

Clasificación de tipos de cielo basado en mediciones de  
radiación solar

Giovanni Gamaliel López Padilla

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Modelos de irradiancia solar</b>	<b>2</b>
2.1. Irradiancia solar extraterrestre . . . . .	2
2.2. Declinación y ángulo solar . . . . .	2
2.3. Irradiancia solar global horizontal . . . . .	2
<b>3. Sistema de Monitoreo Ambiental</b>	<b>3</b>
<b>4. Creación de la base de datos</b>	<b>4</b>
4.1. Criterios para las condiciones de cielo despejado . . . . .	4
4.2. Datos atípicos . . . . .	5
4.3. Reconstrucción . . . . .	6
<b>5. Modelos de clasificación</b>	<b>7</b>
5.1. Modelos clásicos . . . . .	7
5.2. Modelos basados en redes neuronales . . . . .	7
<b>6. Resultados</b>	<b>7</b>
<b>7. Discusión y conclusiones</b>	<b>7</b>
<b>8. Referencias</b>	<b>8</b>

## 1. Introducción

## 2. Modelos de irradiancia solar

Los modelos de irradiancia solar pueden estimar el valor de irradiancia solar bajo condiciones de cielo despejado [1–3]. Las estimaciones obtenidas por los modelos son usados para realizar comparaciones sobre mediciones de una locación, las cuales pueden contener datos inexistentes o ruido. Existen diversos modelos basados en redes neuronales donde a partir de parámetros geoespaciales ó datos meteorológicos estiman el promedio por hora, día, mes o año [4–7]. Estos modelos requieren que la información de entrada sea detallada, por lo que representa un problema, aunado a esto, los modelos estan delimitados por la precisión que tienen sus estimaciones [8]. En este trabajo se propone el uso de modelos simples que pueden adaptarse a la localidad pero con la suficiente precisión para estimar la irradiancia global bajo condiciones de cielo despejado.

### 2.1. Irradiancia solar extraterrestre

El modelo de irradiancia solar extraterrestre ( $GHI_0$ ) esta definido de la siguiente manera [9].

$$GHI_0 = I_{SC} \left[ 1 - 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \cos(z) \quad (1)$$

Donde  $I_{SC}$  la constante solar con valor de  $1367 \text{ W/m}^2$ ,  $n$  es el día consecutivo del año ( $n=1$  es el primer día año y  $365$  es el último día del año, para años bisiestos el denominador cambia a  $366$  y el último día se toma como  $366$ ) y  $z$  es el ángulo zenital definido de la siguiente manera:

$$\cos(z) = \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\phi)\sin(\delta) \quad (2)$$

Donde  $\phi, \delta, \omega$  son la latitud, declinación solar y el ángulo solar de la locación y la hora local.

### 2.2. Declinación y ángulo solar

La dependencia en el tiempo en la ecuación 1 se introduce por medio de la declinación solar (ecuación 3) y el ángulo solar (ecuación 4), donde  $h_{LTC}$  es la hora local y  $\gamma$  es la fracción de rotación de la tierra con respecto al sol.

$$\delta = 24.45 \sin(\gamma) \quad (3)$$

$$\omega = 15(h_{LTC} - 12) \quad (4)$$

### 2.3. Irradiancia solar global horizontal

Kwarikunda [10] menciona que realizaron comparaciones entre los modelos Berger-Duffie (BD), Adnot-Bouges-Campana-Gicquel (ABCG) y Robledo-Soler (RS) para obtener el modelo que realiza una estimación más cercana a las mediciones realizadas en diferentes locaciones con el piranómetro CMP10, el cual realiza mediciones en el rango 285-2800 nm. El modelo RS es el que obtiene una mejor estimación de la irradiancia solar a nivel del suelo. El modelo RS se encuentra definido en la ecuación 5.

$$GHI_{RS} = a(\cos z)^b \exp(-c(90 - z)) \quad (5)$$

donde  $\cos z$  es el angulo zenital y  $a, b, c$  son constantes a determinar. En la tabla 1 se encuentran los parámetros usados para el modelo.

Parametro	a	b	c
Valor	1119	1.19	$1 \times 10^{-6}$

**Tabla 1:** Parámetros del modelo RS.

3. Sistema de Monitoreo Ambiental

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se ubica en una región montañosa donde se realizan extracciones de material para la construcción (pedreras) a la par de actividades industriales y alto flujo vehicular. El Sistema de Monitoreo Ambiental (SIMA) tiene como objetivo evaluar la calidad del aire, monitoreando las concentraciones de contaminantes atmosféricos a las que se encuentra expuesta la población del AMM y, bajo condiciones adversas, advertir sobre los periodos de altos índices de contaminación atmosférica. El SIMA se compone de 13 estaciones de monitoreo repartidas a lo largo del AMM (figura 1).

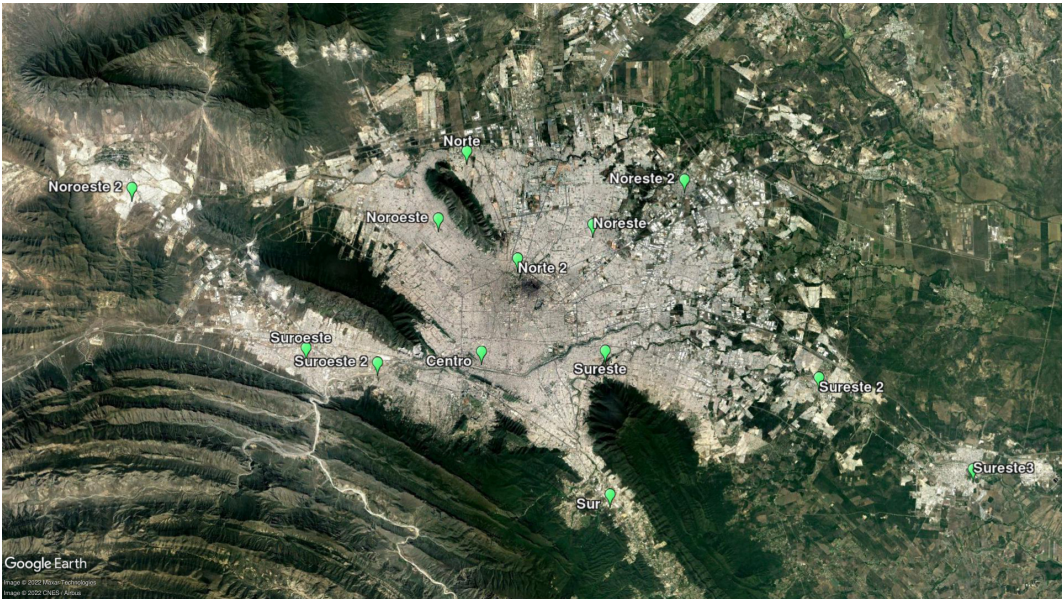


Figura 1: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas del SIMA en el AMM.

En la tabla 2 se muestra la información geográfica de las estaciones meteorológicas del SIMA en el AMM.

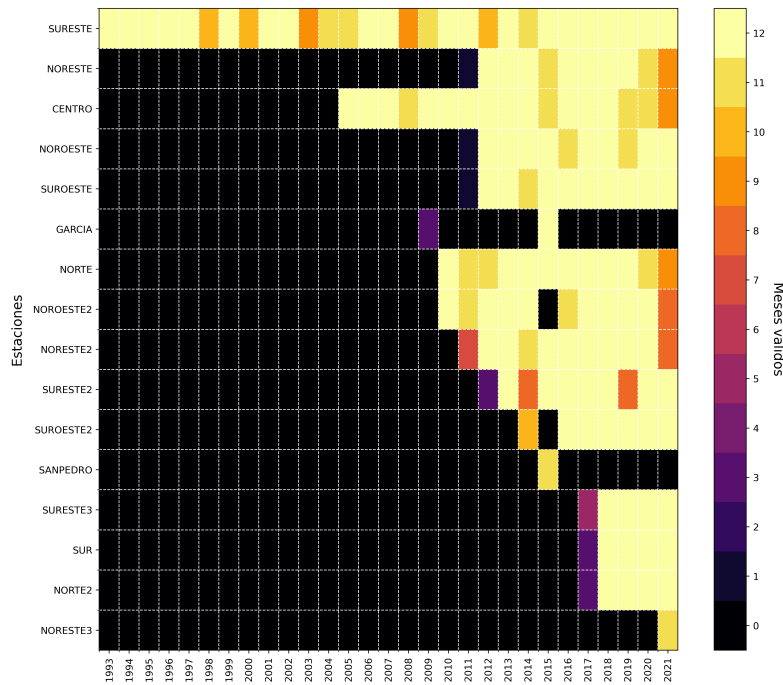
Ciudad	Nombre	Elevación (m s. n. m.)	Latitud (°N)	Longitud (°O)
Guadalupe	Sureste	492	25.6680	-100.2490
Monterrey	Centro	560	25.6700	-100.3380
Monterrey	Noroeste	571	25.7570	-100.3660
San Nicolas de los Garza	Noreste	476	25.7500	-100.2550
Santa Catarina	Suroeste	694	25.6760	-100.4640
Garcia	Noroeste2	716	25.7830	-100.5860
Escobedo	Norte	528	25.8000	-100.3440
Apodaca	Noreste2	432	25.7770	-100.1880
Juarez	Sureste2	387	25.6460	-100.0960
San Pedro Garza Garcia	Suroeste2	636	25.6650	-100.4130
Cadereyta de Jimenez	Sureste3	340	25.5833	-99.9872
Monterrey	Sur	630	25.5749	-100.2489
San Nicolas de los Garza	Norte2	520	25.7295	-100.3099

Tabla 2: Información de la localización geográfica de las estaciones meteorológicas del SIMA en el AMM.

Se conto con una base de datos que contiene mediciones de irradiancia solar por hora en las estaciones del SIMA en el periodo 1993-2021. Se realizo un conteo de los meses que cumplen las siguientes condiciones:

- Un día valido es aquel que contiene al menos 10 mediciones en el periodo de las 8 a las 19 horas.
- Un mes valido es aquel que contiene al menos 21 días validos.

En la figura 2 se muestra la distribución de los meses validos en las estaciones del SIMA bajo las condiciones anteriores.



**Figura 2:** Distribución de los meses validos para las estaciones meteorológicas del SIMA en el periodo 1993-2021.

## 4. Creación de la base de datos

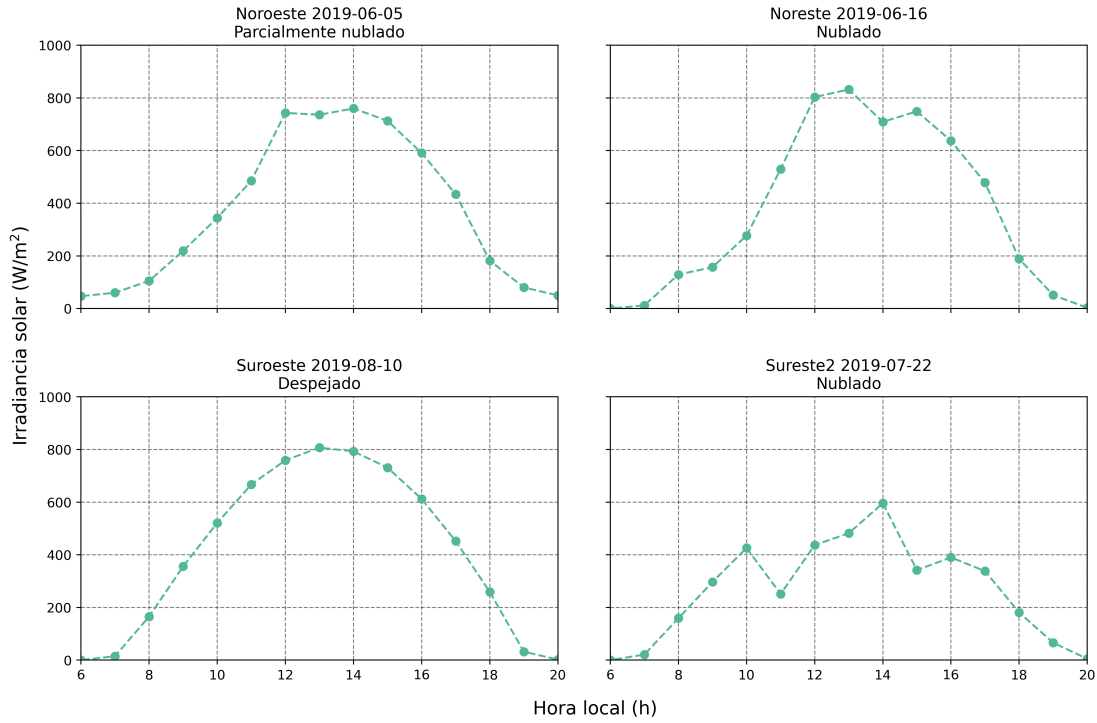
Se seleccionaron las estaciones noroeste, noreste, sureste2 y suroeste en el periodo 2019-2021. Estas estaciones fueron elegidas debido a que la geografía alrededor es muy diferente y porque presentan un gran número de mediciones dentro del periodo seleccionado. En base a las mediciones diarias de cada estación se clasificó visualmente la condición de cielo para cada día. Las condiciones de cielo contempladas son despejado, parcialmente nublado y nublado.

### 4.1. Criterios para las condiciones de cielo despejado

Los criterios para la clasificación de cielo despejado de manera visual de las mediciones diarias son las siguientes:

- Cielo despejado
  - Un día de cielo despejado se caracteriza por tener un comportamiento gaussiano a lo largo del día, teniendo como máximo el mediodía solar. Para el AMM, el mediodía solar debe encontrarse alrededor de las 12:30-14:30 horas. Las mediciones deben registrar un valor diferente a cero entre las 6 a las 20 horas.
- Cielo parcialmente nublado
  - Un día de cielo parcialmente nublado se caracteriza por presentar el comportamiento de un día con cielo despejado pero en ciertos intervalos de tiempo. Esto puede ocurrir en solo una hora, o en varias. Si el día contiene entre uno y cinco mediciones que caracterizan a un día despejado, entonces el día será clasificado como parcialmente nublado.
- Cielo nublado
  - Un día nublado se caracteriza por presentar un comportamiento caótico o un comportamiento gaussiano pero con valores más bajos en comparación a un día de cielo despejado.

En la figura 3 se presentan diferentes mediciones para visualizar las diferentes clasificaciones de las condiciones de cielo.



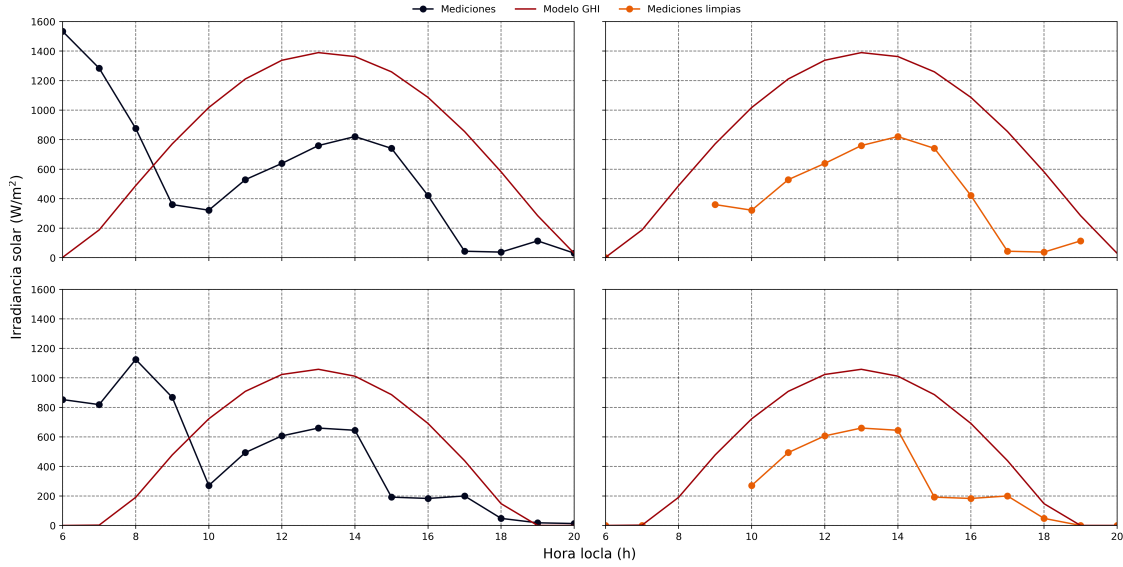
**Figura 3:** Ejemplos de las clasificaciones de las condiciones de cielo a partir de mediciones diarias de cada una de las estaciones del SIMA.

## 4.2. Datos atípicos

Los datos de las estaciones del SIMA pueden contener ruido o mediciones que físicamente no son posibles, a estos datos los denominamos como atípicos. Se implementó una limpieza de datos automática la cual consiste en realizar una operación de comparación para cada medición (ecuación 6) con respecto al modelo GHI, si esta operación para alguna hora es mayor a 0.9, entonces este valor corresponde a una medición atípica y se eliminará de la base de datos. Si el  $k_t$  es igual a 0, entonces se sobrescribe la medición con el valor 0, esto con el propósito de eliminar el ruido que puede tener el radiómetro de la estación analizada.

$$k_t = \begin{cases} \frac{\text{Medición}}{\text{GHI}_0} & \text{si } \text{GHI}_0 \neq 0 \\ 0 & \text{si } \text{GHI}_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

En la figura 4 se visualiza en dos días diferentes el proceso de la limpieza de datos atípicos. Los valores atípicos ocurren con frecuencia al inicio o al final del día solar.



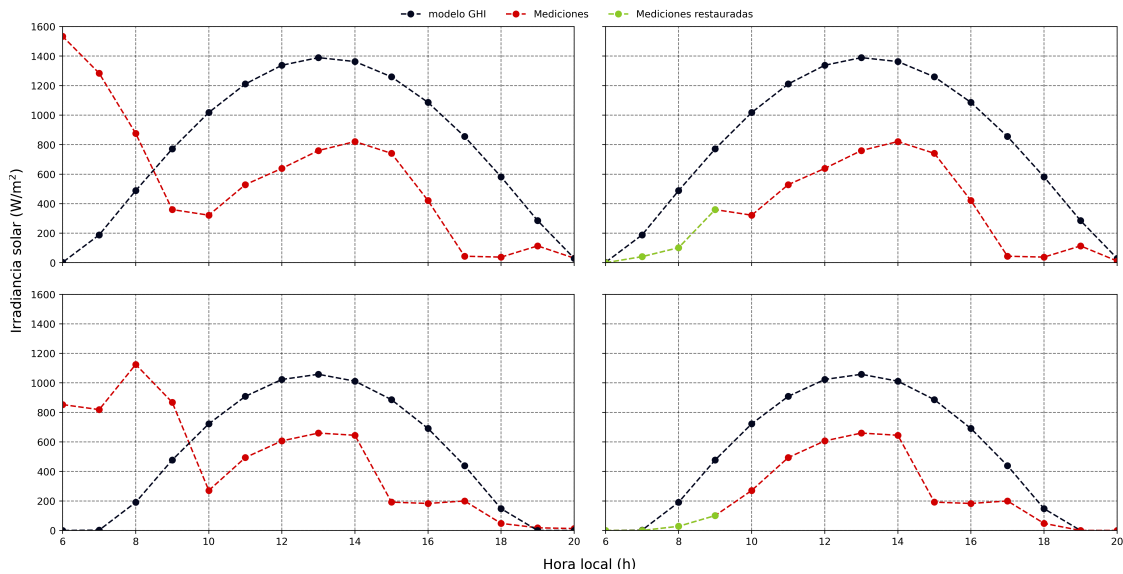
**Figura 4:** Mediciones de irradiancia solar de la estación noroeste originales (izquierda) y sin valores atípicos (derecha).

### 4.3. Reconstrucción

A partir de los datos limpios, se aplicó un proceso de reconstrucción. El proceso de reconstrucción consiste en asignar el valor del promedio horario de las 10 primeras mediciones que tengan más semejanza a la medición a reconstruir. Se toman únicamente las mediciones de la misma estación en una ventana de tres meses (un mes anterior, el mes actual y el siguiente). La semejanza se calcula en base a la similitud coseno (ecuación 7).

$$sim(m_i, m_j) = \frac{m_i \cdot m_j}{||m_i|| ||m_j||} \quad (7)$$

En la figura 5 se muestran los datos restaurados para los casos presentados en la figura 4.



**Figura 5:** Restauración de mediciones por medio de promedios horarios de las 30 mediciones más semejantes al día seleccionando

Con las mediciones restauradas se realizaron las comparaciones (ecuación 8 y ecuación 9) con respecto a los modelos GHI<sub>0</sub> y RS.

$$d_t = \begin{cases} \text{Modelo} - \text{Medición} & \text{si Modelo} \neq 0 \\ 0 & \text{si Modelo} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$k_t = \begin{cases} \frac{\text{Medición}}{\text{Modelo}} & \text{si Modelo} \neq 0 \\ 0 & \text{si Modelo} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

## 5. Modelos de clasificación

### 5.1. Modelos clásicos

SVM

KNN

Random forest

Gaussian naive

### 5.2. Modelos basados en redes neuronales

Perceptron

CNN

RNN

LSTM

Bi LSTM

CNN con Atención

## 6. Resultados

## 7. Discusión y conclusiones



## 8. Referencias

- [1] Gueymard CA. Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy*. 2012 aug;86(8):2145-69. Available from: <https://doi.org/10.1016%2Fj.solener.2011.11.011>.
- [2] Pérez-Burgos A, Díez-Mediavilla M, Alonso-Tristán C, Rodríguez-Amigo MC. Analysis of solar direct irradiance models under clear-skies: Evaluation of the improvements for locally adapted models. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2017 mar;9(2):023703. Available from: <https://doi.org/10.1063%2F1.4981798>.
- [3] Ineichen P. Validation of models that estimate the clear sky global and beam solar irradiance. *Solar Energy*. 2016 jul;132:332-44. Available from: <https://doi.org/10.1016%2Fj.solener.2016.03.017>.
- [4] Hasni A, Sehli A, Draoui B, Bassou A, Amieur B. Estimating Global Solar Radiation Using Artificial Neural Network and Climate Data in the South-western Region of Algeria. *Energy Procedia*. 2012;18:531-7. Available from: <https://doi.org/10.1016%2Fj.egypro.2012.05.064>.
- [5] Kumar S, Kaur T. Efficient solar radiation estimation using cohesive artificial neural network technique with optimal synaptic weights. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2019 oct;234(6):862-73. Available from: <https://doi.org/10.1177%2F0957650919878318>.
- [6] Ozgoren M, Bilgili M, Sahin B. Estimation of global solar radiation using ANN over Turkey. *Expert Systems with Applications*. 2012 apr;39(5):5043-51. Available from: <https://doi.org/10.1016%2Fj.eswa.2011.11.036>.
- [7] Sahan M, Yakut E. Estimation of monthly global solar radiation in the eastern Mediterranean region in Turkey by using artificial neural networks. *EPJ Web of Conferences*. 2016;128:06001. Available from: <https://doi.org/10.1051%2Fepjconf%2F201612806001>.
- [8] Ruiz-Arias JA, Gueymard CA. Worldwide inter-comparison of clear-sky solar radiation models: Consensus-based review of direct and global irradiance components simulated at the earth surface. *Solar Energy*. 2018 jul;168:10-29. Available from: <https://doi.org/10.1016%2Fj.solener.2018.02.008>.
- [9] Iqbal M. *An Introduction To Solar Radiation*; 1983.
- [10] Kwarikunda N, Chiguvare Z. Performance Analysis of Clear Sky Global Horizontal Irradiance Models: Simple Models Adapted for Local Conditions. *Journal of Renewable Energy*. 2021 sep;2021:1-12. Available from: <https://doi.org/10.1155%2F2021%2F4369959>.
- [11] Djafer D, Irbah A, Zaiani M. Identification of clear days from solar irradiance observations using a new method based on the wavelet transform. *Renewable Energy*. 2017 feb;101:347-55. Available from: <https://doi.org/10.1016%2Fj.renene.2016.08.038>.