y cuatro infrarrojos. Las imágenes del canal visible tienen una resolución espacial máxima de un kilómetro, mientras que las imágenes infrarrojas tienen una resolución espacial de aproximadamente 4 km.

Los datos obtenidos directamente del satélite vienen en unidades de “cuentas” (N) que deben ser transformadas para obtener variables meteorológicas relevantes. Para calcular la reflectividad (r) a partir de los datos del canal visible de GOES se ha utilizado el siguiente algoritmo:

$$r = (a + b \cdot N) \cdot f(t)$$

Donde a y b corresponden a constantes de calibración específicas de cada satélite y $f(t)$ es un coeficiente

que varía dependiendo la fecha y sirve para calibrar el cambio de sensibilidad de los sensores en el tiempo.

La temperatura de brillo (T) a partir de los datos de los canales infrarrojos se ha calculado como

$$T = \alpha + \beta \cdot \frac{1.4388 \cdot \mu}{\log(1 + \frac{1.1911 \cdot 10^{-5} \cdot \mu^3 \cdot m}{N - b})}$$

Donde α , β , μ , m y b corresponden a constantes de calibración específicas para cada satélite y banda espectral.

Se ha detectado que las imágenes del satélite presentan un pequeño corrimiento unas respecto a otras, no siempre en la misma dirección ni de la misma magnitud. Estas diferencias se deben a cambios en la proyección del satélite al tomar datos del mismo sitio en distintos momentos, probablemente por inestabilidad de éste.

En abril del 2010 comenzó a operar el satélite GOES 13 en reemplazo de GOES 12, que había estado en funcionamiento desde el año 2001. Este nuevo satélite presenta una mejor estabilidad y por lo tanto a partir de ese momento no existen diferencias notorias en la geolocalización entre un día y otro.

Además del problema de inestabilidad, se ha detectado que para algunos años todas las imágenes están corridas en la misma dirección.

En promedio las imágenes del 2006, 2009, 2010, 2012, 2013 y 2014 están 2 kilómetros corridas hacia el norte. Y los años 2004, 2005, 2007, 2008 y 2011 están 2 kilómetros corridas hacia el sur. Al corregir este corrimiento se logra que en promedio las imágenes estén en la misma ubicación, sin embargo, esto no corrige las diferencias entre una imagen y otra del satélite GOES12, que siguen teniendo corrimientos en cualquier dirección.

1.2.3. Detección de nubosidad en zona norte, centro y sur

Una vez obtenidas las series de tiempo de reflectividad en cada sitio, estas son primeramente utilizadas para determinar los pixeles con nubosidad a través de un algoritmo de clasificación de cielo despejado-cielo nublado.

El satélite detecta la radiación devuelta por un pixel desde la tierra, la cual puede provenir desde el suelo en caso de cielo despejado o desde las nubes en caso de cielo con nubosidad. Las nubes poseen un albedo mucho más alto que la superficie (excepto en suelos con nieve, hielo o salares), por lo tanto, el algoritmo busca un umbral que separe la radiación proveniente del suelo (cielo despejado) de la proveniente de una nube (cielo nublado).

El umbral que separa la radiación de cielo despejado de nublado es específico para cada lugar y es función de la radiación incidente en cielo despejado. Si la radiación incidente es alta, será más alta la reflectividad detectada por el satélite, aunque no haya nubes. El algoritmo busca separar la alta densidad de casos con cielo despejado, que poseen valores similares entre ellos, del resto de reflectividades mayores, que poseen una alta variabilidad de valores, pues distintos tipos de nubes pueden tener reflectividades muy distintas, pero siempre mayores a las de la superficie.

Dado que el algoritmo se basa en encontrar la alta densidad de puntos con cielo despejado, en los sitios donde predomina la presencia de nubosidad el algoritmo anteriormente descrito tiene problemas para encontrar la reflectividad de la superficie y por lo tanto discriminar entre horas con cielo despejado y nublado.

Es por esto que se ha omitido de la base de datos los lugares con más de 50% de tiempo con nubosidad, lo cual ocurre en la zona insular de las regiones de Aysén y Magallanes.

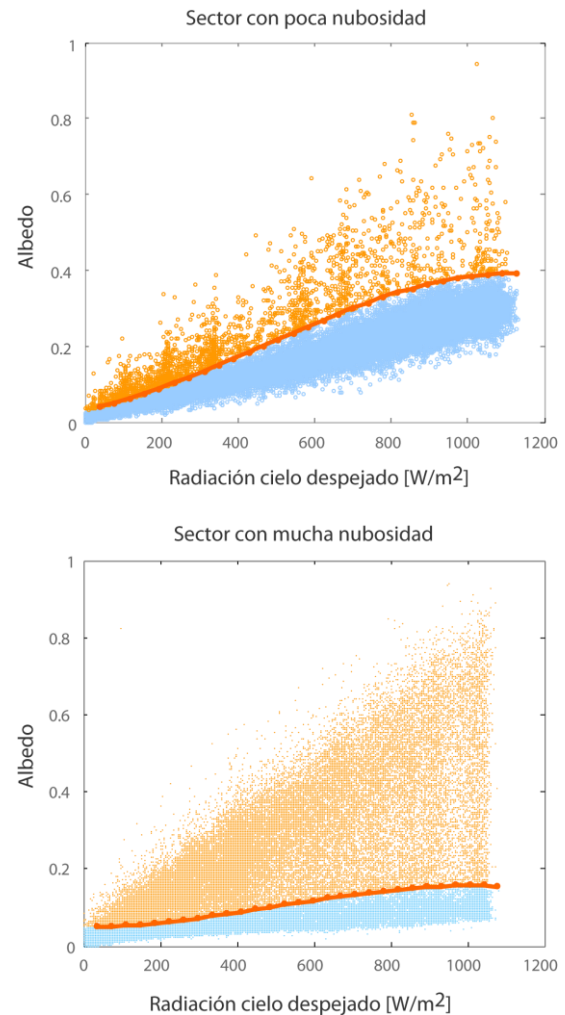


Figura 3: Ejemplos del algoritmo de detección de nubes. Los gráficos muestran el valor de la reflectividad versus la radiación de cielo despejado en distintos tiempos en un sitio. Los colores señalan la clasificación del algoritmo para cada tiempo en cielo despejado (puntos celestes) o cielo con nubosidad (puntos naranjos), la línea muestra el umbral establecido por el algoritmo. Arriba un sitio con baja frecuencia de nubosidad (desierto de Atacama) y abajo un sitio con alta frecuencia de nubosidad (Puerto Montt).

1.2.4. Detección de nubosidad en extremo sur del país

Como se explicó en el capítulo anterior, en el extremo sur del país, la alta frecuencia de nubosidad hace difícil el poder determinar el albedo superficial en cielo despejado, para poder fijar los umbrales de clasificación.

Se ha implementado otro algoritmo de detección de nubosidad para la zona austral, comprendida entre 45° y 56° de latitud sur. Esta metodología utiliza los canales infrarrojos centrados en 3900nm (banda 2) y 10710nm (banda 4). Estos canales se denominan “termales” pues los datos medidos por el satélite pueden ser convertidos a temperaturas de brillo de las superficies observadas (ver capítulo *Base de datos satelital*). El algoritmo implementado se basa en la metodología propuesta por Jedlovec and Kevin, 2003 para ser utilizado de forma operacional en el centro de clima e hidrología de la NASA.

En cada píxel se calcula la temperatura de brillo de ambos canales para todos los tiempos disponibles. Posteriormente, para cada hora del día se calcula la diferencia entre las temperaturas de brillo de las bandas 4 y 2

$$D(h_i) = T_{B4}(h_i) - T_{B2}(h_i)$$

Para cada tiempo, se usan los valores de los 20 días previos para calcular el máximo de las diferencias negativas y el mínimo de las diferencias positivas, es decir:

$$D_{NEG} = \max(D(h_{i-21}), \dots, D(h_{i-1})) \text{ para } D(h_i) < 0$$

$$D_{POS} = \min(D(h_{i-21}), \dots, D(h_{i-1})) \text{ para } D(h_i) > 0$$

Luego, se compara el valor de la diferencia para cada tiempo, con el compuesto de los 20 días anteriores, para determinar si ese instante estuvo nublado (icloud=1):

$$icloud = 1 \text{ si } |D(i) - D_{NEG}| < 5.1 \text{ K para } D(i) < 0$$

$$icloud = 1 \text{ si } |D(i) - D_{POS}| < 2.0 \text{ K para } D(i) > 0$$

Finalmente, se aplica un filtro para nubes altas, en que se compara la temperatura de la banda 4 con la máxima temperatura de los últimos 20 días. Si la temperatura es al menos 18 grados menor a la máxima de los últimos 20 días, para una hora en particular, se considera ese instante nublado.

Si bien este algoritmo podría ser utilizado en todo el país, debido a que las imágenes infrarrojas poseen una menor resolución espacial, se ha privilegiado el uso de las imágenes del canal visible para la detección de nubosidad en las zonas del país donde el algoritmo descrito en el capítulo anterior funciona.

1.2.5. Sectores con nieve

El algoritmo de detección de nubes, que usa las imágenes del canal visible, encuentra los pixeles con albedos más altos que los valores típicos de albedo de la zona. Esto genera errores cuando hay nieve, pues el albedo de la nieve es similar o más alto que el de las nubes. Para corregir esto, se utiliza la información de los satélites MODIS AQUA y MODIS TERRA, que al ser de órbita polar, toman imágenes sobre el territorio nacional dos veces al día cada uno. Con estos datos la NASA ha generado un producto de

cobertura de nieve con frecuencia diaria (en promedio 363 imágenes al año) para cada satélite.

Se han utilizado los datos desde el 2004 al 2015 de cobertura nival para el territorio chileno comprendido entre 17 y 45 grados de latitud sur, para ambos satélites MODIS.

La información cruda que se descarga desde el sitio web de MODIS viene con proyección sinusoidal, que

es la que utiliza el satélite. Se ha procedido a procesar todos los datos con la herramienta Modis Reprojection Tool para dejar la información con proyección geográfica (latitud-longitud).

En el producto de nieve de MODIS también se detecta la nubosidad, pues cuando hay nubes, MODIS no distingue si debajo hay nieve o no. Por lo tanto, los píxeles de MODIS están clasificados en: tierra/agua, nieve o nube. Luego de clasificar cada pixel de MODIS, para cada tiempo de GOES se busca la imagen MODIS más cercana y se procede a realizar la clasificación de cielo despejado o nublado de la siguiente manera:

MODIS	Acción
Tierra/Agua	Detectar nubes con algoritmo GOES
Nieve	Cielo despejado
Nubes	Detectar nubes con algoritmo GOES

El algoritmo de corrección de GOES utiliza la imagen más cercana en tiempo de MODIS, por lo que, si un píxel está nublado en MODIS, se utilizarán las imágenes de GOES para calcular la radiación en todo el período de tiempo cercano a esa imagen. Si hubiera nieve debajo de la nube y se despeja dentro de ese período de tiempo, el algoritmo de detección de nubes de GOES verá la nieve como nube y se subestimarán la radiación.

Por el contrario, si el pixel de MODIS tiene nieve, se considerará radiación de cielo despejado para todos los tiempos cercanos a esa imagen. Por lo tanto, si se nubla dentro de ese período de tiempo, se sobreestimarán la radiación. Se espera que estos dos tipos de error se compensen a la larga y los valores estadísticos de la radiación en la zona sean similares a la realidad. Pero a nivel horario podrían producirse grandes diferencias entre las series modeladas y observadas durante los períodos con nieve.

1.3. Aerosoles en áreas urbanas

El efecto de los aerosoles en la radiación ha sido tomado en cuenta a gran escala en el cálculo de radiación para cielo despejado. Sin embargo, debido a la baja resolución espacial de la base de datos de aerosoles de los reanálisis MACC, no se logra representar las altas concentraciones observadas en zonas urbanas.

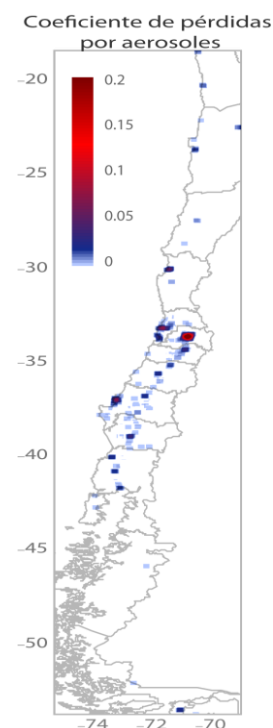
Los aerosoles, dependiendo de su composición, absorben y/o dispersan la radiación directa. La radiación que es absorbida se pierde, sin embargo, una fracción de la radiación dispersada llega a la superficie en forma de radiación difusa.

Por este motivo, se ha hecho una corrección adicional a ambas componentes de la radiación. El factor de corrección (c) es máximo en Santiago, con un valor de 20% de pérdida de la radiación directa, y decrece proporcionalmente según la densidad de población en cada píxel en el resto del país.

Figura 4: Mapa con la ubicación de los centros urbanos considerados en la corrección de la radiación por efecto de la alta concentración de aerosoles. Los colores muestran el factor de corrección usado en cada zona.

$$Dir_{correctada} = Dir \cdot (1 - c)$$

$$Dif_{correctada} = Dif + 0.5 \cdot c \cdot Dir$$



1.4. Sombras debido a la topografía

La presencia de la cordillera de los Andes y de muchos otros cordones montañosos a lo largo de todo el país tiene un efecto importante en la radiación, debido a la sombra que proyectan los cerros a ciertas horas del día, especialmente en los sectores donde la topografía es más abrupta.

Los cálculos de radiación en el modelo de transferencia radiativa consideran con precisión la altura de cada sitio, usando un modelo digital de topografía de 90 metros de resolución. Sin embargo, en esa etapa no se consideran las sombras que pueden generar los cerros circundantes sobre la zona de interés.

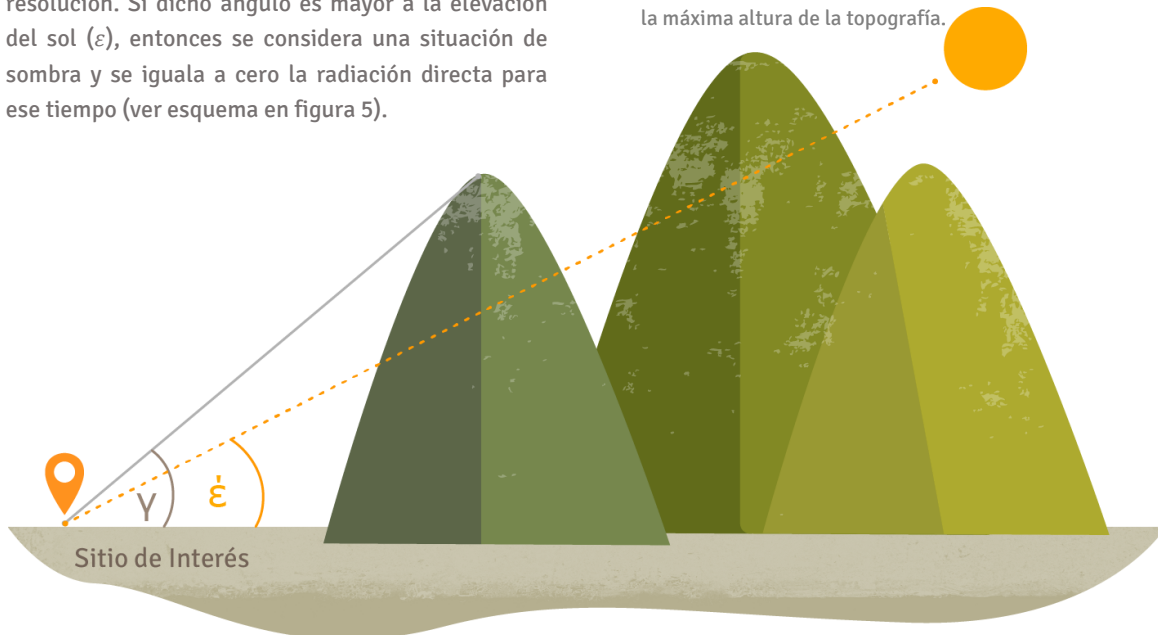
Para incorporar este efecto, se ha hecho una corrección posterior, en la cual, una vez seleccionado un sitio, para cada tiempo se calcula la posición del sol (acimut y elevación), y en esa dirección se busca hasta 180 kilómetros de distancia, desde el sitio seleccionado, la máxima elevación de la topografía (γ), que corresponde al ángulo entre el suelo y la altura del cerro, usando el modelo de elevación digital SRTM de 90 metros de resolución. Si dicho ángulo es mayor a la elevación del sol (ϵ), entonces se considera una situación de sombra y se iguala a cero la radiación directa para ese tiempo (ver esquema en figura 5).

$$\text{Radiación Global} = \begin{cases} \text{Directa} + \text{Difusa}, & \gamma < \epsilon \\ \text{Difusa}, & \gamma \geq \epsilon \end{cases}$$

El límite de 180 kilómetros de distancia, para la búsqueda del máximo de elevación de la topografía, se debe a que, debido a la curvatura de la tierra, los lugares más lejanos no son visibles.

Además de la importancia de considerar las sombras para el cálculo de la disminución de la radiación recibida en un punto, el conocer la ubicación de los obstáculos topográficos más altos permite optimizar la instalación de los paneles, intentando ubicarlos mirando hacia donde haya la mayor cantidad de cielo y así captar la mayor cantidad de radiación difusa, especialmente en lugares encajonados por los cerros.

Figura 5: Esquema de búsqueda de sombras debido a la topografía. El ángulo de color negro representa la máxima elevación de la topografía en la dirección del sol. El ángulo de color amarillo representa la elevación del sol a una cierta hora. En este caso, la elevación de la topografía es mayor a la del sol, por lo tanto, es una situación de sombra en el sitio de interés. Nótese que la máxima elevación no necesariamente coincide con la máxima altura de la topografía.



2 Validación de los resultados del modelo

2.1 Base de datos de mediciones

Se ha recopilado una base de datos de 131 estaciones que miden la radiación global horizontal a lo largo del país. Los datos provienen de las redes de medición CEAZA-MET, AGROMET-INIA, DMC, Ministerio de Energía-GIZ y estaciones privadas. En el mapa de la figura 6 se muestran las ubicaciones de las estaciones. Se puede observar que existe una buena cobertura a nivel nacional, por lo que se ha podido validar el explorador para distintas condiciones climáticas.

Se ha realizado una evaluación de todas las estaciones y se han clasificado en categoría 1 (67 estaciones), categoría 2 (64 estaciones). Las estaciones de categoría 1 son las de mejor calidad, poseen tendencias pequeñas o nulas y se han eliminado la mayor cantidad de datos extraños. Estas estaciones pueden ser usadas para validar la magnitud de la radiación en distintas escalas de tiempo. Las estaciones de categoría 2 poseen grandes tendencias en los datos y mucha variabilidad entre distintos años o meses. Se ha intentado corregir los errores más evidentes, sin embargo, no se puede determinar si la magnitud de la radiación es confiable. Estas estaciones no se pueden utilizar para validar la radiación del explorador solar, pero han sido utilizadas para validar el algoritmo de detección de nubes.

Se cuenta, además, con mediciones de radiación directa normal de la estación Crucero II, ubicada en la región de Antofagasta, con datos entre agosto de 2012 y diciembre de 2014, y con 11 estaciones que miden radiación global y difusa en sistema de seguimiento HSAT (red Ministerio de Energía-GIZ).

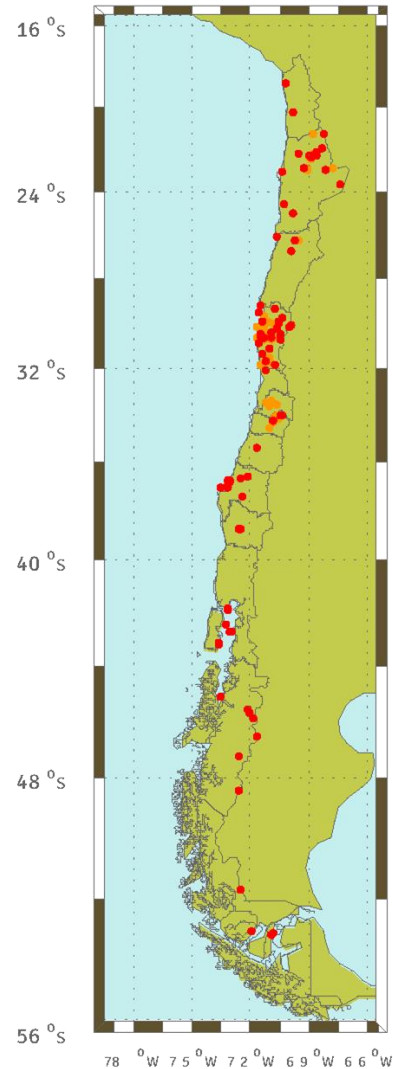


Figura 6: Mapa con ubicación de las estaciones usadas en la validación del cálculo de radiación y detección de nubosidad del Explorador Solar. En rojo las estaciones catalogadas de categoría 1 según su calidad y en naranja las estaciones de categoría 2.

2.2 Validación de la detección de nubosidad

Se ha implementado un algoritmo para determinar en una serie de radiación observada las horas en que hubo nubosidad. Se ha comparado la clasificación entre nubosidad y cielo despejado del modelo con la clasificación hecha para las observaciones. Para estos cálculos se han utilizado las 131 estaciones disponibles en la base de datos.

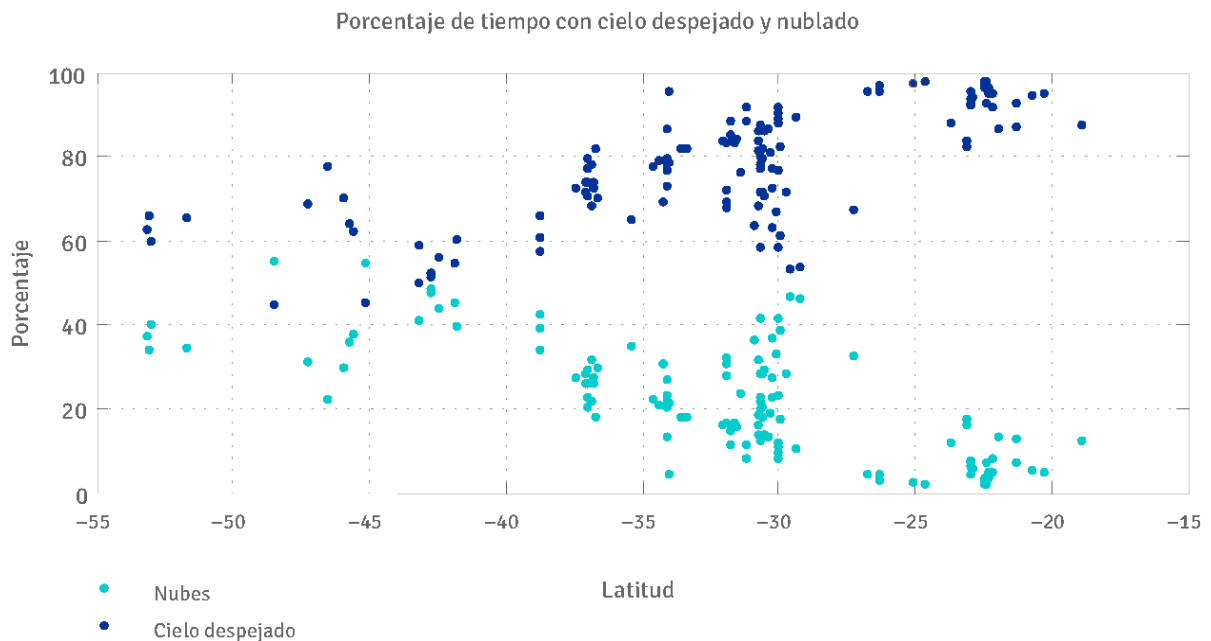
De acuerdo a las observaciones (ver figura 7), en la zona norte del país (al norte de -27° de latitud) la mayor parte de las estaciones presenta nubosidad en horario diurno menos de un 20% del tiempo, llegando en algunas estaciones a ser menos de un 5% del tiempo. La mayoría de las estaciones ubicadas entre -27° y -35° de latitud presentan nubosidad entre un 20% y un 30% del tiempo. Sin embargo, al sur de -35° de latitud la nubosidad va aumentando su frecuencia llegando a ser entre un 40% y un 50% del tiempo en la zona más austral.

El modelo logra determinar con éxito si se está en presencia de nubosidad o no un 95% del tiempo, en promedio, en la zona norte y centro del país (ver figura 8). Sin embargo este porcentaje va disminuyendo desde -38° de latitud hacia el sur, llegando a ser en promedio un 80% al sur de la latitud -45° .

En la zona norte se detecta un 60% de las nubes observadas. Esto puede deberse a dos factores principalmente, errores en la detección de cirrus, que son nubes casi transparentes en la banda visible del espectro y que por lo tanto tienen reflectividades en el canal visible similares a las del terreno o errores en la detección de cúmulos de origen convectivo, los cuales pueden tener escalas espaciales y temporales menores a la resolución del satélite GOES (1 kilómetro). Estos errores no tienen un impacto en la radiación, pues el tiempo con nubosidad corresponde a menos de un 5% del tiempo.

En zonas donde la frecuencia de nubosidad es muy alta, las nubes presentan una alta variabilidad de albedos y temperaturas, por lo tanto, en los casos en que la nube tiene características similares a las del terreno (por ejemplo, nubes muy bajas o neblina), el algoritmo no es capaz de diferenciar entre la condición de cielo despejado y nublado. Por este motivo el modelo va incrementando su incertidumbre al sur de los -38° de latitud.

Figura 7: Cada punto representa el porcentaje de tiempo diurno con nubosidad (puntos celestes) o con cielo despejado (puntos azules) en una estación, de acuerdo a los datos observados.



Finalmente, se debe considerar posibles errores en los datos observados, pues la validación está basada en la detección de nubes en series observadas, lo cual considera como nubosidad cualquier

disminución de la radiación respecto a la radiación de cielo despejado esperada. Esto quiere decir que se podría estar sobreestimando la nubosidad observada en estaciones afectadas por sombras.

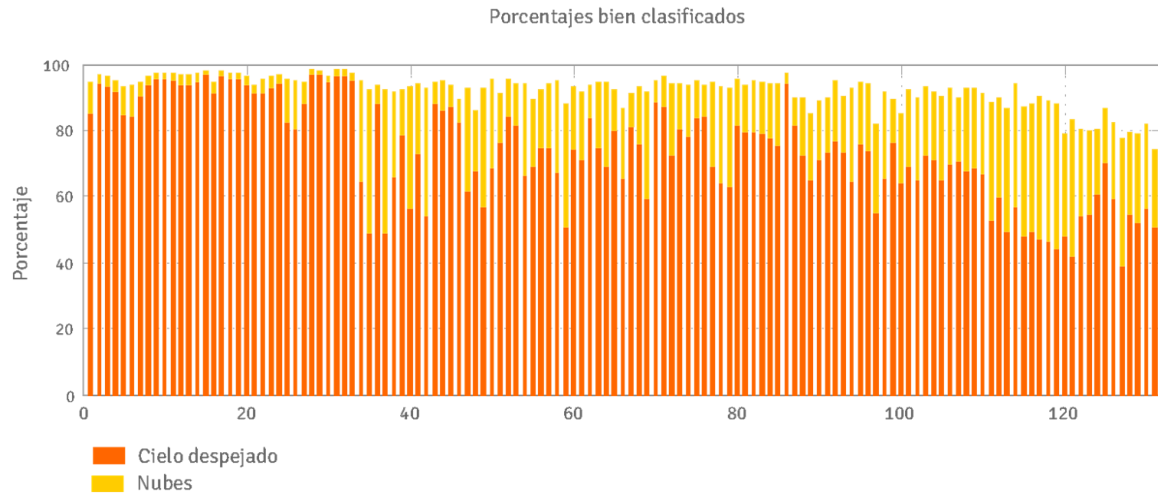


Figura 8: La longitud total de cada barra muestra el porcentaje total de horas bien clasificadas en una estación, los colores representan los porcentajes de horas con cielo despejado y con nubosidad bien clasificados. Se han ordenado las 131 estaciones de norte a sur (izquierda a derecha).

2.3 Validación de la radiación global horizontal

Para hacer un análisis del desempeño del modelo bajo distintas condiciones climáticas se han separado las estaciones según su ubicación en los siguientes grupos:

Norte	-17° a -30° de latitud
Centro	-30° a -40° de latitud
Sur	-40° a -56° de latitud

Para cada estación se ha calculado la insolación diaria (integral de la radiación en 24 horas) en todo el período con datos y se ha comparado con la insolación diaria simulada para los mismos tiempos (ver figura 9).

Se han calculado el sesgo y el error cuadrático medio (RMSE) del modelo para las series de insolación diaria. En la tabla 2 se muestran los promedios de los sesgos y RMSE de las estaciones agrupadas según su ubicación.

Zona	Estaciones	SESGO [%]	RMSE [%]
Norte	24	-1.3	5,7
Centro	26	-0.4	9,6
Sur	17	0.9	16,7
TOTAL	67	-0.38	10,0

Tabla 2: Número de estaciones usadas en el cálculo, promedio del sesgo y del error cuadrático medio de las series de insolación diaria de las estaciones agrupadas según su ubicación.

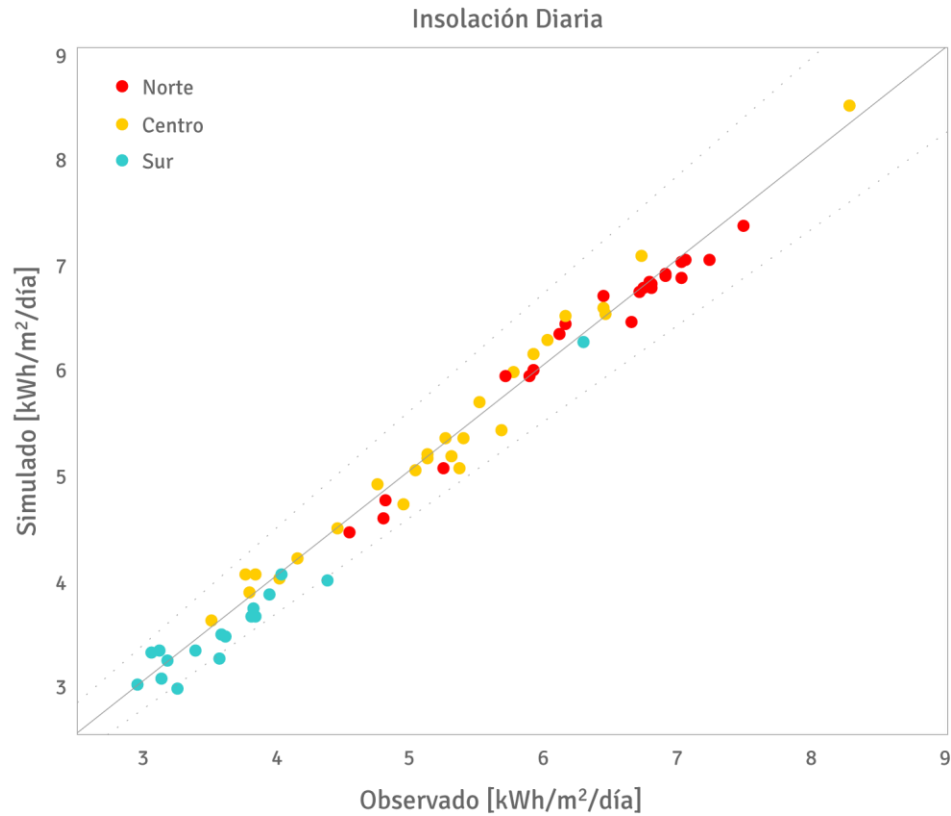


Figura 9: Radiación promedio medida para cada estación versus la radiación modelada en el mismo sitio clasificados según su ubicación. Las líneas punteadas marcan el límite del 10% de diferencia.

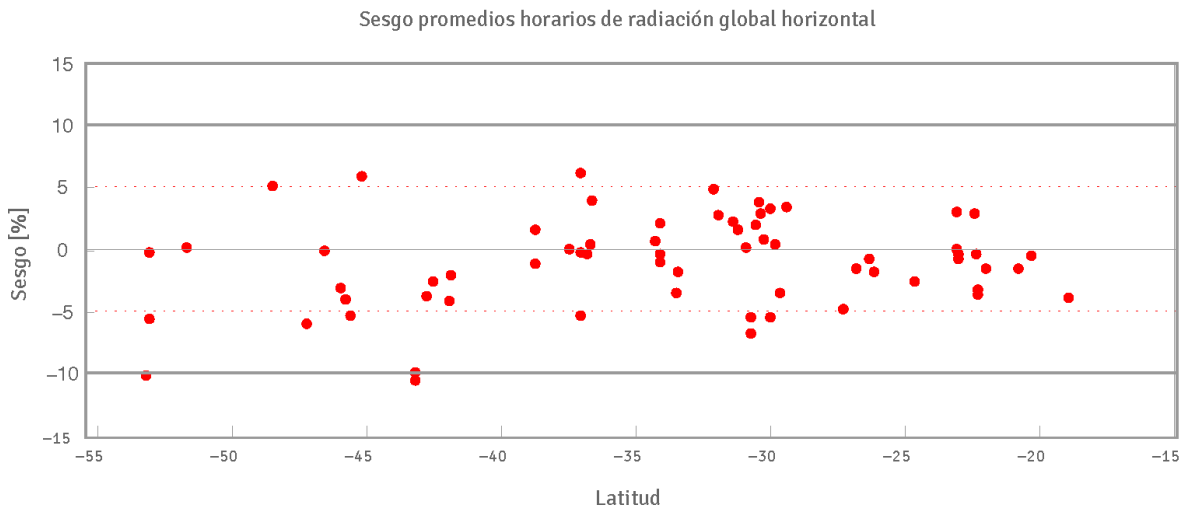


Figura 10: Cada punto representa el sesgo promedio de la radiación media horaria modelada en cada estación.

También se han calculado los sesgos de las series horarias de radiación para cada estación, considerando solo los datos en horario diurno. En la figura 10 se puede ver que, si bien existe variabilidad en los sesgos entre estaciones, en la mayoría de éstas el modelo logra representar la radiación a nivel horario con diferencias con las observaciones, en promedio, menores al 5% para las estaciones al norte de 40° de latitud. Al sur de 40° de latitud, aumenta el sesgo en algunas estaciones, pero la mayoría se mantiene dentro del rango de un 10% de diferencia.

Las diferencias pueden deberse a errores del modelo en la detección de nubes, en la modelación de la atenuación de la radiación con la nubosidad o errores en la modelación de cielo despejado debido a la baja resolución espacial y temporal de los datos de entrada (aunque este tipo de error no debería superar el 2%). Pero también hay que considerar que la mayoría de las estaciones posee errores en las mediciones de radiación por falta de limpieza de los sensores, sombras del entorno, errores de calibración, sensores con alto porcentaje de incertidumbre (como los piranómetros Licor), entre otros, por lo que es razonable obtener diferencias de hasta un 5% y es comparable con la incertidumbre misma de las mediciones.

En la zona norte el modelo presenta sesgos menores al 5% para la radiación de cielo despejado, sin embargo para el cielo con nubosidad el modelo tiende a sobreestimar la radiación. Esto se debe a una subestimación en la detección de nubosidad en la zona, como se explicó en el capítulo anterior. Debido a la baja frecuencia de nubosidad en la zona estos errores no tienen un impacto mayor en las estadísticas de los resultados del modelo para la radiación, encontrándose un sesgo cercano a cero en este sector.

En la zona central el modelo representa bien tanto el cielo despejado como el nublado. Para cielo despejado, en todas las estaciones, el sesgo es menor al 10%, solo en un 15% de las estaciones se encuentran sesgos mayores al 10% en horas con nubosidad. De todos modos, el sesgo de las series horarias completas no supera el 10% en ninguna estación.

El extremo sur posee los errores más importantes, tanto en cielo despejado como nublado, por el problema en la detección de nubosidad, como se explicó anteriormente. Además, la mayoría de estas estaciones presenta nieve en el invierno, lo que también aumenta la incertidumbre. Se sugiere tomar la información al sur de -40° de latitud como referencial y tener en cuenta el alto grado de incertidumbre en los datos horarios.

2.4 Validación de la radiación directa

Se cuenta solo con información de una estación que mide directamente la radiación directa normal (DNI). Se han usado los datos de esta estación para validar la metodología de cálculo de DNI del explorador solar.

Se ha calculado la insolación diaria observada y simulada para el período de los datos y se observa que el modelo tiende a sobreestimar la DNI especialmente en días con nubosidad. El modelo presenta un sesgo promedio de 5.5% y un error cuadrático medio de un 15% para los datos horarios.

La radiación directa se ve influenciada fuertemente por los aerosoles. Si bien el modelo considera aerosoles, esta base de datos no ha sido validada para Chile y posee una baja resolución espacial. Aun así, los sesgos que se presentan en esta estación son bajos y se pueden utilizar los datos de DNI como referencia, considerando una incertidumbre de un 5%.

Las estaciones de la red del Ministerio de Energía y GIZ poseen mediciones en 11 estaciones de radiación global y difusa en un sistema de seguimiento de eje horizontal (HSAT). A partir de estas observaciones se puede calcular la radiación directa HSAT. Se han utilizado estos valores para validar la radiación directa del modelo.

Los resultados del modelo para la radiación directa HSAT en esos 11 sitios muestran un sesgo promedio de 4% y un RMSE de 11% para las series horarias, similar a lo encontrado para la estación de DNI en Crucero. En la figura 11 se puede ver una buena correlación entre la insolación diaria observada y modelada en cada estación. Las estaciones donde se observa mayores diferencias corresponden a lugares con más alta frecuencia de nubosidad, que son los días donde el modelo presenta los mayores errores.

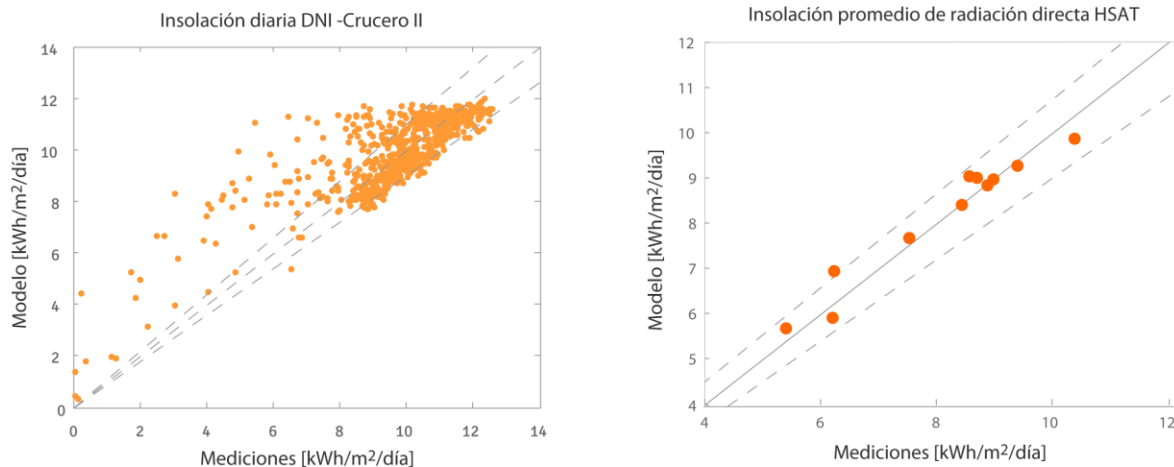


Figura 11: Izquierda: Insolación diaria de la radiación directa normal, medida (eje x) y simulada (eje y) en la estación Crucero II para todos los días con datos. Derecha: Insolación diaria de la radiación directa HSAT, medida (eje x) y simulada (eje y) en las 11 estaciones de la red Ministerio de Energía-GIZ, para el período con datos disponibles.

3 Construcción de la base de datos

Con la metodología descrita en los capítulos 2 y 3 se ha calculado la radiación solar incidente en la superficie de Chile continental (-17° a -56° de latitud) y en las islas de Pascua y Robinson Crusoe, con una resolución espacial de 90 metros.

Para cada píxel se ha calculado la radiación de cielo despejado cada 10 minutos. Posteriormente, se ha detectado la nubosidad para todas las imágenes satelitales GOES disponibles en el sitio. En promedio 20 imágenes al día, en horario diurno, al norte de 45° de latitud y 4 imágenes al día al sur de 45° de latitud. Para cada tiempo de la serie de radiación de cielo despejado se ha utilizado la condición de nubosidad más cercana y se ha calculado la radiación en cielo con nubosidad usando un modelo empírico. Finalmente, se han calculado los instantes con sombra debido a la topografía y se han corregido las series de radiación directa y global.

Se han promediado los valores de radiación para cada hora, obteniéndose una base de datos de radiación global horizontal, directa horizontal y difusa horizontal con resolución horaria, entre el 1 de Enero de 2004 y el 31 de Diciembre de 2015. La cual se encuentra disponible en el sitio web del Explorador Solar del Ministerio de Energía.

4 Referencias

Chou M. and Suarez M. (1999). A solar radiation parameterization for atmospheric studies, Tech. Rep., NASA/TM-1999-104606, 40 pp.

Hillger, D. & Schmit, T. The GOES-13 science test: Imager and sounder radiance and product validations US Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data and Information Service, 2007

Jedlovec, Gary J., and Kevin Laws. "P1. 21 GOES CLOUD DETECTION AT THE GLOBAL HYDROLOGY AND CLIMATE CENTER."

Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J. & others The NCEP/NCAR reanalysis project Bull. Am. Meteorol. Soc, 1996, 77, 437-471

Kopp, G. & Lawrence, G. The total irradiance monitor (TIM): Instrument Design The Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE), Springer, 2005, 91-109