

# Contenido

[1 Contenido 2](#_Toc75958867)

[2 Cálculo de radiación 3](#_Toc75958868)

[2.1 Radiación en cielo despejado: Modelo de transferencia radiativa 4](#_Toc75958869)

[2.2 Radiación en cielo con nubosidad 5](#_Toc75958870)

[2.2.1 Modelo empírico simple de atenuación por nubosidad 5](#_Toc75958871)

[2.2.2 Base de datos de nubosidad 6](#_Toc75958875)

[2.3 Aerosoles en Santiago 9](#_Toc75958876)

[2.4 Sombras debido a la topografía 10](#_Toc75958877)

[3 Validación de los resultados del modelo 11](#_Toc75958878)

[3.1 Base de datos de mediciones 11](#_Toc75958879)

[3.2 Validación de la radiación global horizontal 11](#_Toc75958880)

[3.3 Validación de la radiación directa 13](#_Toc75958881)

[4 Base de datos 14](#_Toc75958882)

[4.1 Comparación de versión 2017 con versión 2020 15](#_Toc75958883)

[5 Referencias 17](#_Toc75958884)

# 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, 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.

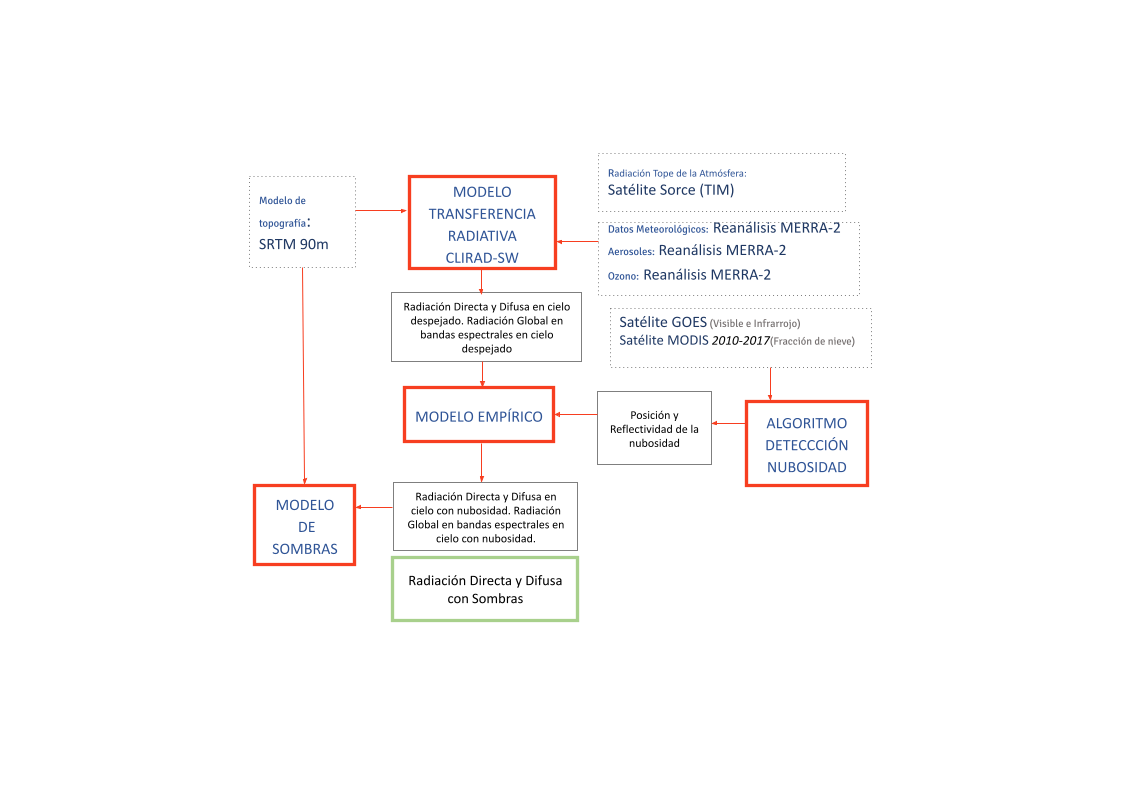
Estos resultados pueden ser mejorados considerablemente cuando se utilizan imágenes satelitales para incorporar la variabilidad de la nubosidad.

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

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

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.

## Radiación en cielo despejado: Modelo de transferencia radiativa

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

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.

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 atmosfera.

El modelo considera una columna atmosférica, desde la superficie de la tierra hasta el tope de la atmósfera, con 72 niveles de altura. 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 con 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 con 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 ozono, aerosoles, temperatura y humedad específica de toda la atmósfera han sido extraídos de la base de datos Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) calculada por el Global Modeling and Assimilation Office de la NASA. Los reanálisis cuentan con información meteorológica histórica de gran escala cada 3 horas desde el año 1980 hasta el presente con una resolución espacial horizontal de 0.5 x 0.5 grados y 72 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, estaciones meteorológicas de superficie, datos satelitales 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.

El espesor de cada columna es determinado de acuerdo con 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.

## Radiación en cielo con nubosidad

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 (), restándole a la radiación de cielo despejado () la radiación reflejada por las nubes. El porcentaje de radiación reflejado por las nubes corresponde a la reflectividad () medida por el satélite en el sitio donde hay nubosidad. Así, la radiación que llegaría a la superficie queda dada por

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

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.

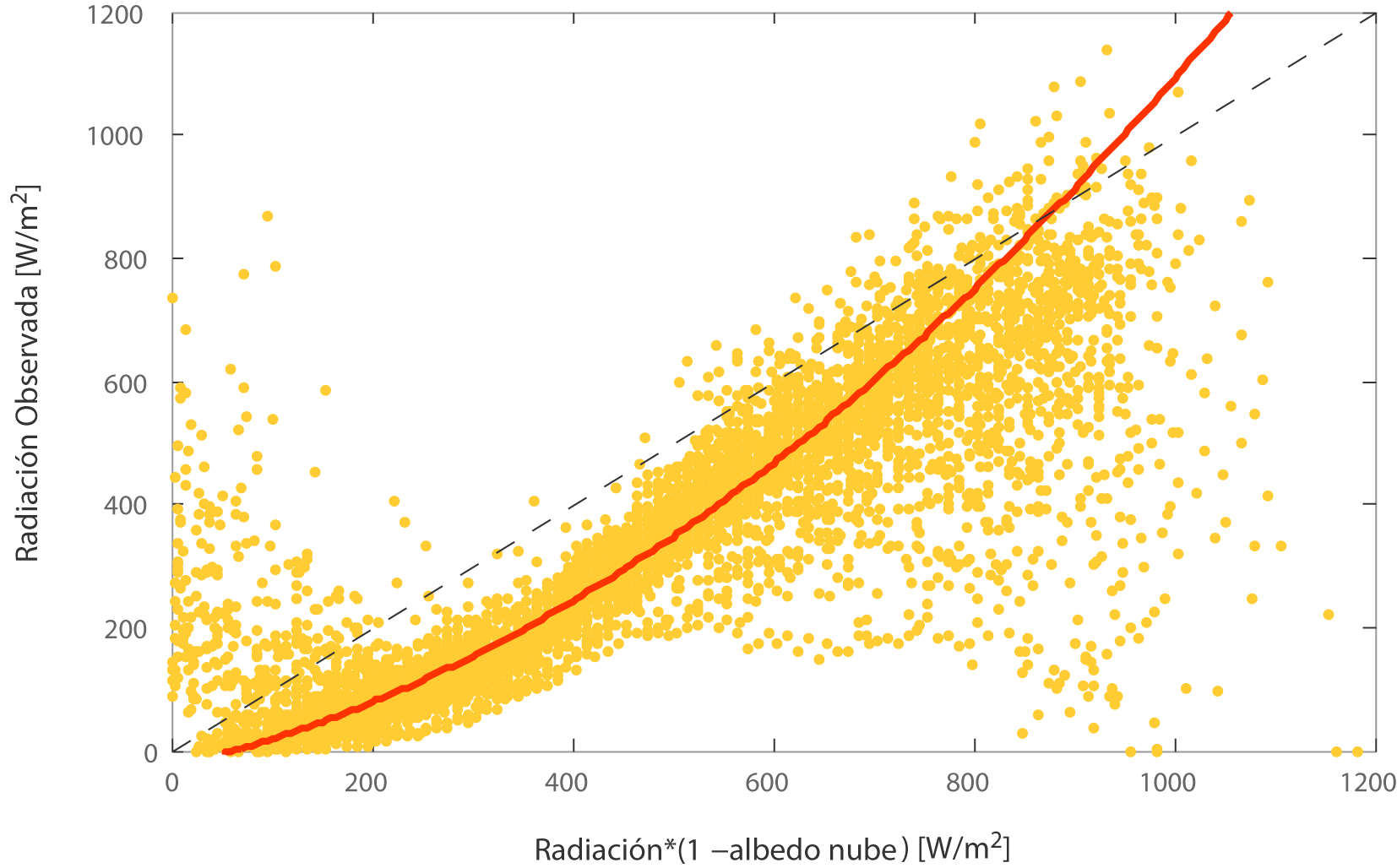


Figura 2: Diagrama de dispersión entre la radiación aproximada en condiciones de nubosidad (radiación de cielo despejado menos la radiación reflejada por la nube) y la radiación observada en los mismos instantes. La curva roja muestra la relación cuadrática entre estas dos variables.



Base de datos de nubosidad

Para determinar si un píxel de la base de datos está nublado o despejado en cada hora se han aplicado una serie de pruebas estadísticas utilizando las imágenes en distintas bandas espectrales tomadas por los satélites GOES 12 durante el período 2004 a 2010, GOES 13 durante el período 2010 a 2017 y GOES 16 de 2018 en adelante.

El proyecto GOES (Geostationary Operational Enviromental 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 toma imágenes sobre el continente americano durante las 24 horas del día, lo cual alcanza a cubrir todo el territorio chileno continental e insular.

Procesamiento de las imágenes satelitales

Las imágenes de los satélites GOES 12 y GOES 13 están divididas en dominios. Para este proyecto se han utilizado los siguientes: el sector desde el límite con Perú hasta los 18 grados de latitud sur corresponde al dominio “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 dominio “Southern Hemisphere” con la misma resolución temporal. Y para el sector ubicado al sur de los 45 grados de latitud sur solo están disponibles las imágenes “Full Disk” que tienen una resolución temporal de una imagen cada 3 horas.

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" () que deben ser transformadas para obtener variables meteorológicas relevantes. Para calcular la reflectividad () a partir de los datos del canal visible de GOES se ha utilizado el siguiente algoritmo:

Donde y corresponden a constantes de calibración específicas de cada satélite y 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 ( ) a partir de los datos de los canales infrarrojos se ha calculado como

Donde , , , y 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 geolocación entre un día y otro.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| A | Imagen que contiene computadora  Descripción generada automáticamenteB | Imagen que contiene computadora  Descripción generada automáticamenteC |
| Imagen que contiene reloj  Descripción generada automáticamenteD |

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.

El satélite GOES 16 entrega información cada 15 minutos en 16 bandas espectrales con una resolución espacial de 0.5 km en la banda visible (banda 2) y 2 km en las bandas infrarrojas. La alta resolución espectral del satélite GOES 16 permite calcular productos meteorológicos con mayor certeza que lo que permitían los datos de los satélites anteriores.

Figura 3: A: Dominio Full Disk de GOES 16 en coordenadas en radianes. B, C y D: Sub dominios extraídos de la imagen FULL DISK de GOES 16 y transformados a coordenadas geográficas, de Chile continental (B), Isla de Pascua (C), Isla Robinson Crusoe (D).

El territorio chileno está contenido en el dominio “Full Disk”. Estas imágenes están en un sistema de coordenadas centradas en la posición del satélite y la coordenada de cada píxel es el ángulo en radianes desde dicha posición. Para ser usadas en el modelo de radiación ha sido necesario georeferenciar las imágenes en coordenadas latitud-longitud y además se han seccionado los sub-dominios Chile continental, Isla de Pascua e Isla Robinson Crusoe para optimizar el tiempo de cálculo.

Algoritmo de detección de nieve

Antes de usar los algoritmos para detectar la nubosidad debemos saber si el píxel tiene nieve o no. Debido a que la nieve tiene un albedo similar al de las nubes, la prueba de detección de nubosidad que ocupa los datos de la banda visible no distingue entre estas dos condiciones.

Debido a la resolución espectral de GOES 12 y GOES 13, no es posible usar los datos de GOES para distinguir la nieve de las nubes, por lo que se han utilizado los datos de cobertura nival de MODIS en los satélites AQUA y TERRA, que poseen una frecuencia diaria con 1 kilómetro de resolución espacial. Estas imágenes se han reproyectado en coordenadas geográficas y se han interpolado espacialmente para coincidir con las imágenes GOES para todo el período 2004 a 2017 para el territorio chileno continental comprendido entre 17 y 45 grados de latitud sur.

Los píxeles de las imágenes de cobertura de nieve de MODIS están clasificados en: tierra/agua, nieve o nube. Para proceder a clasificar un píxel como nublado o despejado se usa para cada imagen de GOES la imagen MODIS más cercana en tiempo. Para cada píxel de GOES se busca el píxel correspondiente de MODIS y se usa el siguiente algoritmo:

* MODIS detecta nube: Se usa el algoritmo con GOES para clasificar si está nublado o no.
* MODIS detecta tierra/agua: Se usa el algoritmo con GOES para clasificar si está nublado o no.
* MODIS detecta nieve: Se considera que el píxel está despejado.

Debido a que la imagen de MODIS puede tener unas horas de diferencia con la imagen de GOES pueden ocurrir los siguientes errores:

* Hay nieve en la superficie, MODIS detecta nube, pero a la hora de la imagen GOES ya está despejado: GOES verá un píxel blanco y lo clasificará erróneamente como nube.
* Hay nieve en la superficie, MODIS detecta nieve, pero a la hora de la imagen GOES está nublado: el algoritmo anterior clasificará este píxel como despejado.

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 (promedios mensuales o anuales). Sin embargo, a nivel horario podrían producirse grandes diferencias entre las series de tiempo de radiación modeladas y observadas durante los períodos con nieve.

Para detectar la nieve en el período posterior a 2017 se utiliza la diferencia entre los datos de las imágenes en las bandas 2 (visible) y 5 (infrarrojo cercano) del satélite GOES 16. La nieve tiene un espectro de reflectividad distinto al de la nubosidad, la nieve refleja mucho las longitudes de onda corta, al igual que las nubes, pero mucho menos en el infrarrojo cercano, a diferencia de las nubes. Así, un píxel que tiene nieve, en una situación de cielo despejado muestra una alta reflectividad en la banda 2 pero una baja reflectividad en la banda 5. En cambio, cuando hay nubosidad o cielo despejado, la reflectividad será similar en ambas bandas.

Algoritmo de detección de nubosidad

Para detectar si un píxel de una imagen está nublado o despejado en un cierto momento debemos aplicar una serie de pruebas que utilizan datos en distintas bandas espectrales del satélite GOES. La alta reflectividad de la banda visible, cuando no es nieve, puede indicar la presencia de una nube, pero también la presencia de un salar o de un lugar con alto albedo superficial. Así que además de la banda visible, se utilizan las bandas infrarrojas centradas en 3,9um y 11um para poder determinar si hay o no nubosidad.

Para determinar si un píxel está despejado o no se efectúan las siguientes pruebas:

Test visible: Un píxel se considera nublado si la reflectividad en la banda visible para un cierto ángulo cenital es estadísticamente mayor que el valor de la reflectividad del terreno en ese sitio para ese ángulo. Esto puede llevar a considerar nublado un lugar que ocasionalmente tiene valores altos de albedo superficial, como por ejemplo lugares con nieve. Para esto se descartan los píxeles en que el algoritmo de detección de nieve haya dado positivo.

Test infrarrojo: Cuando el cielo está despejado las temperaturas de brillo de las bandas infrarrojas de 3.9um y 11um (bandas 2 y 4 en GOES 12/13 y bandas 7 y 14 en GOES 16) son similares. Para detectar una nube se calcula la razón entre el valor de la temperatura de brillo de la banda de 11um y de la banda de 3.9um para cada mes y hora del día, si este valor es menor que el umbral se considera que el píxel está despejado. El umbral se determina para cada mes y hora calculando el valor de cielo despejado con un análisis estadístico de toda la serie de tiempo.

Test falsos positivos: Se utiliza para detectar los casos en que el test visible dio positivo (alta reflectividad) pero no se trata de una nube. Se realiza el mismo cálculo del test infrarrojo, pero en este caso si esta razón es suficientemente cercana a 1 se considera que hay cielo despejado, pues lo más probable es que se trate de un salar o un lugar con una superficie con alto albedo superficial.

Finalmente, para cada tiempo, se considerará un píxel nublado si cumple una de estas dos condiciones:

## Aerosoles en Santiago

El efecto de los aerosoles en la radiación ha sido tomado en cuenta 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 MERRA-2 (50 kilómetros aproximadamente), no se logra representar las altas concentraciones observadas en la zona urbana de Santiago.

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

Por este motivo, se ha hecho una corrección adicional en Santiago a las componentes de la radiación disminuyendo en un 20% la radiación directa y considerando que el 50% de esa pérdida se transforma en radiación difusa.

## 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 (), 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 (), entonces se considera una situación de sombra y se iguala a cero la radiación directa para ese tiempo (ver esquema en figura 5).

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.

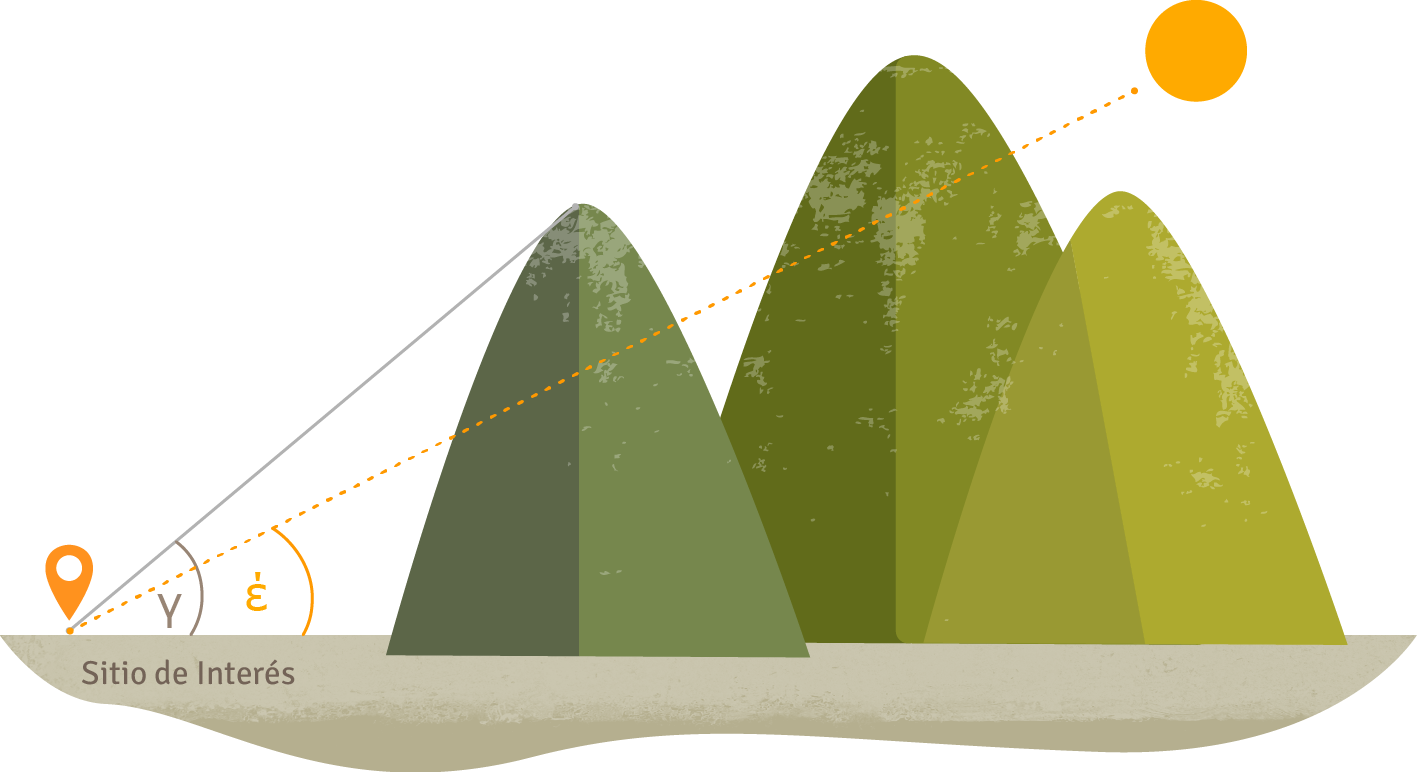
Además de la importancia de considerar las sombras para el cálculo de la disminución de la radiación recibida en un punto, el conocer la ubicación de los obstáculos topográficos más altos permite optimizar la instalación de los paneles, intentando ubicarlos mirando hacia donde haya la mayor cantidad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

Figura 4 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.

# Validación de los resultados del modelo

## Base de datos de mediciones

Se ha recopilado una base de datos que contiene 67 estaciones que miden la radiación global horizontal a lo largo del país con datos entre los años 2004 y 2017 pertenecientes al CEAZA, INIA, Dirección Meteorológica y Ministerio de Energía y 64 estaciones con datos entre 2018 y 2019 pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile y al Ministerio de Energía. Estas estaciones están ubicadas a lo largo de todo el país con lo que se ha podido validar el modelo del explorador solar para distintas condiciones climáticas.

Las estaciones escogidas para ser usadas en la validación son las que poseen datos de mejor calidad, esto es: sin valores notoriamente fuera de un rango razonable para la variable analizada y con pocas o nulas tendencias a la disminución por falta de mantención y suciedad en los sensores.

Se cuenta, además, con mediciones de radiación directa normal de la estación Crucero II, ubicada en la región de Antofagasta, con datos desde agosto de 2012 hasta la fecha.

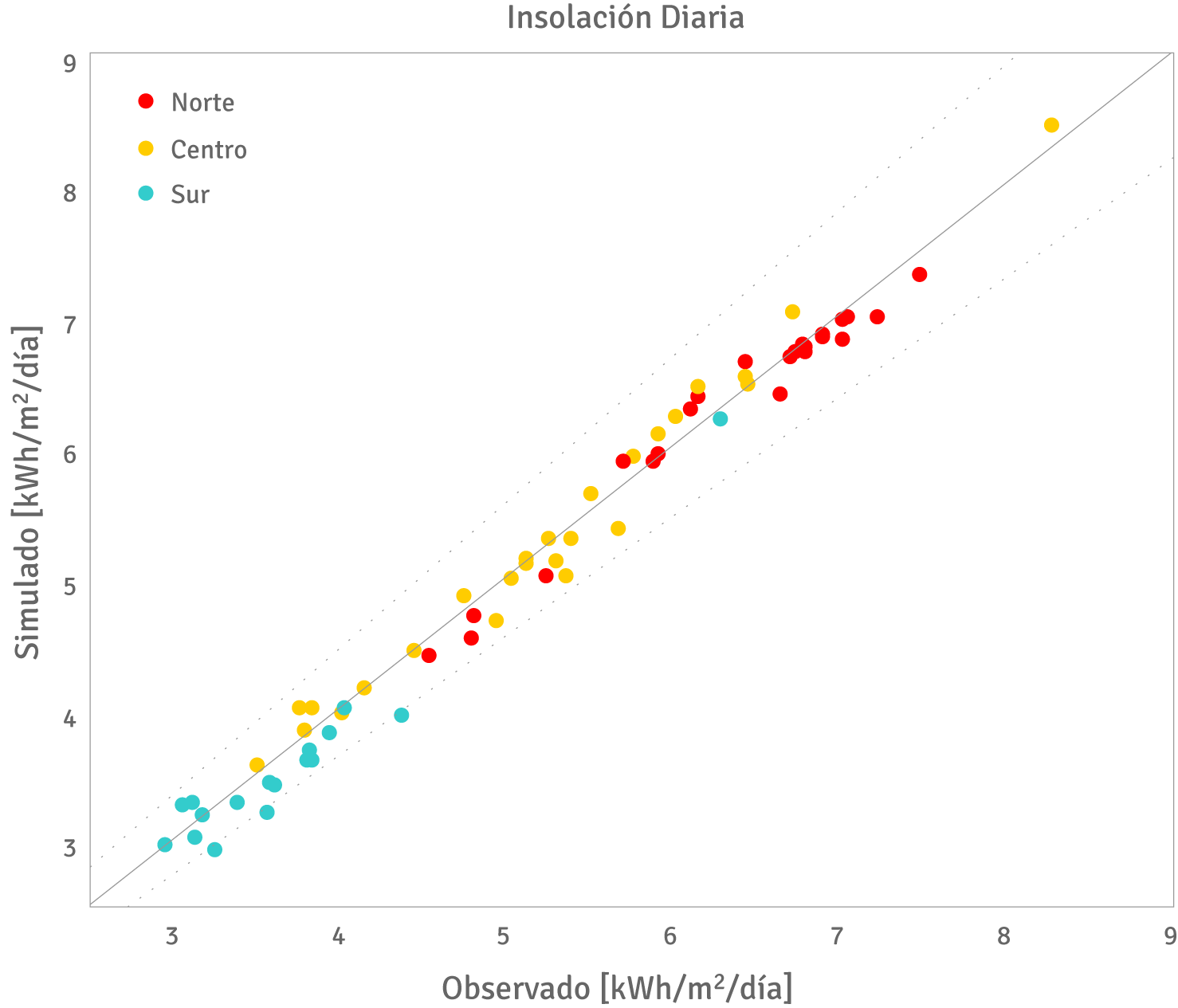
## Validación de la radiación global horizontal

Para hacer un análisis del desempeño del modelo bajo distintas condiciones climáticas se han separado las estaciones según su ubicación en tres grupos. 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 5).

Se han calculado los sesgos y el errores cuadrático medio (RMSE) del modelo para las series de insolación diaria de todas las estaciones, en las figuras 6 y 7 se muestran los sesgos de todas las estaciones separados en período 2004-2016 y 2018-2019, para representar las posibles diferencias debido al cambio de satélite. En la tabla 2 se muestran los promedios de los sesgos y RMSE de las estaciones agrupadas según su zona geográfica.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Zona** | **Rango de Latitud** | **Estaciones** | **SESGO [%]** | **RMSE [%]** |
| Norte | -17 a -30 | 24 | -1.3 | 5,7 |
| Centro | -30 a -40 | 26 | -0.4 | 9,6 |
| Sur | -40 a -56 | 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.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 5: 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 6: Cada punto representa el sesgo promedio de la radiación media horaria modelada en cada estación para el período 2004-2016.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 7: Cada punto representa el sesgo promedio de la radiación media horaria modelada en cada estación para el período 2018-2019.

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 en algunos períodos de tiempo, 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 problemas en la detección de nubosidad y la separación entre nubes y nieve. 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.

## Validación de la radiación directa

Se cuenta con información de la estación Crucero II del Ministerio de Energía para validar los resultados de la radiación directa del modelo. Al comparar las series de insolación diaria observada y simulada para el período 2012 a 2019 el modelo presenta un sesgo promedio de 3% y un error cuadrático medio de un 20%. Sin embargo, estos resultados no son homogéneos a lo largo del día, al calcular el sesgo para cada hora de forma independiente se puede observar que a las horas de mayor radiación casi no existe sesgo, pero la diferencia entre el modelo y las mediciones crece en las horas del amanecer y atardecer, cuando la elevación del sol es baja.

|  |  |
| --- | --- |
| Gráfico, Gráfico de dispersión  Descripción generada automáticamente | Gráfico, Gráfico de dispersión  Descripción generada automáticamente |

Figura 8: Figura 11: Izquierda: Insolación diaria de la radiación directa horizontal medida (eje x) y simulada (eje y) en la estación Crucero II para todos los días con datos en el período 2012 a 2019. Derecha: 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 en el período 2012 a 2019.

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Figura 9: Sesgo promedio de la radiación directa normal para cada hora del día.

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 3% y un RMSE de 11% para las series horarias, similar a lo encontrado para la estación de DNI en Crucero.

# 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 1 kilómetro y con sombras aplicadas con una resolución espacial de 90 metros entre los años 2004 y 2019.

Para cada píxel de 1 kilómetro cuadrado se ha calculado la radiación de cielo despejado cada una hora. Posteriormente, se ha detectado la presencia de nubosidad usando todas las imágenes satelitales GOES disponibles en el sitio. Para cada hora 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 el modelo empírico. Finalmente, se han calculado los instantes con sombra debido a la topografía y se han corregido las series de radiación directa, difusa y global. A esta base de datos se puede acceder a través del sitio web del Explorador Solar del Ministerio de Energía.

**Nota: El año 2017 fue en año de transición entre el satélite GOES 13 y GOES 16 en la posición de GOES EAST. Para hacer esto el satélite GOES 13 se fue moviendo de su posición a lo largo del año, esto generó que en las imágenes haya zonas sin datos. Por lo que al descargar una serie de tiempo en un píxel específico podría no haber información para ese año. Sin embargo, es posible que en un píxel cercano sí exista información para 2017.**

## Comparación de versión 2017 con versión 2020

Durante el año 2020 se realizó una actualización de la base de datos completa de radiación utilizando la metodología descrita en este reporte. La base de datos anterior contenía datos de 2004 a 2016, en esta nueva versión se incluyen datos hasta 2019, pero además de alargar las series de tiempo se hicieron las siguientes modificaciones:

1. En el modelo de cielo despejado se modificó una parametrización de los aerosoles que modificó la separación entre radiación directa y difusa. En general la radiación global se vio modificada menos de un 3% en la mayor parte del país, sin embargo, la radiación directa cambió entre un 2% y un 10%.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Gráfico, Histograma  Descripción generada automáticamente | Gráfico, Histograma  Descripción generada automáticamente | Gráfico, Histograma  Descripción generada automáticamente |

Figura 10: Cambio porcentual promedio entre la radiación global horizontal en cielo despejado de la base de datos nueva (v2020) y la versión anterior (v2017).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

Figura 11: Cambio porcentual promedio entre la radiación directa horizontal en cielo despejado de la base de datos nueva (v2020) y la versión anterior (v2017).

1. El algoritmo de detección de nubes fue modificado, incorporando el uso de las imágenes infrarrojas para todo el territorio (en la versión anterior solo se usaban en el sur). Esto mejoró la detección de nubosidad, especialmente en las zonas costeras. Por lo que podrían encontrarse cambios de hasta un 10% en la radiación de las zonas con mayor frecuencia de nubosidad.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Figura 12: Diferencia entre la frecuencia de nubosidad de la base de datos nueva (v2020) y la versión anterior (v2017).

|  |  |
| --- | --- |
| Mapa  Descripción generada automáticamente | Mapa  Descripción generada automáticamente |

Figura 13: Diferencia porcentual promedio entre la radiación global horizontal de la base de datos nueva (v2020) y la versión anterior (v2017).

1. Debido a que a partir del año 2018 se utiliza un nuevo satélite con mejor resolución espectral, espacial y temporal, los resultados a partir de esa fecha pueden tener algunas diferencias de continuidad con los datos de fechas anteriores.

# Referencias

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

Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A. M., Gu, W., Kim, G., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J. E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S. D., Sienkiewicz, M., & Zhao, B. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), Journal of Climate, 30(14), 5419-5454.

Hall, D. K., G. A. Riggs, and V. V. Salomonson. 2006. MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m. Version 5. Boulder, Colorado USA : NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.

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

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

Molina, Alejandra, Mark Falvey, and Roberto Rondanelli. "A solar radiation database for Chile." Scientific reports 7.1 (2017): 1-11.

Schmit, T. J., Griffith, P., Gunshor, M. M., Daniels, J. M., Goodman, S. J., & Lebair, W. J. (2017). A closer look at the ABI on the GOES-R series. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(4), 681-698.