



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Estudio de la variabilidad del recurso solar en la Ciudad de México (2004–2024)

Autor: Lizett Mirthala Dominguez Escamilla

Tutor: Yolanda Sola Salvatierra

Curs acadèmic: 2025-2026

Màster en Energies Renovables i
Sostenibilitat Energètica

Índice

| | |
|---|----|
| I. Agradecimientos | 2 |
| II. Resumen | 3 |
| III. Abstract | 4 |
| 1. Introducción | 5 |
| 2. Objetivos | 6 |
| 2.1 Objetivo general | 6 |
| 2.2 Objetivos específicos | 6 |
| 3. Marco teórico | 7 |
| 3.1 Irradiancia e irradiación solar | 7 |
| 3.2 Variabilidad temporal del recurso solar | 8 |
| 3.3 Contextualización de la Ciudad de México | 9 |
| 4. Metodología | 12 |
| 4.1 Área de estudio y ubicación del punto de análisis | 12 |
| 4.2 Fuente de datos (NSRDB) y características de la serie. | 13 |
| 4.3 Indicadores de irradiancia global horizontal (GHI) | 14 |
| 4.4 Estimación de irradiación mensual y anual | 15 |
| 4.5 Herramientas de procesamiento y análisis | 16 |
| 5. Resultados | 16 |
| 5.1 Descripción general de la serie horaria (2004–2024) | 16 |
| 5.2 GHI media mensual a las 10:00, 12:00 y 14:00 h (variabilidad interanual) | 17 |
| 5.3 Climatología promedio diaria del ciclo anual a las 10:00, 12:00 y 14:00 h | 20 |
| 5.4 Comparación entre los años 2004 y 2024 a las 10:00, 12:00 y 14:00 h | 22 |
| 5.5 Irradiación mensual y anual | 23 |
| 5.5.1 Irradiación mensual total 2004-2024 | 24 |
| 5.5.2 Irradiación anual total | 26 |
| 6. Discusión y limitaciones | 29 |
| 7. Conclusiones | 30 |
| 8. Referencias | 32 |
| 9. Anexos | 36 |
| 9.1 Glosario | 36 |
| 9.2 Resumen mensual de precipitación (mm) de CONAGUA/SMN por entidad Federativa y Nacional en 2004. | 37 |
| 9.3 Resumen mensual de precipitación (mm) de CONAGUA/SMN por entidad Federativa y Nacional en 2024. | 38 |

I. Agradecimientos

Mi total y más sincero agradecimiento a mi familia, por impulsarme siempre a seguir adelante, por darme la oportunidad de conocer el mundo y cumplir mis sueños. Su apoyo, confianza y amor han sido el motor que me ha acompañado en cada paso de este camino.

A Samuel, mi pareja, gracias por apoyarme y motivarme a cumplir mis metas como si fueran tuyas. Por ser mi familia en Barcelona, por tu amor, tu paciencia y tu compañía incondicional.

A mis amigos y compañeros que me regaló esta maravillosa ciudad, gracias por convertirse en mi tercera familia. Por las risas, el apoyo diario y por hacer de esta etapa una experiencia tan especial.

A Yolanda por su guía, su tiempo y su acompañamiento a lo largo de este trabajo.

Gracias a todos de cerquita y de lejos por estar presentes en este proceso y por formar parte de este logro.

Este logro también es suyo.

II. Resumen

La radiación solar es un recurso clave para la transición energética y para la comprensión de procesos climáticos, especialmente en entornos urbanos complejos. Este trabajo analiza la variabilidad temporal del recurso solar en la Ciudad de México mediante una serie horaria extensa (2004–2024) de irradiancia global horizontal (GHI), obtenida de la Base de datos Nacional de Radiación Solar (NSRDB) para una ubicación representativa en esta ciudad. La serie fue verificada en consistencia temporal y se configuró en hora local para interpretar adecuadamente los ciclos diarios.

El análisis se desarrolló mediante estadísticos descriptivos y agregaciones a distintas escalas, como la descripción de la serie horaria completa, promedios mensuales de irradiancia global horizontal en franjas horarias representativas (10:00, 12:00 y 14:00 h) con media multianual, desviación estándar interanual y extremos, climatología diaria del “año promedio” para identificar el patrón típico interanual, comparación entre el inicio y el final de la serie (2004 vs 2024) y estimación de irradiación (kWh/m^2) por integración temporal de la irradiancia.

Los resultados evidencian una estacionalidad marcada, con mayores niveles en primavera y máximos alrededor del mediodía, así como una variabilidad interanual moderada. La irradiación mensual presenta máximos en mayo con un promedio de $215,34 \text{ kWh/m}^2$ y mínimos en diciembre con $154,7 \text{ kWh/m}^2$. Asimismo, la irradiación anual total se concentra en un rango acotado entre años, destacando la influencia potencial de condiciones atmosféricas sobre la disponibilidad energética.

En conjunto, el estudio aporta una caracterización robusta del recurso solar en una ubicación urbana de la Ciudad de México, útil como base para evaluaciones energéticas, climáticas y de planificación urbana.

Palabras clave: recurso solar, radiación solar, irradiancia global horizontal (GHI), irradiación global horizontal, variabilidad estacional, variabilidad interanual, NSRDB, Ciudad de México, CDMX, serie temporal, Objetivos de Desarrollo Sostenible.

III. Abstract

Solar radiation is a key resource for the energy transition and for understanding climate processes, especially in complex urban environments. This study analyzes the temporal variability of solar resources in Mexico City using an extensive time series (2004–2024) of global horizontal irradiance (GHI), obtained from the National Solar Radiation Database (NSRDB) for a representative location in this city. The series was verified for temporal consistency and configured in local time to properly interpret daily cycles.

The analysis was developed using descriptive statistics and aggregations at different scales, such as the description of the complete time series, monthly averages of global horizontal irradiance in representative time slots (10:00 a.m., 12:00, and 14:00) with multi-year average, interannual standard deviation and extremes, daily climatology of the “average year” to identify the typical interannual pattern, comparison between the beginning and end of the series (2004 vs. 2024), and estimation of irradiation (kWh/m^2) by temporal integration of irradiance.

The results show marked seasonality, with higher levels in spring and peaks around midday, as well as moderate interannual variability. Monthly irradiation reaches its maximum in May with an average of 215.34 kWh/m^2 and its minimum in December with 154.7 kWh/m^2 . Likewise, total annual irradiation is concentrated within a limited range between years, highlighting the potential influence of atmospheric conditions on energy availability.

Overall, the study provides a robust characterization of solar resources in an urban location in Mexico City, useful as a basis for energy, climate, and urban planning assessments.

Keywords: solar resource, solar radiation, global horizontal irradiance (GHI), global horizontal irradiation, seasonal variability, interannual variability, NSRDB, Mexico City, time series, Sustainable Development Goals.

1. Introducción

La radiación solar constituye una de las principales fuentes de energía disponibles en la Tierra y desempeña un papel fundamental tanto en los sistemas climáticos como en el aprovechamiento energético de origen renovable. El análisis del recurso solar resulta especialmente relevante en el contexto actual de transición energética y de creciente interés por comprender la variabilidad de los factores naturales que condicionan la disponibilidad de energía.

En entornos urbanos complejos, como la Ciudad de México (CDMX), el recurso solar se ve influido por una combinación de factores geográficos, meteorológicos y atmosféricos, entre los que destacan la altitud, la estacionalidad climática, la nubosidad y la presencia de contaminantes atmosféricos, especialmente material particulado [1]. Estas condiciones pueden generar una variabilidad significativa de la radiación solar tanto a escala diaria como interanual, lo que hace necesario un análisis detallado basado en series temporales extensas.

La caracterización del recurso solar suele realizarse a partir de la irradiancia global horizontal (*Global Horizontal Irradiance*, GHI), una magnitud que representa la potencia radiante por unidad de superficie (W/m^2) total incidente sobre una superficie horizontal y que integra tanto la radiación directa como la difusa. El estudio de la GHI permite evaluar la intensidad del recurso solar y su comportamiento temporal, mientras que la irradiación solar, obtenida mediante la integración temporal de la irradiancia, proporciona una medida directa de la energía solar disponible (kWh/m^2) [2].

En este contexto, el presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo analizar la variabilidad del recurso solar en la Ciudad de México a partir de datos horarios de irradiancia global horizontal (GHI) procedentes de la Base de datos Nacional de Radiación Solar (*National Solar Radiation Database*, NSRDB) correspondientes al periodo 2004–2024.

Mediante el cálculo de promedios, desviaciones estándar y la estimación de la irradiación mensual, se evalúa tanto el comportamiento medio del recurso solar como su variabilidad interanual y estacional.

Con los resultados obtenidos se presenta una visión integral del recurso solar en la CDMX, proporcionando información relevante para estudios energéticos, climáticos y de planificación a escala urbana futuros.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Analizar la variabilidad temporal del recurso solar en la Ciudad de México a partir de datos horarios de irradiancia global horizontal (GHI) correspondientes al periodo 2004–2024, con el fin de caracterizar su comportamiento medio, su variabilidad interanual y su distribución estacional.

2.2 Objetivos específicos

- Procesar y depurar una serie temporal de datos horarios de irradiancia global horizontal para un punto en la Ciudad de México, asegurando su consistencia temporal.
- Calcular promedios anuales y mensuales de irradiancia global horizontal, con el propósito de identificar patrones estacionales y diferencias en la intensidad del recurso solar a lo largo de la serie seleccionada (2004-2024).
- Analizar el comportamiento del recurso solar en distintas franjas horarias del día, particularmente a las 10:00, 12:00 y 14:00 horas, para identificar periodos de mayor intensidad y menor variabilidad.
- Evaluar la variabilidad interanual del recurso solar a través del cálculo de la desviación estándar y otros estadísticos descriptivos.
- Estimar la irradiación solar mensual y anual mediante la integración temporal de los valores horarios de irradiancia, expresando los resultados en unidades energéticas (kWh/m²).
- Contextualizar los resultados obtenidos dentro del marco climático y urbano de la Ciudad de México, considerando su posible utilidad para diversos estudios.

El presente Trabajo de Fin de Máster se encuentra alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) impulsados por la Agenda 2030, contribuyendo de manera directa al ODS 7: Energía asequible y no contaminante, debido a que el análisis del recurso solar y de su variabilidad temporal constituye una base fundamental para la planificación y el aprovechamiento eficiente de la energía solar, para el desarrollo de sistemas energéticos más sostenibles en entornos urbanos [3].

Asimismo, de manera indirecta también se relaciona con el ODS 11: ciudades y comunidades sostenibles, al centrarse en el análisis de un recurso energético renovable en un contexto urbano como la Ciudad de México, constituyéndose como un marco de referencia para futuras implementaciones [4].

3. Marco teórico

La radiación solar se posiciona como la principal fuente de energía que impulsa, entre otros aspectos, los procesos físicos y climáticos de la Tierra. Su estudio resulta fundamental tanto para la comprensión del sistema climático como para la evaluación del potencial energético renovable disponible.

Desde una perspectiva energética, el análisis del recurso solar permite caracterizar la cantidad de energía solar que puede ser aprovechada en una región determinada, así como su variabilidad temporal a distintas escalas [5].

La radiación por evaluar depende principalmente de factores astronómicos; la geometría Tierra-Sol, determinada por la latitud geográfica, la inclinación del eje terrestre y la traslación anual del planeta controlan el ángulo de incidencia de la radiación solar y la duración del día, generando una marcada variación estacional del recurso solar [6]. En este contexto, debido a que la órbita terrestre es elíptica, la Tierra se encuentra más cerca del Sol alrededor de enero y más alejada hacia julio; aspecto a tener en cuenta, ya que esta variación anual resulta en una diferencia del $\pm 3,4\%$ en la irradiancia solar en la cima de la atmósfera de la Tierra [6].

A estos factores astronómicos se suman los procesos atmosféricos que afectan la propagación de la radiación solar desde el límite superior de la atmósfera hasta la superficie. Durante su recorrido, la radiación solar es atenuada mediante procesos de absorción por gases atmosféricos, dispersión por moléculas y aerosoles, y reflexión por nubes y partículas en suspensión [6].

A causa de esta combinación de factores, el recurso solar presenta una marcada variabilidad espacial y temporal, lo que hace necesario su estudio mediante series temporales suficientemente largas que permitan identificar patrones representativos.

3.1 Irradiancia e irradiación solar

Para la caracterización cuantitativa del recurso solar se emplean principalmente dos magnitudes que corresponden a la potencia y a la energía de la radiación que llegan a una unidad de superficie, y que se denominan irradiancia e irradiación solar, respectivamente. Estas variables describen distintos aspectos del fenómeno físico [7].

La irradiancia solar se define como la potencia de radiación solar incidente por unidad de superficie y se expresa en W/m^2 , permitiendo describir la intensidad instantánea o media de la radiación solar en un momento específico o un intervalo temporal [2].

La GHI integra la irradiancia normal directa (*Direct Normal Irradiance*, DNI), la cual es la parte de la radiación solar que incide directamente a la Tierra desde la posición del disco solar, e irradiancia horizontal difusa (*Diffuse Horizontal Irradiance*, DHI), siendo la parte de la radiación solar que incide de forma indirecta debido a diferentes factores que reflejan y dispersan la radiación solar como son los aerosoles y las nubes (Figura 1) [6].

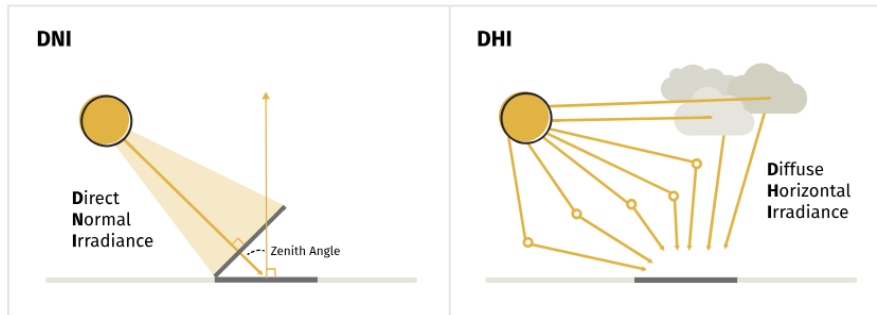


Figura 1. Representación de la irradiación normal directa (DNI) e irradiación horizontal difusa (DHI). Fuente: CleanPowerResearch

La irradiación global horizontal es ampliamente utilizada en bases de datos solares y meteorológicas debido a su representatividad y a la facilidad para su medición y modelación. El análisis de la GHI permite identificar patrones diarios, estacionales e interanuales de la radiación solar, así como evaluar la influencia de condiciones atmosféricas cambiantes.

Por su parte, la irradiación solar representa la energía solar acumulada sobre una superficie durante un periodo de tiempo determinado y se expresa en unidades de kWh/m², siendo una magnitud muy útil para el análisis energético [2].

Esta relación entre irradiación e irradiación es relevante en estudios basados en series temporales extensas, como en este trabajo en donde se evaluó una serie de 21 años, ya que permite analizar tanto la intensidad media del recurso solar como su disponibilidad energética acumulada, proporcionando una visión más completa del comportamiento del recurso solar a diferentes escalas temporales.

3.2 Variabilidad temporal del recurso solar

El recurso solar presenta una variabilidad inherente a diferentes escalas temporales: a escala diaria, la irradiación solar sigue el ciclo diurno determinado por el movimiento aparente del Sol, con valores nulos durante la noche, aumentando progresivamente desde el amanecer hasta alcanzar valores máximos alrededor del mediodía solar y volviendo a descender, tal como se representa en la Figura 2 [8]; a escala estacional, la variación del ángulo solar y de la duración del día genera diferencias significativas entre los meses del año.

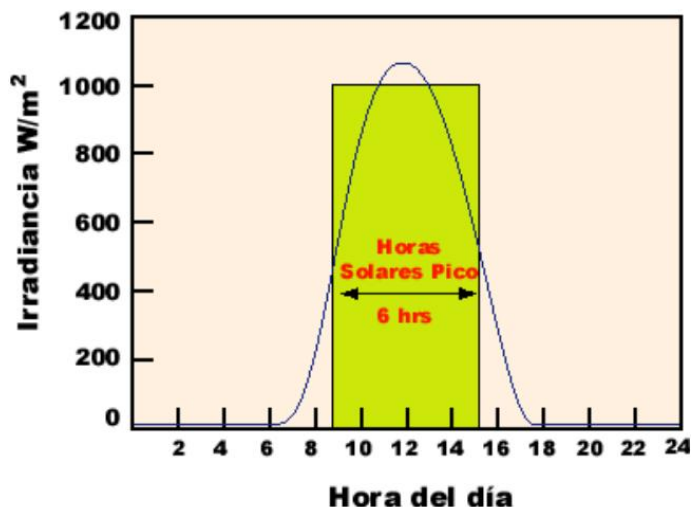


Figura 2. Irradiancia y horas solares pico (insolación) durante un día soleado. Fuente: UNAM

Asimismo, a escala interanual, la disponibilidad del recurso solar puede verse afectada por fluctuaciones climáticas asociadas a cambios en los patrones de circulación atmosférica, fenómenos de variabilidad climática, modificaciones en la carga de aerosoles, o cambios en la nubosidad y fenómenos climáticos de mayor escala [9].

Esta variabilidad interanual introduce incertidumbre en la caracterización del recurso solar y resalta la importancia de utilizar series temporales extensas para identificar patrones robustos y la influencia de eventos extremos o atípicos.

La cuantificación de esta variabilidad se realiza comúnmente mediante estadísticos descriptivos, como el promedio y la desviación estándar. Mientras que el valor medio proporciona una estimación representativa del recurso solar esperado, la desviación estándar permite evaluar la dispersión de los valores alrededor de dicha media permitiéndonos evaluar tanto el comportamiento promedio del recurso como su estabilidad a lo largo del tiempo [10].

3.3 Contextualización de la Ciudad de México

En este marco general, la Ciudad de México constituye un caso de estudio relevante para el análisis del recurso solar debido a su gran potencial de acuerdo con su ubicación. El territorio de la República Mexicana está ubicado en la porción media del continente americano, al norte del ecuador y al oeste del meridiano de Greenwich [11].

En este contexto, la distribución geográfica de la radiación solar media marca las zonas de mayor incidencia de este recurso y consecuentemente las que tienen un mayor potencial solar (Figura 3). Estas zonas se encuentran principalmente alrededor del ecuador, desvaneciéndose hacia los polos debido a las diferencias en el ángulo de incidencia solar y la duración del día [11]. Adicionalmente, la altitud y la nubosidad dan lugar a variación geográficas para una misma latitud.

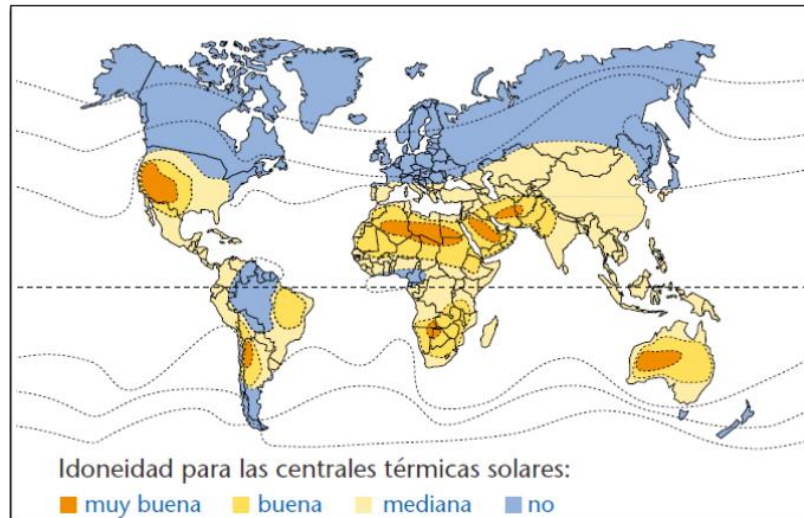


Figura 3. Mapa mundial de países que cuentan con mayor potencial solar. Fuente: Taylor, R.A

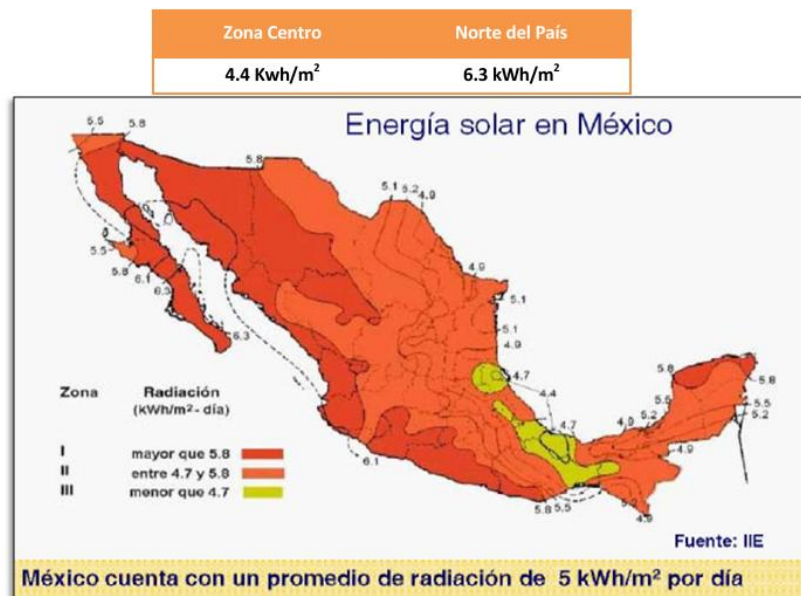


Figura 4. Mapa de Irradiación Solar en el país de México, kWh/m² al día. Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

En Figura 4 podemos observar que México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; el 85% del territorio nacional se encuentra en la franja del “cinturón solar”, lugar que recibe una irradiación solar diaria media entre 4,4 y 6,3 kWh/m² [12].

Este trabajo se enfoca en la Ciudad de México, localizada en el centro del país, dentro de la cuenca del Valle de México, a una altitud aproximada de 2245 m sobre el nivel del mar. Esta elevada altitud

influye de manera directa en la radiación solar incidente, ya que reduce el espesor atmosférico atravesado por la radiación solar, lo que generalmente se traduce en valores relativamente elevados de irradiancia en comparación con regiones de menor altitud [6].

El Valle de México (Figura 5) es una cuenca cerrada rodeada por sistemas montañosos, entre los que destacan la Sierra de las Cruces, la Sierra Nevada y el Eje Neovolcánico Transversal. Esta topografía influye de manera significativa en la circulación atmosférica local, favoreciendo la acumulación de contaminantes y la formación de capas de inversión térmica particularmente durante la estación seca, entre febrero y mayo [13].

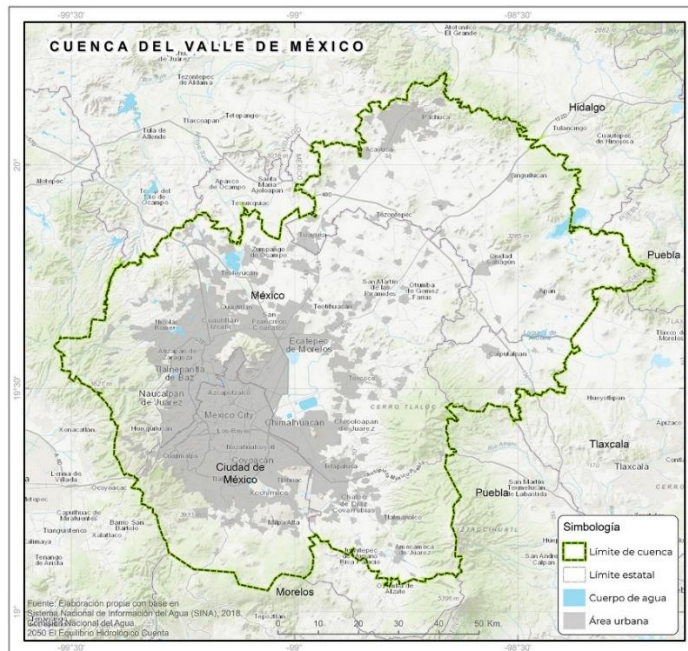


Figura 5. Mapa de la cuenca del Valle de México. Fuente: SINA

Estas condiciones pueden modificar las propiedades ópticas de la atmósfera y afectar la radiación solar incidente, como, por ejemplo, las nubes causan reflexión, y el ozono, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua (actúa sobre algunas longitudes de onda de la radiación) provocan absorción y partículas como los aerosoles, el polvo, las gotas de agua generan dispersión [7].

En materia climatológica, la Ciudad de México presenta un clima templado subhúmedo que predomina en el 87% del territorio, con una temperatura promedio anual de 6 a 18 °C, caracterizado por una marcada estacionalidad del régimen de precipitaciones [14].

El periodo de precipitaciones se concentra principalmente entre los meses de mayo y octubre, considerando septiembre como el mes más lluvioso [15]; periodo durante el cual la nubosidad y la precipitación podrían afectar de forma significativa la radiación solar incidente. En contraste, los meses de primavera suelen presentar condiciones atmosféricas más estables y cielos relativamente despejados, favoreciendo una mayor disponibilidad de energía solar [16].

El análisis del recurso solar en entornos urbanos como lo es la Ciudad de México adquiere especial relevancia debido a la interacción entre factores naturales y antropogénicos. La compleja topografía del Valle de México, la elevada densidad urbana y los niveles de contaminación atmosférica característicos de grandes áreas metropolitanas pueden modificar su disponibilidad y variabilidad.

El estudio de series temporales extensas en ciudades como la CDMX permite evaluar de manera robusta el comportamiento del recurso solar, identificar periodos de mayor y menor estabilidad y aportar información clave para estudios climáticos, energéticos y de planificación urbana sostenible.

4. Metodología

El presente estudio se desarrolló mediante un análisis cuantitativo del recurso solar en la Ciudad de México a partir de una serie temporal horaria correspondiente al periodo 2004–2024. La variable principal analizada fue la irradiancia global horizontal (GHI), expresada en W/m^2 , por ser un indicador ampliamente utilizado para caracterizar la radiación solar total incidente sobre una superficie horizontal, integrando tanto la irradiancia normal directa (DNI) como la irradiancia horizontal difusa (DHI) [6].

El procedimiento metodológico consistió en:

- i. Selección de punto de estudio representativo en la Ciudad de México.
- ii. Obtención de datos horarios de GHI para esta ubicación, directamente de la Base de datos Nacional de Radiación Solar (NSRDB).
- iii. Verificación de consistencia temporal de la serie.
- iv. Cálculo de indicadores estadísticos a diferentes escalas (mensual, anual y por franja horaria) en la irradiancia global horizontal.
- v. Estimación de la irradiación mensual y anual mediante la integración temporal de los valores horarios de irradiancia.

4.1 Área de estudio y ubicación del punto de análisis

El análisis de este trabajo se realizó para un punto específico ubicado en la CDMX, seleccionado de acuerdo con la localización de una estación de monitoreo implementada por la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) en la zona centro de esta ciudad; corresponde a la estación con clave MER (Merced), en las coordenadas latitud 19.42461° y longitud -99.119594° (Figura 6) [17].

Esta selección permite vincular el estudio del recurso solar con una ubicación urbana real ampliamente representativa, como lo es la cercanía con el centro de la ciudad (Figura 7).



Figura 6 (izq.) Mapa de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el Estado de México, señalando en rojo el punto seleccionado. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de SEDEMA

Figura 7 (der.) Localización del punto MER en comparación con el centro de la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps

Asimismo, al ser utilizado en el monitoreo ambiental de la ciudad, podría complementarse el análisis del recurso solar con las diferentes variables de calidad del aire y meteorológicas en futuros estudios. No obstante, aunque la estación de monitoreo MER también dispone de registros meteorológicos con variables radiativas, en el Apartado 6 se discuten las razones por las que dichos datos no se emplearon en este trabajo.

4.2 Fuente de datos (NSRDB) y características de la serie.

Los datos de radiación solar analizados en este trabajo se obtuvieron de la Base de Datos Nacional de Radiación Solar (*National Solar Radiation Database*, NSRDB), la cual es una base de datos pública y gratuita mantenida por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) de EE. UU. que proporciona datos históricos y actuales de radiación solar y meteorológicos tanto para Estados Unidos como para otras regiones [18]. Los datos de es NSRDB provienen mayoritariamente de sensores a bordo de satélites y de estaciones de superficie, con una resolución espacial en el área de estudio de 4 km. Esta base de datos es ampliamente utilizada para diseños de sistema de energía solar.

Para las coordenadas de estudio definidas se descargaron diferentes variables, entre ellas, la principal de este estudio, la irradiancia global horizontal (GHI), con resolución horaria para el periodo 2004–2024, obteniéndose una serie total de 184104 registros (24 h x 365 días o 366 según sea año bisiesto x 21 años). La Figura 8 muestra el punto de la base de datos NSRDB descargado.

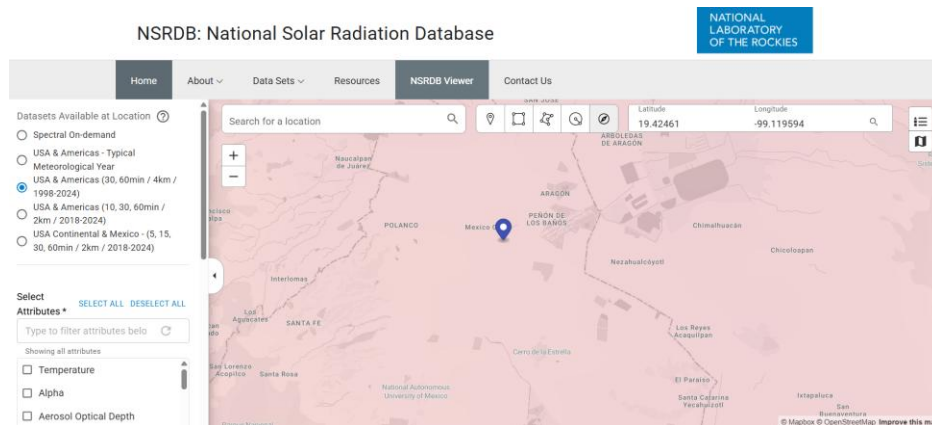


Figura 8. Ubicación del punto MER en NSRDB viewer para la descarga de datos. Fuente: NSRDB

Con el fin de asegurar la coherencia temporal con la hora local de la Ciudad de México, la descarga se configuró con la opción “Convert UTC to local time”, lo que permite analizar correctamente los patrones diarios (por ejemplo, a las 10:00, 12:00 y 14:00 h) sin introducir desfases derivados del huso horario. A lo largo del trabajo todas las horas mostradas corresponden a hora local de la ciudad.

Asimismo, se verificó la presencia de registros correspondientes a los días adicionales en años bisiestos (29 de febrero); esto es relevante para evitar inconsistencias en agregaciones mensuales o anuales y asegurar que las comparaciones interanuales se realicen sobre series equivalentes.

Los archivos descargados se organizaron en formato tabular en Excel, construyéndose una marca temporal a partir de las columnas año, mes, día y hora con el valor correspondiente de GHI.

Debido a que esta variable toma valores nulos durante la noche, el tratamiento de estos registros se definió en función del indicador calculado, aunque, en los análisis orientados a irradiación acumulada, se consideraron todas las horas del periodo (incluyendo las nocturnas).

En contraste, para los análisis centrados en comportamiento diurno, se trabajó únicamente con registros horarios específicos (10:00, 12:00 y 14:00 h), de acuerdo con el objetivo de representar franjas horarias de interés.

4.3 Indicadores de irradiancia global horizontal (GHI)

Con el objetivo de caracterizar el recurso solar y su variabilidad, se calcularon los siguientes indicadores a partir de la serie horaria de irradiancia global horizontal (GHI):

a) Serie horaria completa (2004–2024).

Se reportó una serie horaria total de 184104 datos como base del análisis, permitiendo describir la variabilidad temporal del recurso solar a distintas escalas.

b) Medias mensuales a horas representativas (10:00, 12:00 y 14:00 h).

Se calcularon promedios mensuales de irradiancia global horizontal para las 10:00, 12:00 y 14:00 horas, para cada año de nuestra serie 2004–2024, con el fin de analizar la estacionalidad y la variabilidad interanual en horarios representativos.

Esta variabilidad se evaluó mediante el cálculo de la desviación estándar (σ) interanual que cuantifica la dispersión de esos valores entre años para el mismo mes y franja horaria, representándose mediante bandas definidas como $\bar{x} - \sigma$ y $\bar{x} + \sigma$, donde \bar{x} es la media del periodo. Aunado a esto, se incluyeron los valores extremos mínimos y máximos por mes para caracterizar el rango observado [10] [19].

Pese a disponer solo de 21 años de datos en la zona de estudio, esta estadística puede considerarse como la climatología de GHI.

c) Medias diarias a horas específicas (climatología diaria).

Se construyó una climatología diaria del ciclo anual para las 10:00, 12:00 y 14:00 h, calculando para cada día del año el promedio de GHI a lo largo del periodo 2004–2024 (por ejemplo, la irradiancia global horizontal media de todos los 1 de enero a las 10:00 de 2004–2024, todos los 2 de enero..., etc.)

Este enfoque permite representar el comportamiento típico del recurso solar, describiendo su evolución diaria a lo largo del año, disminuyendo el efecto de eventos atípicos presentes en años individuales.

d) Comparación interanual selectiva (2004 vs 2024).

Se realizó una comparación específica entre los años 2004 y 2024 para las horas 10:00, 12:00 y 14:00 h, con el objetivo de contrastar el comportamiento del recurso solar entre el inicio y el final del periodo de estudio.

4.4 Estimación de irradiación mensual y anual

Con el fin de expresar el recurso solar en términos energéticos, se estimó la irradiación global a partir de la serie horaria de irradiancia global horizontal (GHI).

En este sentido, los datos obtenidos de la base nacional NSRDB corresponden a registros horarios de GHI, interpretados como el valor medio de irradiancia durante cada intervalo de una hora, por lo tanto, la irradiación acumulada en un periodo H se puede calcular mediante:

$$H = \sum_{i=1}^n GHI_i \cdot \Delta t \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde GHI_i es la irradiancia global horizontal en la hora i (W/m^2), n es el número de registros horarios en el periodo analizado y Δt es la duración del intervalo temporal (h) [2].

Dado que la resolución es horaria, se consideró $\Delta t = 1$ hora, por lo que la suma de los valores horarios de GHI en un mes (o en un año, dependiendo lo que se esté evaluando) proporciona directamente la irradiación en Wh/m^2 , porque cada dato horario equivale a $W/m^2 \cdot 1$ hora [6].

Posteriormente, se realizó la conversión a kWh/m² mediante división entre 1000 (1kWh=1000 Wh).

A partir de lo anterior, se estimaron:

- Irradiación global mensual: la suma de todos los registros horarios de GHI correspondientes a cada mes, para cada año de nuestra serie 2004–2024.
- Irradiación global anual total: la suma de todos los registros horarios de cada año completo (2004–2024); aunado a esto, se estimaron los promedios anuales.

Esto nos permite interpretar y comparar la radiación solar en términos energéticos acumulados mensual y anualmente.

Estas operaciones, y por ende resultados, consideran las horas nocturnas ya que forman parte natural de la integración temporal del ciclo diario y el incluirlas (sumarlas) no introduce sesgo; asimismo, al utilizarse las series horarias completas disponibles, la presencia de los 29 de febrero en años bisiestos (2004, 2008, 2012, 2016, 2020, 2024) queda incorporada de forma automática.

4.5 Herramientas de procesamiento y análisis

El procesamiento de datos, la agregación temporal y el cálculo de estadísticos descriptivos se realizaron en Microsoft Excel, mediante el uso de tablas dinámicas y funciones estadísticas (por ejemplo, promedio y desviación estándar). Esta estrategia permitió sistematizar la construcción de tablas de indicadores (mensuales, anuales y por hora) y preparar los datos para su representación gráfica e interpretación en los apartados de Resultados y Discusión.

5. Resultados

5.1 Descripción general de la serie horaria (2004–2024)

La serie temporal de GHI sobre el área que contiene el punto MER (Merced) contiene 184104 registros horarios, sin valores faltantes; aproximadamente 49,5% de los registros presentan GHI = 0 W/m², lo cual es consistente con horas nocturnas.

En la serie completa se identifica el ciclo diurno esperado, de valores nulos durante la noche y máximos alrededor de las 11:00-15:00 horas debido a que el sol alcanza su altura máxima en el cielo a estas horas. Asimismo, los rayos solares inciden de forma menos oblicua y su trayectoria es más corta a través de la atmósfera, resultando en menor dispersión y absorción por parte de los componentes atmosféricos, y, por lo tanto, mayor irradiancia [20].

Bajo esta premisa, se identificó que el valor máximo horario registrado en toda la serie fue de 1152 W/m² el 26 abril de 2012 a las 12:00 h, consistente con condiciones de alta irradiancia en periodos de cielo despejado.

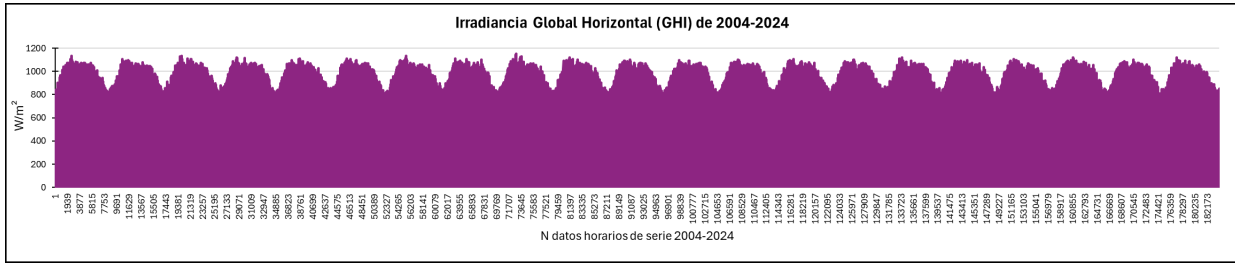


Figura 9. Serie horaria completa de GHI 2004–2024. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NSRDB

En la Figura 9 se resume la serie horaria completa de GHI para el periodo 2004–2024, representada en función del índice del registro (eje x: 1–184104), donde cada registro corresponde a una hora. A esta escala se distingue principalmente una envolvente que se repite 21 veces a lo largo del eje de registros, esto representa los 21 ciclos anuales del estudio, reflejando la recurrencia anual del patrón estacional del recurso solar. Esta representación también permite ver que no se detectan saltos ni cambios bruscos en la serie temporal que pudieran indicar algún tipo de error. Esta situación era esperable dado que NREL dispone de procedimientos para garantizar la calidad de sus datos.

Asimismo, se puede observar la presencia de máximos elevados en primavera alrededor del mediodía, siendo coherente con la geometría solar antes mencionada y periodos con menor irradiación durante la temporada lluviosa alrededor de mayo a octubre. Aunado a esto, la elevada altitud de Ciudad de México favorece en general, resultando en valores altos en condiciones despejadas según indica en el Atlas de radiación del país [20]. En este estudio, no obstante, al analizar una única estación no es posible comparar y determinar el efecto de altitud con zonas próximas.

5.2 GHI media mensual a las 10:00, 12:00 y 14:00 h (variabilidad interanual)

Dentro de los resultados obtenidos de las medias mensuales climáticas en los diferentes horarios ya mencionados, se puede destacar que a las:

- i. 10:00 h: la media mensual de GHI más alta se detectó en abril con un valor de $871,57 \text{ W/m}^2$ y la más baja en enero con $604,73 \text{ W/m}^2$.
- ii. 12:00 h: el promedio mensual más alto nuevamente se presentó en el mes de abril con $1007,96 \text{ W/m}^2$ y la menor fue en diciembre con un valor de $774,24 \text{ W/m}^2$.
- iii. 14:00 h: la media mensual máxima de GHI fue en el mes de marzo con un valor de $804,38 \text{ W/m}^2$ y el promedio mínimo en septiembre con $583,21 \text{ W/m}^2$.

Estos resultados son coherentes con lo descrito en el apartado anterior, donde se identificó que los valores más elevados del recurso solar tienden a concentrarse en primavera, principalmente alrededor del mediodía.

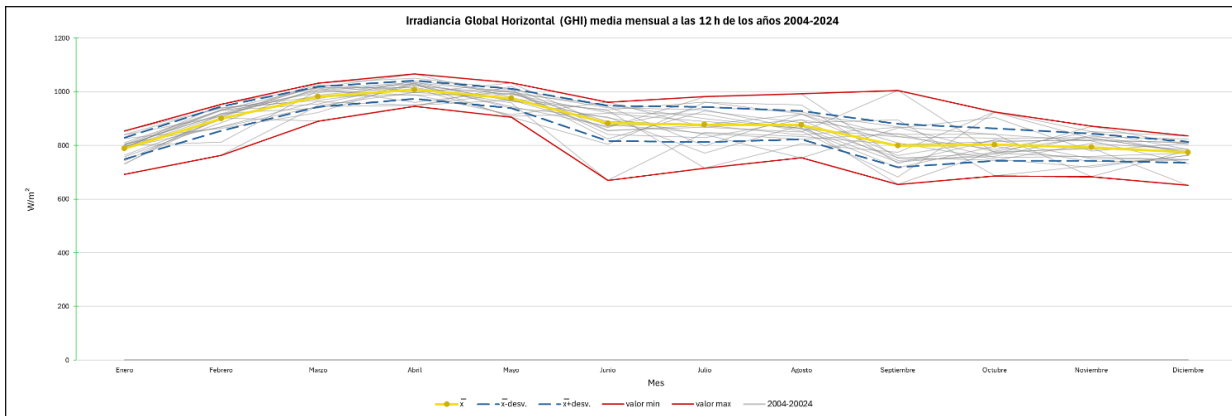
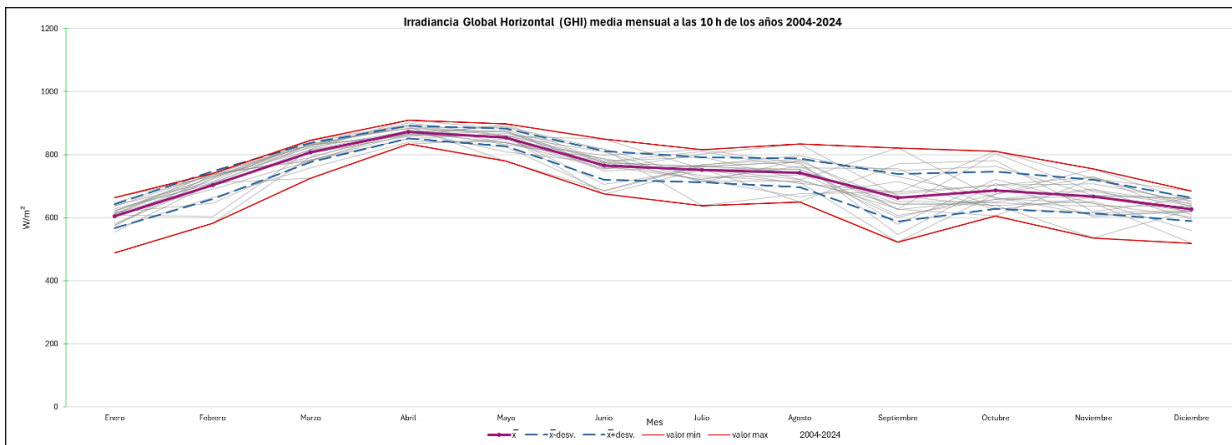
En particular, las medias mensuales climáticas de irradiación global horizontal muestran que los máximos para las tres franjas horarias analizadas se ubican en marzo y abril, destacando

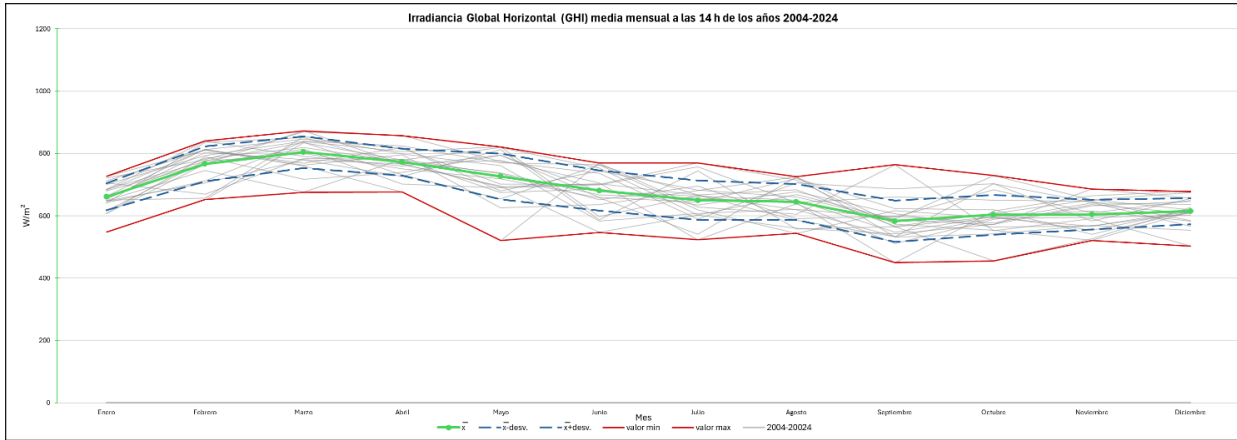
especialmente el mes de abril; entre las horas comparadas, la franja de 12:00 h presenta la mayor GHI promedio del periodo, alcanzando una media multianual de 1007,96 W/m².

Respecto a la variabilidad interanual (desviación estándar):

- i. A las 10:00 h y 12:00 h, la mayor dispersión de datos se presenta en septiembre; mientras que la menor variabilidad se registra en abril, igual en ambos horarios.
- ii. A 14:00 h, la mayor dispersión se presenta en mayo, indicando que en esa franja horaria la transición hacia la temporada húmeda puede incrementar la nubosidad y por ello la variabilidad.

Las Figuras 10, 11 y 12 muestran las variaciones anuales de las medias mensuales climatológicas de la GHI para las tres franjas horarias: 10:00, 12:00 y 14:00 h, respectivamente.





Figuras 10, 11 y 12. Estadística de la irradiancia global horizontal mensual a las 10, 12 y 14 h respectivamente, de los años 2004 al 2024. Se han incluido en gris las medias mensuales para cada uno de los años de la serie temporal para apreciar la variabilidad. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NSRDB

La línea central gruesa en colores sólidos según la hora representada (morado 10 h, amarillo 12 h y verde 14 h) corresponde a la media mensual climatológica (\bar{x}) de GHI para cada mes, es decir, el valor promedio de enero de la serie 2004–2024, de febrero, marzo..., etc. Aunado a esto, la franja delimitada por líneas punteadas azules representa la variabilidad en torno a la media, definida como $\bar{x} \pm desv$ donde *desv* corresponde a la desviación estándar calculada para cada mes con todos los datos horarios; en este sentido, un mayor ancho de la franja indica una mayor dispersión entre años, mientras que una franja más estrecha sugiere mayor estabilidad del recurso solar en ese mes y franja horaria.

Adicionalmente, los valores extremos se delimitan en rojo, indicando el mínimo y el máximo observados para cada mes durante el periodo de estudio. Estos extremos permiten identificar meses con episodios excepcionalmente bajos o altos de GHI respecto al comportamiento promedio, complementando la interpretación de la media y la variabilidad interanual.

De acuerdo con esto, las Figuras 10, 11 y 12 evidencian que el hecho de que los máximos se concentren en marzo–abril (y se mantengan altos en mayo) es consistente con el periodo de alta disponibilidad del recurso. En contraste, la disminución y mayor dispersión en meses como septiembre sugiere una influencia importante de la nubosidad asociada a la temporada de lluvias, que como se mencionó anteriormente en el marco teórico, septiembre es considerado el mes más lluvioso en la Ciudad de México [15].

Un aspecto que resultó notorio fue el valle marcado en el mes de junio en la curva correspondiente a 12:00 h (Figura 11). Al examinar los valores en la hoja de cálculo, se identificó que este descenso se asocia al año 2021 con un valor medio mensual de 669,53 W/m²; este comportamiento motivó una revisión de registros o comunicados meteorológicos para explorar posibles causas.

Y en efecto, a mediados de junio de 2021 se reportó la tormenta tropical “Enrique”. La cual, para la Ciudad de México ocasionó cielo nublado la mayor parte del día con lloviznas y bancos de niebla en zonas altas, hacia la tarde se presentaron fuertes lluvias, descargas eléctricas y caída de granizo [21]; estas condiciones disminuyen significativamente la disponibilidad del recurso solar, lo cual es consistente con la reducción observada en esta Figura 11.

En esta línea, otro aspecto que resultó llamativo fue el valle notorio en la curva correspondiente a las 14:00 h (Fig. 12) en el mes de mayo; esta caída se asocia principalmente al año 2023, con un valor medio mensual GHI de 520,35 W/m².

Del mismo modo, se consultaron históricos meteorológicos para identificar posibles causas y se halló que a inicios del año 2023 se empezó a registrar ligera actividad volcánica del volcán Popocatepetl. Este se encuentra en las coordenadas latitud 19.0226843°, longitud -98.6277258°, en el límite del estado de Puebla y el Estado de México, aproximadamente 70 km al sureste de la CDMX; por patrones de circulación atmosférica, las columnas de ceniza pueden ser transportadas hacia nuestra ciudad de estudio [22].

Específicamente se registró un incremento significativo en mayo de este año reportando exhalaciones frecuentes de vapor, gases, expulsión de fragmentos incandescentes y emisión de ceniza, incluso se reportó suspensión temporal de operaciones en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México por acumulación de ceniza en pistas [23] [24].

La influencia de este tipo de eventos sobre la radiación solar se explica porque en general, los aerosoles o partículas, y en este caso específico la ceniza volcánica, dispersan y absorben radiación, disminuyendo los valores de irradiancia [22].

En conjunto, una mayor carga de aerosoles (ceniza volcánica) o fenómenos meteorológicos de gran escala (tormentas tropicales) pueden contribuir a una mayor atenuación de la radiación incidente y, por tanto, explicar reducciones puntuales en el recurso solar observado.

En lo que respecta a una interpretación global del periodo 2004–2024, se observa la jerarquía esperada en los valores de irradiancia. Al promediar todos los días de la serie en las respectivas franjas horarias, la GHI media es de aproximadamente 728,71 W/m² a las 10:00 h, 871,44 W/m² a las 12:00 h y 675,97 W/m² a las 14:00 h. Estos resultados confirman que los valores más altos de irradiancia se concentran en torno al mediodía, coherente con el máximo diario asociado a la geometría solar.

5.3 Climatología promedio diaria del ciclo anual a las 10:00, 12:00 y 14:00 h

Para evaluar una climatología diaria, se promediaron para cada día del calendario los valores de GHI a las 10:00, 12:00 y 14:00 horas de todos los años 2004–2024. Los resultados se tabularon como se muestra en Tablas 1 y 2 de ejemplo, por razones de extensión se presentan únicamente los meses de enero y febrero, permitiéndonos observar con resolución diaria la evolución típica del recurso solar a lo largo de un “año promedio”.

Tablas 1 y 2. Irradiancia global horizontal media diaria en W/m^2 a las 10:00, 12:00 y 14:00 h de todos los años 2004–2024 (enero–febrero) Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NSRDB

| Irradiancia media diaria de toda mi serie 2004-2024 a las 10, 12 y 14 h. | | | | |
|--|-----|--------|--------|--------|
| Mes | día | 10 h | 12 h | 14 h |
| Enero | 1 | 623,33 | 789,86 | 636,67 |
| | 2 | 592,19 | 691,33 | 550,43 |
| | 3 | 560,33 | 759,19 | 640,14 |
| | 4 | 608,95 | 793,48 | 666,52 |
| | 5 | 613,43 | 782,57 | 626,71 |
| | 6 | 636,05 | 820,57 | 667,19 |
| | 7 | 608,43 | 778,14 | 633,43 |
| | 8 | 570,90 | 723,86 | 640,05 |
| | 9 | 614,48 | 791,76 | 658,24 |
| | 10 | 581,81 | 749,10 | 599,24 |
| | 11 | 568,33 | 786,00 | 679,38 |
| | 12 | 601,14 | 793,29 | 638,43 |
| | 13 | 587,52 | 773,95 | 614,19 |
| | 14 | 590,38 | 809,38 | 676,86 |
| | 15 | 595,95 | 745,76 | 662,62 |
| | 16 | 576,10 | 749,10 | 606,00 |
| | 17 | 621,00 | 796,86 | 677,48 |
| | 18 | 600,52 | 829,10 | 689,19 |
| | 19 | 620,10 | 761,10 | 665,62 |
| | 20 | 592,67 | 785,76 | 694,43 |
| | 21 | 591,43 | 784,29 | 678,00 |
| | 22 | 638,24 | 818,86 | 711,81 |
| | 23 | 637,57 | 816,38 | 684,00 |
| | 24 | 632,29 | 824,24 | 683,57 |
| | 25 | 629,24 | 810,71 | 700,90 |
| | 26 | 627,76 | 820,67 | 727,67 |
| | 27 | 636,76 | 855,38 | 731,62 |
| | 28 | 577,14 | 813,33 | 689,71 |
| | 29 | 574,43 | 778,29 | 628,38 |
| | 30 | 607,05 | 760,67 | 653,33 |
| | 31 | 631,24 | 852,81 | 671,52 |

| Irradiancia media diaria de toda mi serie 2004-2024 a las 10, 12 y 14 h. | | | | |
|--|-----|--------|--------|--------|
| Mes | día | 10 h | 12 h | 14 h |
| Febrero | 1 | 621,67 | 794,05 | 680,24 |
| | 2 | 616,38 | 853,29 | 713,33 |
| | 3 | 594,48 | 805,29 | 722,24 |
| | 4 | 624,48 | 839,33 | 708,76 |
| | 5 | 643,86 | 826,76 | 737,76 |
| | 6 | 687,05 | 886,86 | 722,10 |
| | 7 | 688,52 | 880,67 | 765,71 |
| | 8 | 699,86 | 876,52 | 762,62 |
| | 9 | 682,14 | 862,38 | 708,00 |
| | 10 | 652,95 | 824,19 | 722,90 |
| | 11 | 687,48 | 894,38 | 668,05 |
| | 12 | 661,71 | 896,52 | 710,38 |
| | 13 | 705,90 | 851,48 | 726,76 |
| | 14 | 699,86 | 884,76 | 757,29 |
| | 15 | 716,43 | 911,38 | 802,81 |
| | 16 | 705,76 | 914,33 | 807,71 |
| | 17 | 684,86 | 882,76 | 789,76 |
| | 18 | 724,33 | 928,76 | 813,38 |
| | 19 | 753,43 | 964,57 | 820,67 |
| | 20 | 755,19 | 960,76 | 808,95 |
| | 21 | 722,05 | 908,38 | 829,43 |
| | 22 | 754,90 | 931,57 | 804,24 |
| | 23 | 749,24 | 963,29 | 804,00 |
| | 24 | 768,29 | 960,05 | 795,52 |
| | 25 | 766,24 | 968,10 | 806,67 |
| | 26 | 762,86 | 949,38 | 774,86 |
| | 27 | 757,00 | 964,71 | 847,38 |
| | 28 | 786,43 | 981,24 | 841,62 |
| | 29 | 790,50 | 992,17 | 828,33 |

A partir de estos datos, se obtuvo la Figura 13.

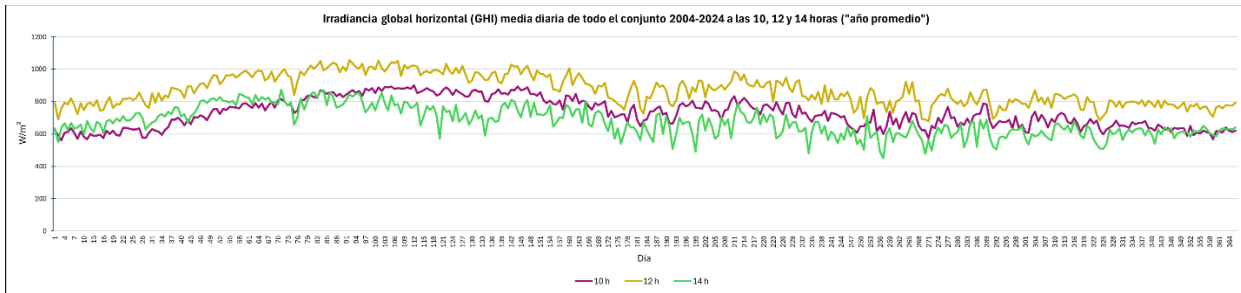


Figura 13. Promedio diario de la irradiancia global horizontal en diferentes horarios (10:00, 12:00 y 14:00 h) de todos los años en la serie 2004-2024. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NSRDB

Las curvas en Figura 13, que representan los valores promedios diarios de GHI en los 21 años conjuntos a las 10 h (línea color morado), 12 h (amarillo) y 14 h (verde), muestran un aumento gradual desde invierno hacia primavera, seguido por una reducción y mayor irregularidad durante el periodo húmedo.

Un aspecto particular que observar es que, al principio del año los valores promedio de GHI a las 14:00 h (línea verde) se sitúan ligeramente por encima de los correspondientes a las 10:00 h (línea morada). Este comportamiento es coherente con la geometría solar en el hemisferio norte ya que en invierno a las 10:00 h el sol presenta una altura menor y la irradiancia aún se encuentra en fase de incremento, mientras que a las 14:00 h la altura solar suele ser mayor que en la mañana temprana, favoreciendo valores más altos de GHI [6].

Por el contrario, a partir de aproximadamente el día 75 del año (mediados de marzo), las curvas se cruzan y los valores de GHI promedio a las 10:00 h pasan a ser superiores que los de 14:00 h. Este cambio refleja el aumento de la altura solar hacia la primavera, que incrementa de manera notable la irradiancia matutina [6]. Adicionalmente, en la franja de la tarde la radiación puede verse más afectada por condiciones atmosféricas variables (ej. incremento de nubosidad) lo que contribuye a la disminución en los valores de irradiancia GHI [25].

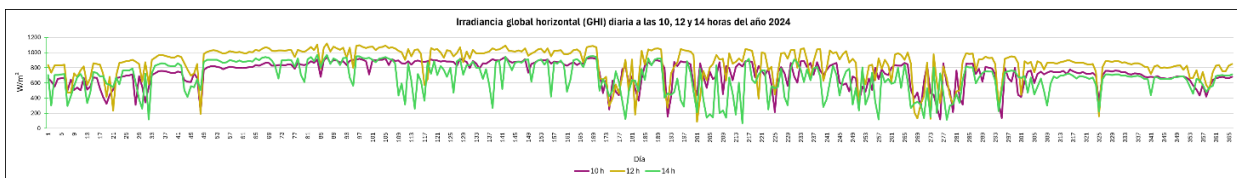
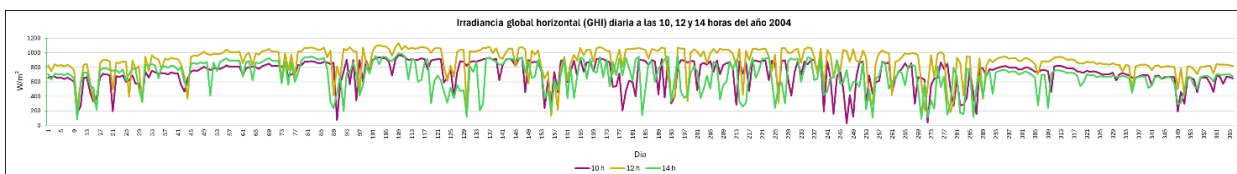
Como resultados destacados, se puede hacer mención que:

- i. A las 12:00 h se observa el mayor nivel de irradiancia global horizontal media durante prácticamente todo el año, con un máximo típico a inicios de abril (eje x: día 92-121 del año), precisamente el promedio más alto se exhibe para los 1° de abril con un valor de 1056,8 W/m².
- ii. El descenso más marcado se presenta hacia septiembre (eje x: días del 245 al 274), especialmente visible a las 14:00 h, donde se alcanza una media mínima de 450,7 W/m² para los 13 de septiembre.

Esta disminución en meses lluviosos va de la mano con la aparición de nubosidad convectiva con mayor frecuencia en horas de la tarde, lo que reduce la irradiancia promedio y aumenta la variabilidad diaria ya que las nubes son los principales elementos que modifican la radiación solar, mediante absorción y dispersión [25] [6].

5.4 Comparación entre los años 2004 y 2024 a las 10:00, 12:00 y 14:00 h

Se compararon los perfiles diarios de irradiancia global horizontal para los años 2004 y 2024 a las 10:00, 12:00 y 14:00 horas; se eligieron estos años para representar y comparar el inicio y el final del periodo de análisis (2004–2024), permitiéndonos explorar de forma sencilla la variabilidad en ciertos meses del año. Con este análisis no se pretende estudiar las tendencias en la serie dado que son solo dos años puntuales.



Figuras 14 y 15. Representación de GHI diaria a las 10, 12 y 14 h del año 2004 y 2024 respectivamente. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NSRDB

En las Figuras 14 y 15 se muestra un notable patrón; los valores de 12:00 h (línea color amarillo) se mantienen como los más elevados durante la mayor parte del año, mientras que la franja de 14:00 h (color verde) muestra descensos más abruptos y una mayor variabilidad diaria, especialmente en la segunda mitad del año, es decir, las mayores discrepancias se concentran en meses del periodo húmedo (por ejemplo, julio–septiembre).

Asimismo, se calcularon los promedios anuales de GHI, resultando en que:

- i. A las 10:00 h, el promedio anual era $714,77 \text{ W/m}^2$ en 2004 y $728,42 \text{ W/m}^2$ en 2024, es decir, una diferencia de $+13,65 \text{ W/m}^2$.
- ii. En contraste, a las 12:00 h el promedio anual era de $878,91 \text{ W/m}^2$ en el 2004 y $863,38 \text{ W/m}^2$ en 2024.
- iii. A las 14:00 horas, $682,34 \text{ W/m}^2$ en 2004 y $669,38 \text{ W/m}^2$ en 2024, una reducción de $12,96 \text{ W/m}^2$.

Como se ha señalado anteriormente, la irradiancia puede disminuir conforme avanza la tarde debido a una mayor probabilidad de nubosidad y precipitación en horas vespertinas.

Con el propósito de explorar la relación del comportamiento de la lluvia con las diferencias observadas en GHI, se consultaron los resúmenes mensuales de precipitación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para ambos años [26].

De acuerdo con estos registros, en 2004 la Ciudad de México presentó un acumulado anual de precipitación de 728,6 mm, con el mayor registro mensual en septiembre de 150,7 mm. En 2024, en cambio, el acumulado anual fue de 764,7 mm, destacando valores elevados en agosto con 235,1 mm y septiembre con 159,6 mm [26]. (Ver Anexo 9.2 y 9.3)

En este sentido, el hecho de que 2024 haya sido más lluvioso que 2004 es consistente con las interpretaciones previas de las Figuras 14 y 15, donde se observa que el promedio anual de GHI en 2024 tiende a ser menor en las horas de mediodía y tarde respecto a 2004, lo cual resulta compatible con una mayor presencia de nubosidad asociada a precipitación.

En conjunto, estos resultados muestran que, aun manteniendo constante el sitio de estudio y las franjas horarias analizadas, la disponibilidad del recurso solar puede variar entre años y dentro del ciclo diario en respuesta a cambios en las condiciones atmosféricas.

5.5 Irradiación mensual y anual

Para complementar los análisis anteriores, se estimó la irradiación global mediante la integración temporal de los valores horarios.

En este trabajo, la irradiación global horizontal mensual y anual se obtuvieron sumando los valores horarios de GHI del periodo correspondiente, asimismo, se calcularon la media multianual o climatológica, la desviación estándar interanual y los valores extremos mínimos y máximos por mes; posteriormente, se convirtieron los resultados a kWh/m^2 para optimizar el procesamiento.

A partir de los datos calculados, se realizaron diversas gráficas para su mejor visualización.

5.5.1 Irradiación mensual total 2004-2024

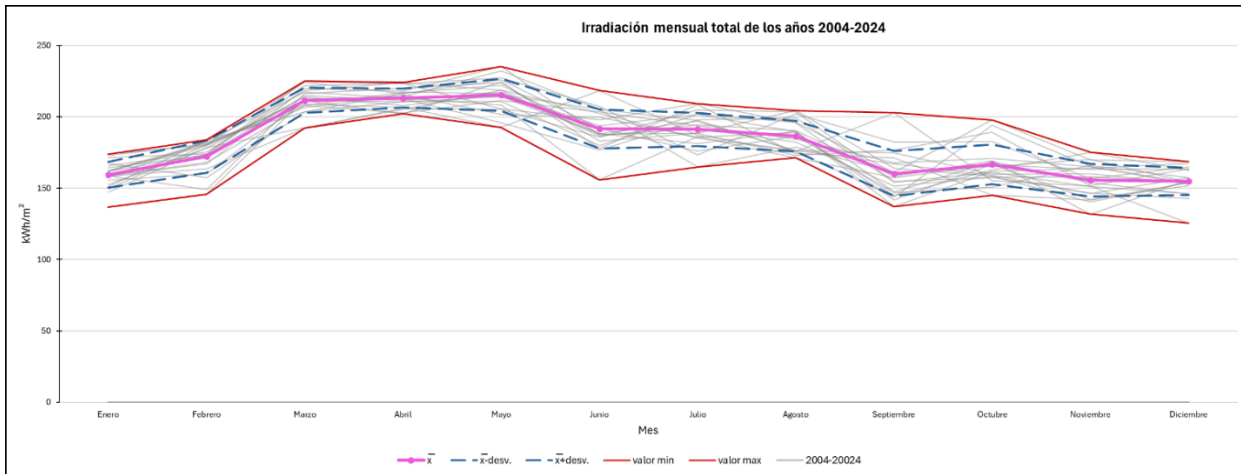


Figura 16. Irradiación global horizontal mensual de los años 2004 al 2024. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NSRDB

En la Figura 16 se representa la irradiación mensual en kWh/m² en cada mes para el periodo 2004–2024 (líneas grises atenuadas) incluyendo la media multianual (línea central gruesa en color rosa, la variabilidad en torno a la media (franja delimitada por líneas punteadas azules) y los valores mínimos y máximos (delimitados por líneas rojas).

En la media multianual del periodo 2004-2024, el mes con mayor irradiación fue mayo con un promedio de 215,34 kWh/m², seguido de meses de primavera con valores también elevados. Por el contrario, el valor promedio mínimo se registra en el mes de diciembre con 154,7 kWh/m², consistente con una menor altura solar y días más cortos en invierno; aproximadamente de 10 a 11 horas luz solar en invierno frente a 13 horas en verano [27].

Dentro de la variabilidad interanual, se exhibe que septiembre es el mes con mayor desviación estándar, mientras que la menor se observa en abril. Esto coincide con la postura de que, durante meses asociados a alta nubosidad y mayores precipitaciones, la energía solar acumulada puede cambiar de forma más notable, lo cual se refleja tanto en la amplitud de la banda de dispersión como en la separación entre máximos y mínimos. En contraste, durante meses de primavera (marzo-mayo) más estables, la irradiación mensual resulta más consistente entre años, generando una dispersión menor.

Aunado a esto, un aspecto relevante es el valle observado en junio (Fig. 16) correspondiente al año 2021, con un valor de irradiación global horizontal de 155,81 kWh/m². Este comportamiento es consistente con la anomalía descrita previamente en el apartado 5.2 para junio de 2021, donde se registró una reducción de GHI asociada a condiciones meteorológicas desfavorables vinculadas a la tormenta tropical “Enrique” [21].

Asimismo, de manera complementaria, en la Figura 17 se desagrega la irradiación anual en sus contribuciones mensuales mediante barras apiladas. Este formato gráfico facilita la visualización de dónde provienen los años máximos y mínimos, puesto que un año con alta irradiación anual puede deberse no solo a un incremento generalizado, sino a una combinación de meses particularmente favorables, mientras que un año bajo puede estar dominado por reducciones concentradas en meses clave del ciclo anual.

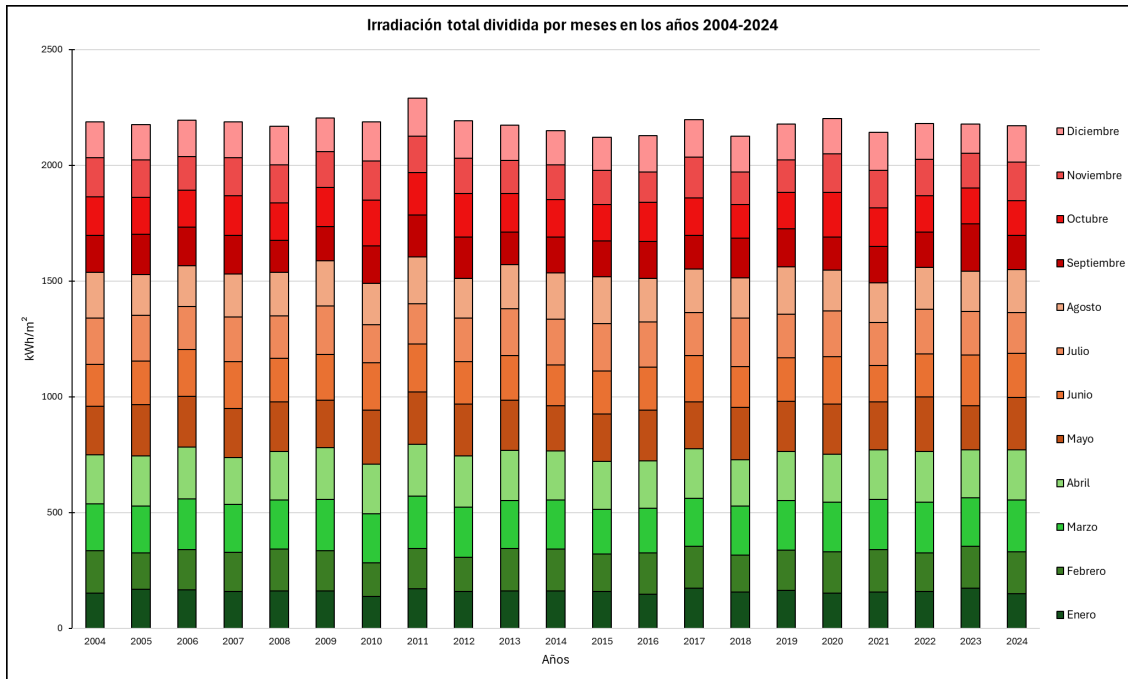


Figura 17. Composición de la irradiación anual (2004- 2024) distribuida por meses. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NSRDB

Se puede divisar que los meses de primavera (marzo–junio) constituyen una fracción importante del total anual, mientras que meses del periodo húmedo y del invierno aportan menores acumulados.

Además, permite identificar que las diferencias entre años no siempre se distribuyen uniformemente, debido a que hay años donde la variación anual parece explicarse principalmente por cambios en ciertos meses, por ejemplo, la tormenta tropical “Enrique” en junio de 2021 o la actividad volcánica intensa del Popocatépetl en mayo 2023.

En términos energéticos, la persistencia de nubosidad durante el mes no solo reduce valores horarios puntuales de irradiancia, sino que se traduce en una menor energía acumulada mensual.

Una vez caracterizada la irradiación a escala mensual, el siguiente paso consiste en evaluar la energía anual total acumulada.

5.5.2 Irradiación anual total

La irradiación anual total se calculó como la suma de los valores de cada año (equivalente a integrar la serie horaria anual); se presenta en la Figura 18 y los resultados muestran una variabilidad interanual moderada, ya que los valores anuales se concentran aproximadamente entre 2,12 MWh/m² (2121,14 kWh/m²) y 2,29 MWh/m² (2290,12 kWh/m²).

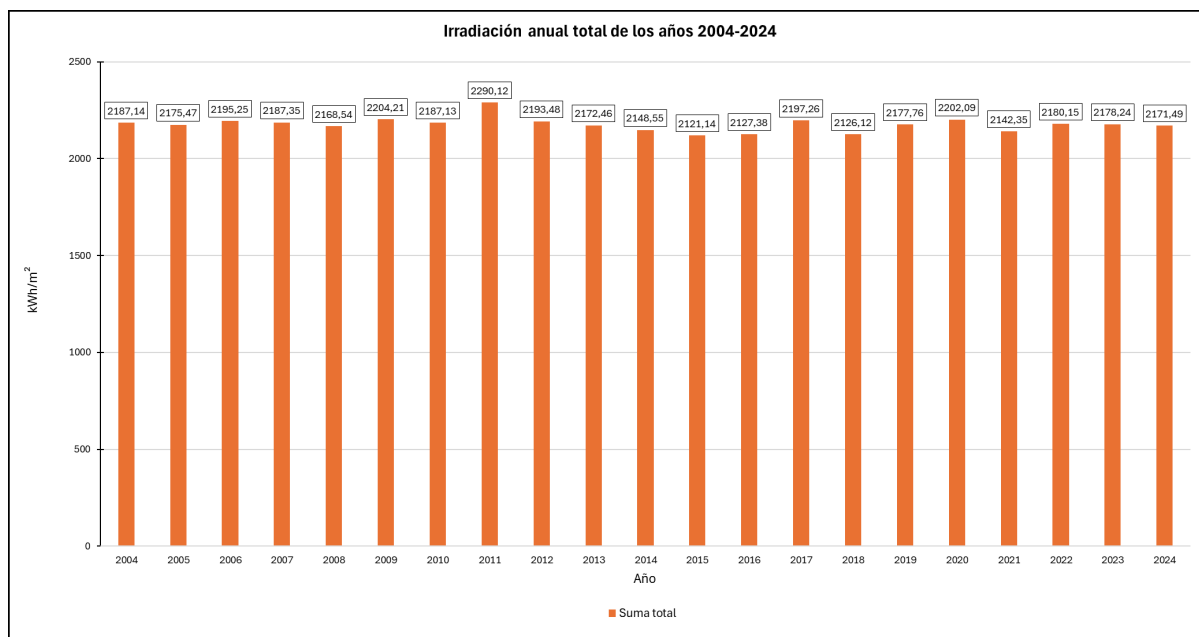


Figura 18. Suma total de irradiación anual de los años 2004 al 2024. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NSRDB

En la Figura 18 se aprecia que 2011 destaca ligeramente con la mayor irradiación anual acumulada de la serie 2004-2024 (2,29 MWh/m² = 2290,12 kWh/m²), interpretándose de manera plausible, como el resultado de condiciones atmosféricas más favorables para la transmisión atmosférica de radiación solar a lo largo del año.

Una posible explicación a esto, en parte, es la influencia del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), en su fase fría “La Niña”. En 2011, organismos internacionales reportaron la persistencia de condiciones de La Niña durante el primer semestre del año, tras alcanzar su mayor intensidad alrededor del otoño-invierno [28].

Este fenómeno se caracteriza por un enfriamiento anómalo de la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial central y oriental, acompañado de cambios en la circulación atmosférica tropical (por ejemplo, fortalecimiento de los vientos alisios), lo que produce teleconexiones capaces de modificar patrones regionales de nubosidad y precipitación [29].

En México, diversos estudios han señalado que este contexto contribuyó a condiciones de sequía y déficit de precipitación en amplias regiones del país durante 2011; por ejemplo, reportes climáticos globales indican que La Niña jugó un papel importante en la sequía intensa observada

en el norte de México [30]. Asimismo, documentación oficial del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reportó niveles de lluvia inusualmente bajos y una sequía severa en el territorio nacional durante ese periodo [31].

En un escenario como este, de menor precipitación y menor frecuencia de nubosidad durante la temporada húmeda, permitió una mayor fracción de radiación solar incidente y, por tanto, puede traducirse en una mayor irradiación anual acumulada.

En contraste, los valores más bajos de irradiación anual se observan (Fig. 18) en 2015 con 2121,14 kWh/m² total (2,12 MWh/m²) y 2016 con 2127,38 kWh/m².

Una posible explicación a explorar es la influencia del fenómeno climático ENSO en su fase cálida “El Niño”, dado que, justamente en los años 2015 y 2016, ocurrió uno de los eventos de El Niño más fuertes registrados [32].

El Niño corresponde al calentamiento anómalo del Pacífico ecuatorial (centro-oriental) y se asocia a un debilitamiento de los alisios y a desplazamientos de la convección tropical, afectando la circulación general y la distribución de humedad/nubosidad en distintas regiones del mundo [29].

Para el país de México, estudios muestran que la relación ENSO–precipitación es regional, ya que se han reportado señales contrastantes entre noroeste, sur y otras zonas del país dependiendo de la estación [33].

En el caso específico de la Ciudad de México, se ha encontrado que La Niña tiende a disminuir la precipitación, mientras que el fenómeno El Niño no necesariamente produce un cambio estadísticamente significativo en la lluvia anual [33].

Lo que sugiere que los mínimos de irradiación en 2015–2016 podrían estar asociados no solo a ENSO, sino también a variabilidad meteorológica local, duración, intensidad de la temporada de lluvias, nubosidad convectiva y/o episodios de mayor carga atmosférica que reduzcan la radiación solar que alcanza la superficie [34].

Desde esta vertiente analítica, se presenta el promedio mensual de irradiación para cada año del periodo 2004–2024, calculado como la irradiación anual total dividida entre 12 (Figura 19). Esta representación no sustituye a la irradiación anual total, sino que complementa a una forma de visualizar el acumulado anual a una magnitud mensual promedio (kWh/m² por mes).

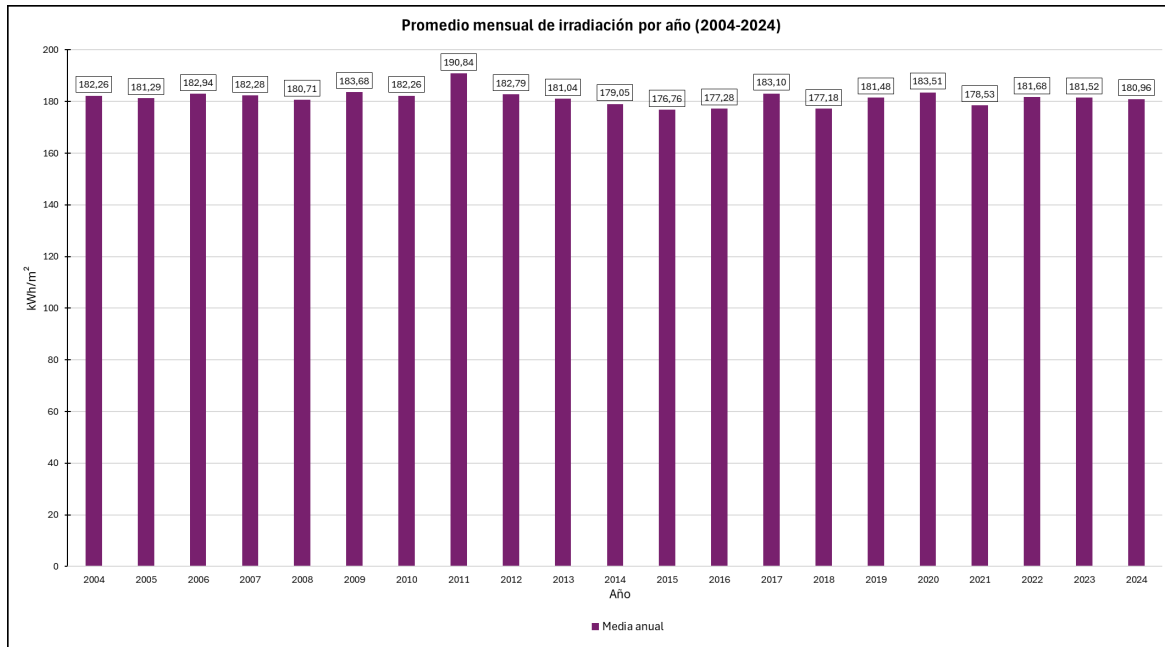


Figura 19. Irradiación media mensual de cada año de la serie 2004-2024 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NSRDB

De acuerdo con la Figura 19, se visualizan valores promedio cercanos a 176–191 kWh/m² mensual según el año; en este sentido, el año 2011 vuelve a destacar como el más alto con una media de irradiación global de 190,84 kWh/m² al mes, consistente con el máximo observado en Figura 18, mientras que 2015 se sitúa entre los más bajos con 176,76 kWh/m² mensual.

Desde una perspectiva interpretativa, este indicador resume la disponibilidad energética anual en un valor único “mensualizado”, útil para comparar de manera rápida si un año fue, en promedio, más favorable o menos favorable en términos del recurso solar. No obstante, conviene considerar que este promedio mensual equivalente no refleja la distribución interna del año, por ello, su interpretación también es complementaria a la desagregación por meses en Figura 17.

Asimismo, estas interpretaciones deben leerse considerando el alcance y la naturaleza de los datos empleados, así como las fuentes complementarias utilizadas para contextualizar anomalías. Por ello, a continuación, se presenta el apartado de Discusión y limitaciones, donde se precisan las principales fuentes de incertidumbre y las restricciones metodológicas que se presentaron en la realización de este trabajo.

6. Discusión y limitaciones

Este apartado sintetiza las principales limitaciones del estudio y contextualiza el alcance de los resultados obtenidos. Una primera limitación deriva del uso de datos de NSRDB, cuya estimación se basa en modelos y observaciones remotas, aunque este tipo de base ofrece series completas y homogéneas en el tiempo, los valores se generan sobre una resolución espacial de 4 km y, por tanto, representan condiciones promedio dentro de un área alrededor del punto seleccionado [35] [36].

Aunado a esto, la incertidumbre de las estimaciones satelitales puede aumentar en escenarios donde existen condiciones atmosféricas altamente variables como nubosidad convectiva de rápido desarrollo, bruma o carga elevada de aerosoles [37] [38]. Por ello, en un entorno urbano complejo como la Ciudad de México, el comportamiento real en un sitio específico puede diferir del valor representado por los datos satelitales, en este sentido, el punto de análisis “MER” debe interpretarse como una aproximación representativa del área circundante, más que como una medición estrictamente puntual [35] [39].

Este punto de análisis fue seleccionado por su vínculo con una estación de monitoreo en superficie, con el propósito de permitirnos profundizar en el comportamiento temporal del recurso solar y presentar indicadores detallados, sin embargo, esta elección implica que los resultados no describen la heterogeneidad espacial del recurso dentro de CDMX ni permiten identificar gradientes entre zonas (ej. diferencias oriente–poniente o variaciones ligadas a altitud y relieve) dentro del Valle de México.

En el análisis se proponen interpretaciones físicas para explicar valles y anomalías observadas en ciertos meses y años, no obstante, estas interpretaciones se apoyan principalmente en información bibliográfica y comunicados meteorológicos de carácter regional o metropolitano.

Bajo esta perspectiva, cabe señalar que inicialmente se contempló comparar radiación solar con variables de meteorología y calidad del aire en distintas ubicaciones de la Ciudad de México, aprovechando el marco de estaciones de monitoreo instaladas por el ente gubernamental SEDEMA [40].

Inicialmente se seleccionaron 10 puntos de estudio y se contemplaba analizar 7 variables provenientes de tres bases de datos: RAMA, REDMET y NSRDB.

- De la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) se descargaron datos horarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} para todos los años de la serie 2004-2024.
- De la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) se descargaron variables de temperatura y humedad relativa
- De la Base de datos Nacional de Radiación Solar (NSRDB) se descargaron datos horarios de Irradiancia directa normal (DNI), irradiancia difusa horizontal (DHI) e irradiancia global horizontal (GHI)

Sin embargo, durante la revisión de consistencia se identificó que las series de RAMA y REDMET presentaban incompletitud significativa de datos ($\approx 40\%$) a lo largo de los 21 años de estudio, lo cual limitaba la posibilidad de realizar comparaciones robustas y homogéneas en el tiempo [41].

En este contexto, se decidió centrar el análisis exclusivamente en GHI de NSRDB, al ser la variable que presentaba una serie completa y consistente para todo el periodo (184104 registros horarios). En consecuencia, se descartaron las demás variables y los puntos adicionales, priorizando la consistencia temporal y la solidez estadística del análisis del recurso solar en el punto MER; esta decisión fortalece la confiabilidad interna del procesamiento y los indicadores calculados, pero reduce el alcance interdisciplinar originalmente planteado relacionando meteorología y contaminación.

A pesar de estas limitaciones, el enfoque desarrollado constituye un marco replicable para caracterizar el recurso solar en series largas, con indicadores útiles a escalas horarias, mensuales y anuales. Como trabajo futuro, sería valioso incorporar validación con mediciones de superficie de radiación cuando estén disponibles, recuperar e interpolar series de meteorología y calidad del aire con criterios de completitud complementando con variables como nubosidad, precipitación y aerosoles a escala local y extender el análisis a varios puntos dentro de la Ciudad o incluso Valle de México.

7. Conclusiones

Los resultados presentados describen la variabilidad del recurso solar en un punto de la Ciudad de México (MER, Merced) a partir de una serie horaria extensa de 21 años (2004–2024) de irradiancia global horizontal (GHI) obtenida de la NSRDB. Asimismo, se estimó la irradiación global horizontal (kWh/m^2) mediante la integración temporal de los valores horarios, lo que permitió interpretar el recurso desde una perspectiva energética acumulada [2].

A escala general, la serie completa (Figura 9) confirma el comportamiento físico esperado, un ciclo diurno con máximos alrededor del mediodía y una repetición anual del patrón estacional. El valor máximo horario observado de GHI fue de 1152 W/m^2 (26 de abril de 2012 a las 12:00 h), consistente con periodos de alta disponibilidad del recurso en primavera [20].

El análisis mensual en horarios representativos (Figuras 10,11 y 12) evidenció que en primavera (marzo-mayo) se concentran los mayores niveles de irradiancia, mientras que el periodo húmedo presenta mayor dispersión. La franja de 12:00 h se mantiene como la más alta del periodo, reafirmando que el máximo del recurso se concentra alrededor del mediodía.

Asimismo, la climatología diaria del “año promedio” (Figura 13) mostró un incremento gradual desde invierno hacia primavera y una disminución más irregular durante la temporada húmeda, además, se observó el cruce estacional entre las curvas de 10:00 y 14:00 h alrededor de mediados

de marzo (día ~75), coherente con la evolución de la geometría solar, y con una mayor sensibilidad vespertina a condiciones atmosféricas variables [6] [25].

Al integrar los valores horarios de GHI para estimar la irradiación (kWh/m^2), se obtuvieron valores promedios de irradiación mensual multianual. En general, mayo fue el mes con mayor irradiación en la serie 2004-2024 con un promedio de $215,34 \text{ kWh/m}^2$ y diciembre fue el mes con menor irradiación global horizontal con un dato de $154,7 \text{ kWh/m}^2$ (Figura 16), en concordancia con la estacionalidad astronómica y la duración del día [27].

Aunado a esto, se identificaron anomalías puntuales coherentes con eventos atmosféricos desfavorables, como la tormenta tropical “Enrique” a mediados de junio de 2021 o la intensa actividad volcánica en mayo 2023 [21] [23].

A escala anual, la irradiación total mostró una variabilidad interanual moderada, concentrándose aproximadamente entre $2121,14 \text{ kWh/m}^2$ (año 2015) y máximo de $2290,12 \text{ kWh/m}^2$ (año 2011). Como interpretación plausible, 2011 podría relacionarse con condiciones atmosféricas más favorables en el contexto de La Niña, mientras que 2015–2016 podrían asociarse a la fase cálida El Niño y/o a variabilidad meteorológica regional/local; estos vínculos se plantean como hipótesis consistentes con la literatura y reportes climáticos consultados.

Las métricas horarias, mensuales y anuales confirman que los valores máximos de irradiancia se concentran alrededor del mediodía, mientras que el comportamiento anual refleja el ciclo estacional esperado. A escala mensual, se identifican meses con mayor sensibilidad a condiciones atmosféricas variables (por ejemplo, septiembre), donde la disponibilidad energética puede ser menos predecible que durante la primavera, que tiende a mostrar patrones más estables [20].

Finalmente, se destaca que el análisis estadístico del recurso solar ofrece un campo amplio de exploración. La serie procesada permite profundizar en múltiples líneas complementarias (por ejemplo, evaluación espacial en distintos puntos, relación con meteorología y aerosoles, o validación con mediciones de superficie), lo cual subraya el carácter interdisciplinar y escalable del enfoque. En conjunto, el procedimiento desarrollado constituye una base replicable para estudios futuros orientados a mejorar diagnósticos del recurso solar y apoyar decisiones técnicas y de política pública en materia de energías renovables.

8. Referencias

- [1] World Meteorological Organization (WMO), *Air Quality, Weather and Climate in Mexico City*, Geneva, Switzerland, 2009. <https://public.wmo.int/media/magazine-article/air-quality-weather-and-climate-mexico-city>
- [2] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.
- [3] United Nations (UN), “Energía,” *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [4] United Nations (UN), “Ciudades y comunidades sostenibles,” *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- [5] R. Alonso-Suárez, *Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales*, 2017. https://www.researchgate.net/publication/343478345_Estimacion_del_recurso_solar_en_Uruguay_y_mediante_imagenes_satelitales
- [6] M. Sengupta et al., *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications*, 2nd ed., Dec. 2017. <https://docs.nrel.gov/docs/fy18osti/68886.pdf>
- [7] F. Adler et al., *Energía solar fotovoltaica*, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina, 2013. <https://kk.up45.ac.id/scholarhub/fotovoltaica.pdf>
- [8] Circuito Eléctrico, “Radiación solar y cálculo de instalaciones fotovoltaicas.” <https://circuitoelectrico.com/calculo-de-instalaciones-fotovoltaicas/radiacion-solar/>
- [9] P. F. Riobo et al., “Los efectos de las radiaciones no ionizantes (solares) en diferentes actividades económicas en Colombia a causa del cambio climático,” *Ingeniería en Seguridad y Salud para el Trabajo*, pp. 1–68, 2022. <https://caoba.sanmateo.edu.co/ojs/index.php/sst/article/view/210/177>
- [10] W. Contreras, M. G. Galbán, and S. B. Sepúlveda, “Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta”, *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, no. 23, pp. 16–22, 2018. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-83672018000100016&script=sci_arttext
- [11] Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), *Radiación solar*, “El potencial de la radiación solar”, Mexico City, Mexico. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf>
- [12] R. Petrarca, *Energías limpias en México: proyecciones para la energía solar*, 2021. https://repositorio.lasalle.mx/lasalle_server/api/core/bitstreams/15b83d7e-1064-4a97-93c3-6c2426ae66b4/content

- [13] Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT), *Inventario ambiental del Distrito Federal*, Mexico City, Mexico, 1998. <https://paot.org.mx/centro/libros/inventario98/02.pdf>
- [14] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), “*Conoce tu estado: Ciudad de México.*” https://cuentame.inegi.org.mx/descubre/conoce_tu_estado/tarjeta.html?estado=09
- [15] Servicio Meteorológico Nacional (SMN), “Información estadística climatológica,” CONAGUA. <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- [16] Instituto de Geografía, UNAM, J. Jáuregui, *Climatología urbana*. http://www.igeograf.unam.mx/Geodig/antologia/index.html/pdf/5_jauregui.pdf
- [17] Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), “Red de Monitoreo Atmosférico–EstaciónMER.” https://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno_detalle.php?est=fneC
- [18] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “NSRDB Data Viewer.” <https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>
- [19] D. S. Wilks, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 3rd ed. Oxford, UK: Academic Press, 2011.
- [20] A. T. Martínez et al., *Prontuario solar de México*, 2015. https://www.researchgate.net/publication/312576876_Prontuario_Solar_de_Mexico
- [21] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), “La tormenta tropical Enrique mantiene las lluvias puntuales de fuertes a intensas en el noroeste y occidente de México.” <https://www.gob.mx/conagua/prensa/la-tormenta-tropical-enrique-mantiene-las-lluvias-puntuales-de-fuertes-a-intensas-en-el-noroeste-y-occidente-de-mexico>
- [22] National Center for Atmospheric Research (NCAR), “*How volcanoes influence climate.*” <https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/how-volcanoes-influence-climate>
- [23] Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), “Reporte del monitoreo del volcán Popocatepetl,” May 28, 2023. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/reporte-del-monitoreo-de-cenapred-al-volcan-popocatepetl-hoy-28-de-mayo-2023>
- [24] *El País*, “La actividad creciente en el volcán Popocatepetl obliga a cerrar por unas horas los aeropuertos de Ciudad de México,” May 20, 2023. <https://elpais.com/mexico/2023-05-20/la-actividad-creciente-en-el-volcan-popocatepetl-obliga-a-cerrar-por-unas-horas-los-aeropuertos-de-ciudad-de-mexico.html>
- [25] D. R. Rosas, *Caracterización y predicción de la nubosidad a corto plazo a partir de imágenes de cámara de cielo en la Ciudad de México*, Ph.D. dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico, 2021.

<https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/d0603600-c39c-4211-85d8-9158c179c70a/content>

[26] Servicio Meteorológico Nacional (SMN), “Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvias.” <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

[27] The Weather Channel, “Pronóstico mensual” [.https://weather.com/es-MX/tiempo/mensual](https://weather.com/es-MX/tiempo/mensual)

[28] World Meteorological Organization (WMO), “El Niño/La Niña Update (May 2011),” May 23, 2011. <https://wmo.int/publication-series/el-ninola-nina-update-may-2011>

[29] NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL), “La Niña FAQs.” https://www.pmel.noaa.gov/el_nino/lanina-faq

[30] R. Seager *et al.*, “*Dynamical Causes of the 2010–11 Texas–Northern Mexico Drought*,” *Journal of Hydrometeorology*, vol. 15, no. 1, 2014. https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/15/1/jhm-d-13-024_1.xml

[31] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)–Servicio Meteorológico Nacional (SMN), “Comunicado de Prensa 397-11: Se registran los niveles de lluvia más bajos...,” Nov. 2011. <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/normatividad/Boletines%20de%20CONAGUA/2011/Noviembre%202011/Comunicado%20de%20Prensa%20397-11.pdf>

[32] World Meteorological Organization (WMO), *El Niño/La Niña Update (February 2016): The 2015–16 El Niño has passed its peak strength, but remains strong*, Feb. 2016. https://wmo.int/sites/default/files/2023-06/WMO_ENSO_Feb16_Eng.pdf

[33] V. O. Magaña *et al.*, “*Impact of El Niño on precipitation in Mexico*,” 2003. <https://www.redalyc.org/pdf/568/56842304.pdf>

[34] J. L. Bravo Cabrera, “*Effects of ENSO on precipitation in Mexico City*,” 2018. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112018000300002&script=sci_arttext

[35] M. Sengupta *et al.*, “The National Solar Radiation Data Base (NSRDB),” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 51–60, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.003. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830087X>

[36] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “What is the NSRDB?” <https://nsrdb.nrel.gov/about/what-is-the-nsrdb>

[37] K. Papachristopoulou *et al.*, “SENSE2: The New Version of CM SAF’s Satellite-based Surface Solar Irradiance Data Record (1983–2020),” *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* (preprint), 2023. <https://amt.copernicus.org/preprints/amt-2023-110/amt-2023-110-manuscript-version2.pdf>

- [38] C. A. Gueymard, A. Habte, and M. Sengupta, “Reducing Uncertainties in Large-Scale Solar Resource Data: The Impact of Aerosols,” accepted manuscript (DOE Public Access Plan), 2018. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1478618>
- [39] M. Sengupta, A. Weekley, A. Habte, A. Lopez, and C. Molling, *Validation of the National Solar Radiation Database (NSRDB) (2005–2012): Preprint*, NREL/CP-5D00-64981, Sep. 2015. <https://docs.nrel.gov/docs/fy15osti/64981.pdf>
- [40] Gobierno de la Ciudad de México, SIMAT, “Sistema de Monitoreo Atmosférico.” <https://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27&dc=ZA==>
- [41] World Meteorological Organization (WMO), *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (WMO-No. 1203)*. Geneva, Switzerland: WMO, 2017. <https://library.wmo.int/es/records/item/55797-wmo-guidelines-on-the-calculation-of-climate-normals>
- [42] *El Universal*, “CDMX: el origen de las cuatro letras que rebautizaron a Ciudad de México,” 2018. <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/cdmx-el-origen-de-las-cuatro-letras-que-rebautizaron-ciudad-de-mexico/>
- [43] Gobierno de México, CONAGUA, “Acerca del organismo.” <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/acerca-del-organismo>
- [44] Gobierno de la Ciudad de México, SIMAT, “El monitoreo de la calidad del aire (RAMA).” <https://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml%3D%27>
- [45] Gobierno de la Ciudad de México, SEDEMA, “Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.” <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/>
- [46] Gobierno de México, Comisión Ambiental, “¿Cómo se monitorea la calidad del aire en la ZMVM?” <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/como-se-monitorea-la-calidad-del-aire-en-la-zmvm?idiom=es>
- [47] Gobierno de México, CONAGUA, “Sistema Nacional de Información del Agua (SINA).” <https://www.gob.mx/conagua/articulos/sistema-nacional-de-informacion-del-agua-sina-302952>
- [48] Gobierno de México, SMN, “¿Qué hacemos?”: <https://www.gob.mx/smn/que-hacemos>
- [49] Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), “Misión y visión.” <https://www.unam.mx/mision-y-vision>

9. Anexos

9.1 Glosario

- **CDMX:** Abreviatura de Ciudad de México (CD = “ciudad”, MX = “México”), usada para referirse a la capital del país [42].
- **CONAGUA** (Comisión Nacional del Agua): Organismo federal encargado de administrar y preservar las aguas nacionales en México [43].
- **DHI** (Diffuse Horizontal Irradiance): Irradiancia difusa horizontal, componente de irradiancia que llega a una superficie horizontal tras ser dispersada/difundida por la atmósfera (no proviene del haz directo del sol) [6].
- **DNI** (Direct Normal Irradiance): irradiancia normal directa, es la parte de la radiación solar que incide directamente del sol a la Tierra sobre una superficie perpendicular a los rayos solares [6].
- **ENSO** (El Niño–Southern Oscillation): El Niño–Oscilación del Sur, fenómeno climático recurrente del Pacífico tropical asociado a fluctuaciones de temperatura superficial del mar y presión atmosférica, cuyas fases principales son El Niño (calentamiento) y La Niña (enfriamiento) afectando patrones meteorológicos globales [29].
- **GHI** (Global Horizontal Irradiance): Irradiancia global horizontal; irradiancia solar total que incide sobre una superficie horizontal, incluye componentes directa y difusa [6].
- **NSRDB** (National Solar Radiation Database): base de datos (NREL) con una colección “serial completa” de datos de radiación solar y meteorología (valores horarios y/o subhorarios), derivada de satélite/modelos, que incluye variables como GHI y DHI [36].
- **RAMA** (Red Automática de Monitoreo Atmosférico): subsistema del SIMAT-CDMX para medición continua de contaminantes atmosféricos criterio [44].
- **REDMET** (Red de Meteorología y Radiación Solar): subsistema del SIMAT-CDMX que mide las principales variables meteorológicas de superficie [44].
- **SEDEMA** (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México): dependencia del Gobierno de la Ciudad de México encargada de la política ambiental local [45].
- **SIMAT** (Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México): sistema encargado de medir y difundir la calidad del aire y los contaminantes en la Zona Metropolitana del Valle de México [46].
- **SINA** (Sistema Nacional de Información del Agua): sistema institucional de CONAGUA que integra y difunde información hídrica, estadística y geográfica para apoyar la planeación y evaluación de políticas públicas del sector agua [47].
- **SMN** (Servicio Meteorológico Nacional): organismo encargado de proporcionar información del estado del tiempo a escala nacional y local en México [48].
- **UNAM** (Universidad Nacional Autónoma de México): institución pública, autónoma y laica de educación superior; realiza docencia, investigación y difusión de la cultura [49].

9.2 Resumen mensual de precipitación (mm) de CONAGUA/SMN por entidad Federativa y Nacional en 2004.



Precipitación (mm) por Entidad Federativa y Nacional
2004

| Estado | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Anual |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Aguascalientes | 32.1 | 1.4 | 31.6 | 0.0 | 46.8 | 216.3 | 128.8 | 94.0 | 137.4 | 22.0 | 0.8 | 0.1 | 711.3 |
| Baja California | 10.2 | 82.3 | 12.9 | 5.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.4 | 0.0 | 147.9 | 16.7 | 80.7 | 357.5 |
| Baja California Sur | 37.4 | 5.4 | 4.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.9 | 45.5 | 59.0 | 25.3 | 1.9 | 5.5 | 203.4 |
| Campeche | 9.1 | 62.4 | 19.2 | 8.7 | 184.1 | 118.4 | 196.2 | 160.7 | 211.2 | 159.2 | 76.7 | 19.3 | 1225.2 |
| Ciudad de México | 25.5 | 0.1 | 23.0 | 18.9 | 48.2 | 142.3 | 115.7 | 144.1 | 150.7 | 53.1 | 6.1 | 0.9 | 728.6 |
| Coahuila | 19.0 | 15.6 | 70.1 | 81.6 | 25.1 | 85.6 | 46.8 | 77.1 | 74.5 | 38.8 | 58.4 | 1.5 | 594.2 |
| Colima | 41.6 | 0.0 | 3.0 | 0.0 | 10.3 | 157.4 | 205.6 | 197.7 | 289.8 | 70.0 | 0.9 | 1.7 | 978.0 |
| Chiapas | 45.7 | 42.3 | 31.1 | 42.8 | 193.8 | 250.2 | 249.1 | 195.7 | 310.8 | 235.2 | 69.1 | 48.0 | 1713.8 |
| Chihuahua | 38.4 | 18.7 | 36.5 | 25.5 | 3.4 | 74.9 | 165.5 | 132.1 | 99.9 | 69.9 | 59.0 | 21.6 | 745.4 |
| Durango | 43.5 | 6.7 | 30.1 | 7.4 | 9.1 | 78.9 | 136.4 | 130.3 | 140.1 | 26.9 | 33.2 | 2.1 | 644.7 |
| Guanajuato | 35.6 | 0.2 | 21.6 | 4.4 | 61.7 | 199.8 | 131.3 | 166.3 | 205.5 | 42.1 | 1.9 | 7.5 | 877.9 |
| Guerrero | 47.6 | 0.0 | 7.4 | 2.2 | 107.4 | 216.9 | 177.2 | 220.4 | 196.6 | 162.9 | 4.0 | 1.6 | 1144.2 |
| Hidalgo | 7.2 | 3.6 | 35.0 | 49.9 | 59.7 | 159.9 | 78.3 | 96.6 | 55.1 | 72.5 | 8.0 | 3.7 | 629.4 |
| Jalisco | 33.4 | 0.3 | 9.9 | 0.2 | 46.7 | 273.1 | 153.7 | 232.9 | 260.8 | 27.1 | 0.8 | 10.6 | 1049.5 |
| Estado de México | 16.1 | 0.0 | 0.0 | 11.4 | 60.4 | 176.9 | 119.8 | 155.6 | 133.6 | 70.8 | 4.9 | 1.6 | 751.1 |
| Michoacán | 30.4 | 0.0 | 11.6 | 0.6 | 57.5 | 206.8 | 155.0 | 186.7 | 192.6 | 66.8 | 0.3 | 8.4 | 916.7 |
| Morelos | 26.6 | 0.0 | 4.3 | 5.4 | 62.7 | 234.0 | 268.2 | 238.1 | 250.4 | 112.8 | 4.9 | 0.1 | 1207.6 |
| Nayarit | 70.5 | 2.0 | 0.3 | 0.0 | 1.7 | 223.2 | 348.1 | 387.0 | 305.0 | 76.0 | 21.1 | 0.1 | 1435.1 |
| Nuevo León | 14.2 | 12.2 | 85.3 | 123.9 | 27.7 | 68.2 | 50.1 | 97.7 | 269.3 | 62.0 | 16.1 | 3.5 | 830.2 |
| Oaxaca | 20.9 | 22.7 | 26.4 | 66.0 | 87.4 | 262.7 | 219.6 | 233.6 | 195.7 | 174.0 | 17.1 | 14.6 | 1340.7 |
| Puebla | 29.4 | 8.7 | 66.2 | 76.4 | 93.8 | 218.5 | 187.1 | 212.3 | 232.3 | 145.1 | 14.5 | 18.0 | 1302.3 |
| Querétaro | 19.1 | 0.0 | 28.5 | 9.0 | 58.4 | 181.3 | 117.4 | 94.6 | 146.3 | 39.2 | 1.3 | 3.4 | 698.5 |
| Quintana Roo | 8.6 | 52.7 | 62.0 | 55.4 | 115.2 | 249.9 | 100.0 | 52.0 | 208.2 | 121.0 | 46.2 | 16.0 | 1087.2 |
| San Luis Potosí | 18.6 | 5.1 | 0.0 | 33.6 | 84.6 | 241.2 | 106.9 | 68.8 | 178.0 | 59.1 | 7.7 | 7.2 | 810.7 |
| Sinaloa | 77.2 | 14.8 | 11.3 | 1.3 | 0.2 | 47.5 | 187.5 | 198.4 | 155.9 | 104.2 | 61.2 | 12.6 | 872.1 |
| Sonora | 33.8 | 9.0 | 13.6 | 14.7 | 2.6 | 12.3 | 152.3 | 103.1 | 156.9 | 46.6 | 19.1 | 9.7 | 573.7 |
| Tabasco | 168.8 | 108.6 | 85.2 | 122.6 | 252.8 | 118.8 | 123.3 | 222.8 | 312.4 | 190.0 | 136.3 | 122.5 | 1964.1 |
| Tamaulipas | 30.5 | 9.7 | 59.3 | 101.3 | 76.7 | 179.5 | 44.7 | 61.4 | 130.5 | 53.4 | 15.0 | 10.9 | 772.9 |
| Tlaxcala | 10.7 | 1.3 | 33.4 | 45.9 | 93.8 | 129.7 | 92.2 | 78.3 | 126.9 | 90.5 | 3.7 | 0.0 | 706.4 |
| Veracruz | 44.6 | 28.1 | 69.1 | 71.1 | 143.4 | 226.8 | 144.2 | 200.9 | 204.1 | 210.8 | 81.4 | 58.5 | 1483.0 |
| Yucatán | 7.8 | 24.6 | 11.2 | 69.9 | 104.9 | 134.6 | 197.1 | 151.1 | 215.5 | 88.3 | 24.9 | 9.0 | 1038.9 |
| Zacatecas | 34.0 | 2.8 | 33.2 | 1.4 | 38.6 | 164.7 | 102.3 | 126.4 | 161.8 | 19.2 | 2.5 | 1.9 | 688.8 |
| Nacional | 33.4 | 18.1 | 32.0 | 35.1 | 53.2 | 131.6 | 134.6 | 137.7 | 161.7 | 85.6 | 32.5 | 16.7 | 872.2 |

9.3 Resumen mensual de precipitación (mm) de CONAGUA/SMN por entidad Federativa y Nacional en 2024.



Precipitación (mm) por Entidad Federativa y Nacional
2024

| Estado | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Anual |
|---------------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Aguascalientes | 0.2 | 35.8 | 0.0 | 0.0 | 4.3 | 106.5 | 212.7 | 86.6 | 136.1 | 11.8 | 0.0 | 1.7 | 595.7 |
| Baja California | 20.5 | 28.5 | 32.0 | 4.4 | 0.4 | 4.3 | 1.8 | 3.0 | 0.0 | 0.0 | 1.7 | 0.1 | 96.7 |
| Baja California Sur | 1.3 | 3.5 | 4.4 | 0.3 | 0.0 | 1.7 | 6.4 | 16.5 | 30.0 | 0.1 | 0.3 | 0.0 | 64.5 |
| Campeche | 52.7 | 17.8 | 7.2 | 4.6 | 18.9 | 440.4 | 143.6 | 195.1 | 171.8 | 200.3 | 72.4 | 24.0 | 1348.8 |
| Coahuila | 6.3 | 16.1 | 6.5 | 7.0 | 18.4 | 57.6 | 47.6 | 21.6 | 82.8 | 3.0 | 4.9 | 4.2 | 276.0 |
| Colima | 0.6 | 34.8 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 115.1 | 412.3 | 389.7 | 555.7 | 91.5 | 2.9 | 1.5 | 1604.1 |
| Chiapas | 44.9 | 16.8 | 12.3 | 38.9 | 64.4 | 439.3 | 267.5 | 270.1 | 331.3 | 231.7 | 91.4 | 46.0 | 1854.4 |
| Chihuahua | 9.5 | 11.6 | 3.2 | 1.3 | 0.3 | 38.7 | 79.8 | 56.8 | 37.0 | 2.1 | 3.5 | 0.1 | 243.7 |
| Ciudad de México | 0.7 | 13.2 | 0.1 | 9.0 | 33.5 | 105.0 | 145.6 | 235.1 | 159.6 | 45.5 | 14.6 | 3.0 | 764.7 |
| Durango | 1.5 | 31.3 | 0.2 | 0.5 | 1.0 | 48.7 | 142.1 | 63.7 | 79.1 | 4.9 | 0.7 | 5.8 | 379.4 |
| Guanajuato | 0.8 | 14.8 | 0.0 | 0.5 | 12.2 | 133.5 | 214.5 | 106.5 | 115.4 | 6.7 | 1.2 | 3.7 | 609.5 |
| Guerrero | 0.8 | 10.9 | 0.0 | 0.5 | 8.5 | 139.2 | 256.0 | 226.8 | 561.2 | 99.1 | 7.9 | 2.2 | 1313.0 |
| Hidalgo | 7.8 | 10.2 | 5.4 | 12.0 | 10.2 | 164.3 | 162.3 | 68.0 | 102.1 | 40.3 | 20.8 | 24.2 | 627.6 |
| Jalisco | 0.9 | 31.2 | 0.0 | 0.2 | 5.1 | 127.3 | 299.4 | 239.4 | 224.1 | 45.6 | 5.7 | 1.8 | 980.8 |
| Estado de México | 2.1 | 20.6 | 0.1 | 8.8 | 25.3 | 160.3 | 267.3 | 258.8 | 232.8 | 54.6 | 13.1 | 3.2 | 1046.9 |
| Michoacán | 0.2 | 15.9 | 0.0 | 0.6 | 6.5 | 99.3 | 269.3 | 229.2 | 310.8 | 34.5 | 8.8 | 5.6 | 980.8 |
| Morelos | 3.0 | 18.7 | 0.0 | 0.9 | 41.8 | 321.3 | 449.0 | 415.4 | 497.2 | 119.1 | 10.1 | 0.2 | 1876.8 |
| Nayarit | 0.1 | 37.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 169.4 | 289.7 | 266.6 | 186.7 | 51.9 | 6.6 | 1.3 | 1009.0 |
| Nuevo León | 8.8 | 24.7 | 18.7 | 16.7 | 43.7 | 233.5 | 86.8 | 31.4 | 120.8 | 39.8 | 3.0 | 22.4 | 650.2 |
| Oaxaca | 17.0 | 11.4 | 9.0 | 17.5 | 18.5 | 258.7 | 236.1 | 199.2 | 356.9 | 219.5 | 26.0 | 9.0 | 1378.7 |
| Puebla | 15.2 | 16.3 | 8.3 | 18.4 | 29.7 | 256.9 | 252.9 | 179.2 | 239.2 | 127.7 | 27.7 | 19.7 | 1191.1 |
| Querétaro | 3.1 | 9.5 | 1.4 | 4.5 | 13.6 | 136.0 | 165.1 | 55.7 | 88.3 | 11.9 | 3.1 | 9.2 | 501.4 |
| Quintana Roo | 96.0 | 26.9 | 14.1 | 24.8 | 0.3 | 555.5 | 183.2 | 132.0 | 185.4 | 339.8 | 129.3 | 86.2 | 1773.4 |
| San Luis Potosí | 4.9 | 23.0 | 3.2 | 7.5 | 7.8 | 175.9 | 236.1 | 43.8 | 91.2 | 24.6 | 4.0 | 24.7 | 646.5 |
| Sinaloa | 0.9 | 16.4 | 0.9 | 0.2 | 0.0 | 40.3 | 150.2 | 209.9 | 117.3 | 18.3 | 1.5 | 1.0 | 557.0 |
| Sonora | 24.7 | 23.5 | 16.7 | 5.7 | 0.0 | 33.8 | 94.9 | 94.9 | 11.8 | 1.9 | 2.5 | 0.1 | 310.5 |
| Tabasco | 98.4 | 33.4 | 17.7 | 14.3 | 44.4 | 330.8 | 163.7 | 219.5 | 271.6 | 379.7 | 94.2 | 92.8 | 1760.4 |
| Tamaulipas | 9.1 | 25.8 | 18.5 | 13.8 | 22.5 | 308.8 | 145.1 | 46.8 | 148.3 | 62.4 | 7.6 | 29.3 | 838.0 |
| Tlaxcala | 6.7 | 11.7 | 1.3 | 19.0 | 45.4 | 130.1 | 162.9 | 116.7 | 144.2 | 72.7 | 14.6 | 10.5 | 735.6 |
| Veracruz | 60.0 | 19.8 | 15.7 | 20.5 | 6.5 | 305.3 | 303.4 | 210.7 | 229.4 | 330.4 | 48.8 | 55.8 | 1606.2 |
| Yucatán | 60.9 | 17.7 | 21.5 | 17.0 | 1.3 | 438.2 | 151.7 | 190.8 | 230.3 | 250.7 | 67.0 | 30.0 | 1477.2 |
| Zacatecas | 0.6 | 37.6 | 0.0 | 0.7 | 4.4 | 91.1 | 156.6 | 63.7 | 77.9 | 10.5 | 0.2 | 7.7 | 451.1 |
| Nacional | 17.0 | 20.1 | 8.2 | 7.8 | 11.0 | 151.9 | 153.8 | 117.2 | 145.9 | 71.9 | 17.5 | 13.4 | 735.7 |