

Diseño y Optimización de Sistemas de Energía Solar

Jose Manuel Criollo Chapal

Facultad de Ingeniería

Universidad de Antioquia

2589343: Computación Numérica

Jaime Valencia Velásquez

5 de septiembre de 2025

Contenido

Introducción	1
Marco Teórico	1
Geometría solar	1
Irradiancia solar	3
Conversión fotovoltaica	3
Metodología	4
Definición de parámetros de entrada	4
Cálculo de la posición solar	4
Estimación de la irradiancia	5
Cálculo de la energía producida	5
Simulación y visualización	5
Resultados	6
Posición solar	6
Irradiancia sobre el panel	7
Producción de energía	7
Comparación con datos de referencia	8
Discusión	8
Conclusiones	9
Referencias	11

Introducción

La energía solar es una de las fuentes renovables más importantes y con mayor potencial en Colombia, debido a la ubicación del país en la zona tropical donde hay radiación casi constante durante todo el año. Para aprovecharla es necesario conocer cómo se mueve el sol en el cielo y cómo esa radiación puede aprovecharse en paneles solares para producir electricidad.

En este trabajo se desarrolla una simulación en Python que permite calcular la posición del sol, estimar la radiación sobre un panel y analizar la energía que este puede generar a lo largo de un día. El objetivo es aplicar conceptos de computación numérica al diseño y evaluación de un sistema fotovoltaico sencillo.

Marco Teórico

Geometría solar

La geometría solar estudia la posición aparente del sol en el cielo y cómo esta cambia a lo largo del día y del año. Dos ángulos son especialmente importantes:

- **Altitud solar:** ángulo del sol sobre el horizonte, que alcanza su valor máximo al mediodía.

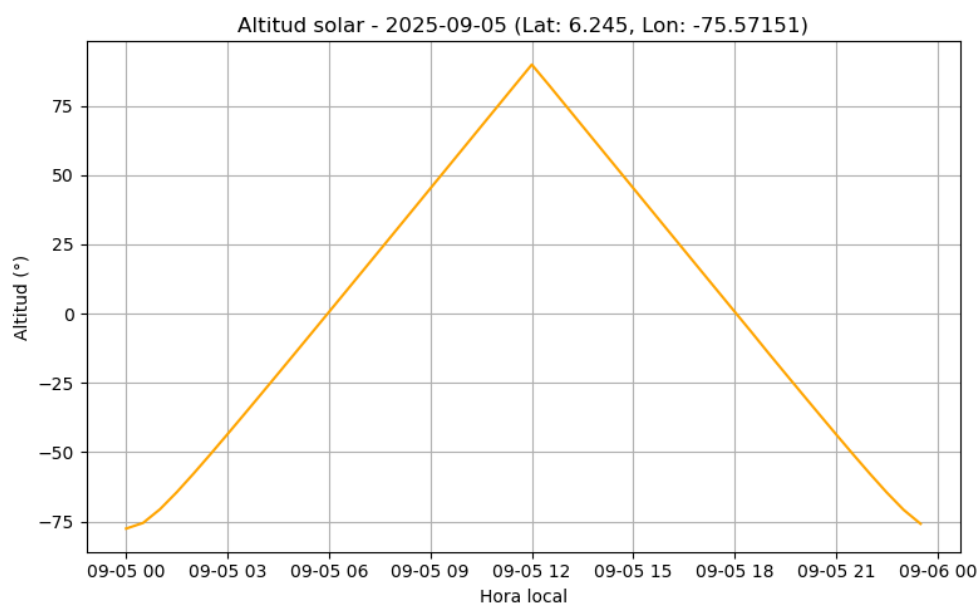


Figura 1

Altitud solar a lo largo del día (simulación en Python, 2025-09-05)

- **Azimut solar:** ángulo medido en el plano horizontal, normalmente desde el norte hacia el este, que indica la dirección del sol.

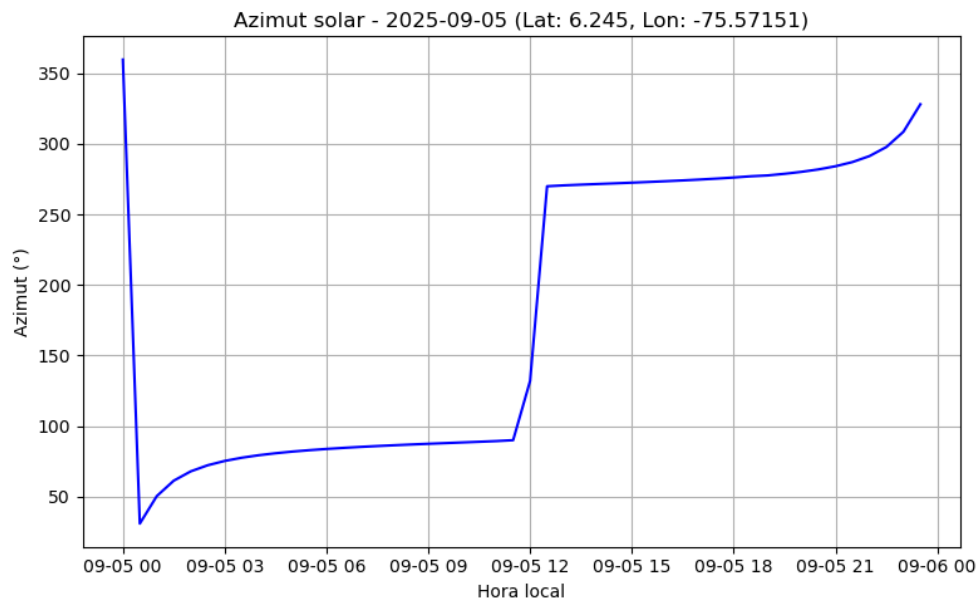


Figura 2

Azimut solar a lo largo del día (simulación en Python, 2025-09-05)

Estos parámetros dependen de la latitud del lugar, la fecha y la hora local. En regiones cercanas al ecuador, como Colombia, el sol alcanza ángulos de altitud elevados durante gran parte del año, lo que ofrece una ventaja para la captación de energía solar.

Irradiancia solar

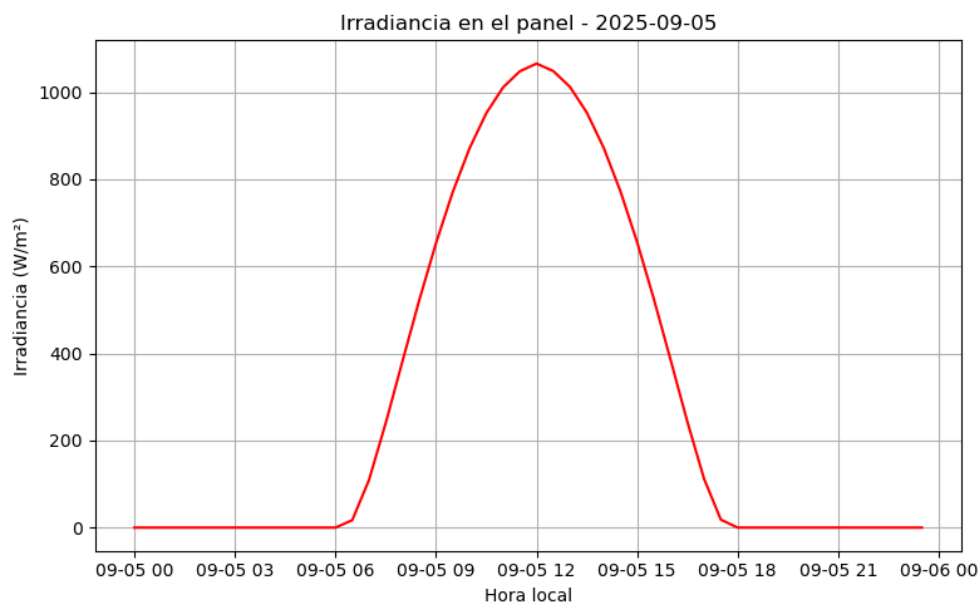


Figura 3

Irradiancia incidente sobre el panel fotovoltaico (simulación en Python, 2025-09-05)

The irradiancia es la potencia of the solar radiación recibida por unidad de área, expresada in vatios por metro cuadrado (W / m^2). Se compone de tres elementos principales:

- **Radiación directa normal (DNI):** llega directamente del sol sin haber sido dispersada.
- **Radiación difusa (DHI):** proviene de distintas direcciones debido a la dispersión en la atmósfera.
- **Radiación global (GHI):** suma de la radiación directa y difusa recibida en una superficie horizontal.

El valor de la irradiancia depende de la posición solar y de factores atmosféricos como nubosidad, polvo o aerosoles.

Conversión fotovoltaica

Los paneles solares fotovoltaicos convierten la radiación solar en electricidad a través del efecto fotoeléctrico. Los principales tipos de paneles son:

- **Monocristalinos:** ofrecen alta eficiencia, aunque su costo es mayor.
- **Policristalinos:** más económicos, con una eficiencia moderada.

- **De película delgada:** menos eficientes, pero flexibles y de bajo costo de producción.

La eficiencia de un panel depende de factores como la temperatura, el ángulo de inclinación y las pérdidas eléctricas en el sistema. Las curvas características I-V (corriente-voltaje) permiten describir la relación entre corriente, voltaje y potencia de salida bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura.

Metodología

La metodología utilizada en este trabajo se divide en varias etapas que permiten modelar y simular el comportamiento de un sistema fotovoltaico sencillo. El proceso se desarrolló de la siguiente manera:

Definición de parámetros de entrada

Se solicitaron al usuario los valores necesarios para realizar los cálculos:

- **Ubicación geográfica (latitud y longitud):** coordenadas que permiten localizar un punto en la superficie de la Tierra. La latitud indica la distancia respecto al ecuador y la longitud la distancia respecto al meridiano de Greenwich.
- **Fecha y hora local:** determinan la posición del sol en el cielo, ya que este varía a lo largo del día y del año.
- **Inclinación del panel:** ángulo entre el panel y la horizontal. Una inclinación adecuada permite captar más radiación solar.
- **Azimut del panel:** dirección hacia la que apunta el panel, medida desde el norte en el sentido de las manecillas del reloj.
- **Especificaciones del panel:** se consideran el área (superficie del panel en m^2) y la eficiencia (porcentaje de radiación solar que convierte en electricidad).

Cálculo de la posición solar

Se aplicaron fórmulas de geometría solar para obtener:

- **Ángulo de altitud solar:** ángulo entre el sol y el horizonte. Indica qué tan alto está el sol en el cielo.
- **Ángulo de azimuth solar:** dirección horizontal en la que se encuentra el sol, medida generalmente desde el norte hacia el este.

Estimación de la irradiancia

Se utilizó un modelo simplificado que considera:

- **Radiación extraterrestre:** cantidad de energía solar que llega al límite superior de la atmósfera.
- **Atenuación atmosférica:** reducción de la radiación solar al atravesar la atmósfera, debida a fenómenos como la dispersión o absorción.
- **Radiación directa:** fracción de radiación que llega en línea recta desde el sol.
- **Radiación difusa:** fracción dispersada en la atmósfera que llega desde distintas direcciones.
- **Radiación global:** suma de la radiación directa y difusa que recibe una superficie horizontal.

Cálculo de la energía producida

La potencia generada por el panel se estimó mediante la ecuación:

$$P = I_t \cdot A \cdot \eta$$

donde:

- I_t : irradiancia sobre la superficie del panel (W/m^2).
- A : área del panel (m^2).
- η : eficiencia de conversión del panel (valor entre 0 y 1).

Simulación y visualización

Se programó un modelo en Python que calcula estos valores a lo largo de un día, dividiendo el tiempo en intervalos definidos (por ejemplo, cada 30 minutos). Finalmente, se generaron gráficos que muestran:

- La variación de la altitud solar durante el día.
- La potencia generada por el panel en cada intervalo.

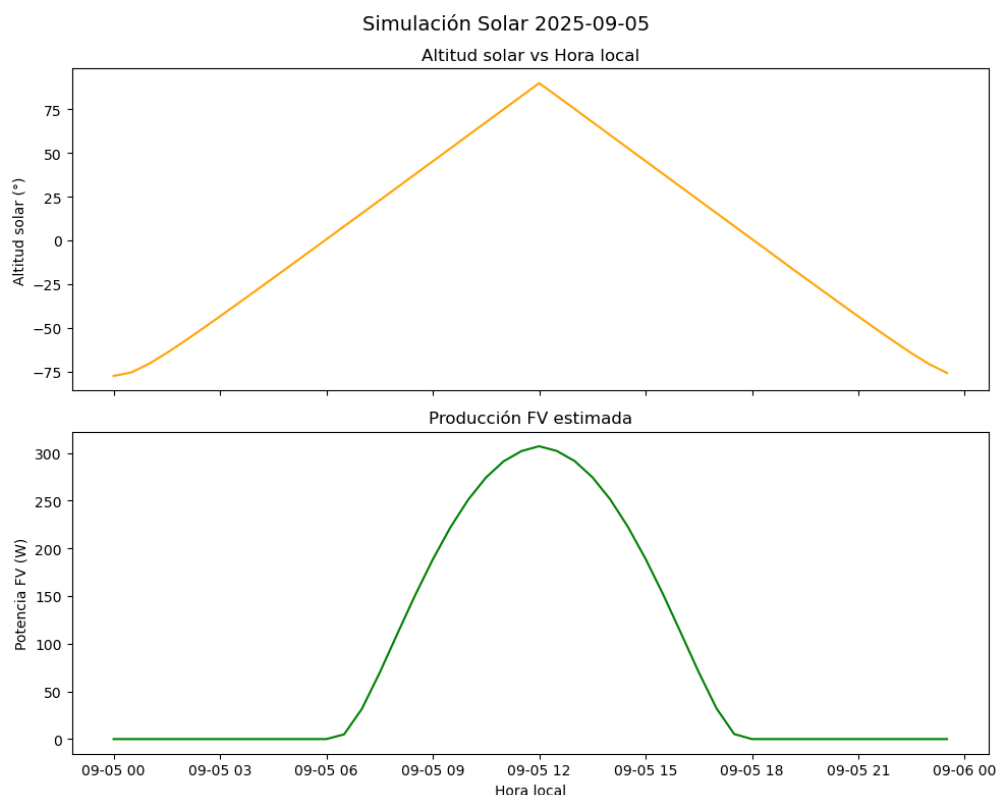


Figura 4

Simulación de la trayectoria solar y de la producción fotovoltaica estimada para el 5 de septiembre de 2025 en Medellín. Los resultados se obtuvieron mediante un modelo en Python

Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación realizada en Python. Los cálculos corresponden a la posición solar, la irradiancia sobre el panel y la potencia estimada a lo largo del día para la ubicación seleccionada.

Posición solar

Se graficó la **altitud solar** en función de la hora del día. Este gráfico muestra cómo el sol asciende desde el amanecer, alcanza un máximo cercano al mediodía y luego desciende hasta el atardecer.

- Una altitud alta significa que el sol está casi sobre la vertical y por lo tanto la radiación incidente es mayor.
- Una altitud baja corresponde a las primeras horas de la mañana o últimas de la tarde, cuando la radiación es menor.

Irradiancia sobre el panel

Se obtuvo la **irradiancia incidente** en la superficie del panel para cada intervalo de tiempo. Este resultado depende de:

- La posición del sol (altitud y azimut).
- La inclinación y orientación del panel.
- Las condiciones atmosféricas simplificadas en el modelo.

El gráfico correspondiente permite visualizar los momentos del día en que el panel recibe mayor energía solar.

Producción de energía

Se calculó la **potencia instantánea** generada por el panel en cada intervalo de tiempo, así como la **energía diaria total** producida.

- La potencia instantánea muestra el comportamiento de generación hora a hora.

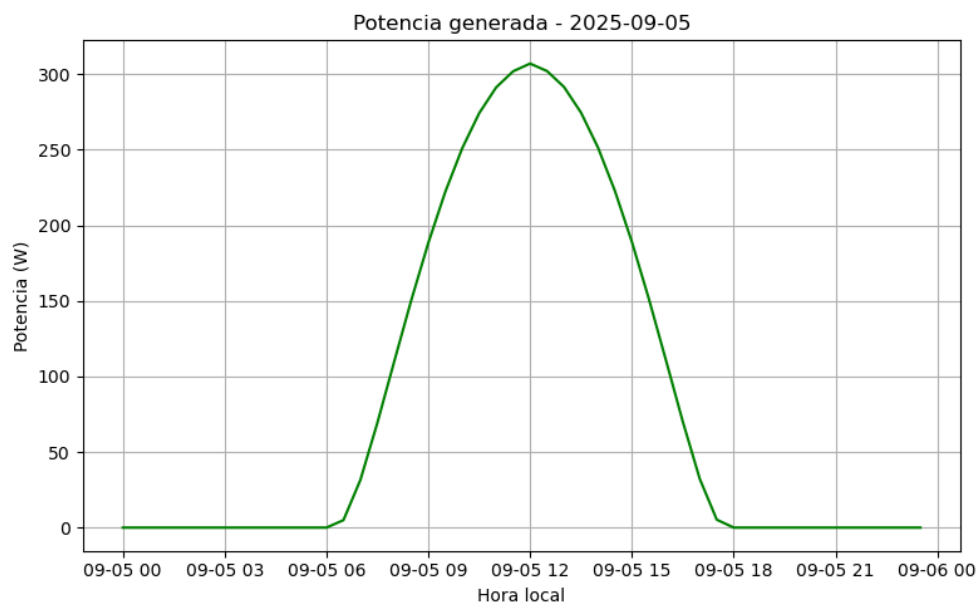


Figura 5

Potencia fotovoltaica generada a lo largo del día (simulación en Python, 2025-09-05)

- La energía total resume el aporte acumulado durante toda la jornada.

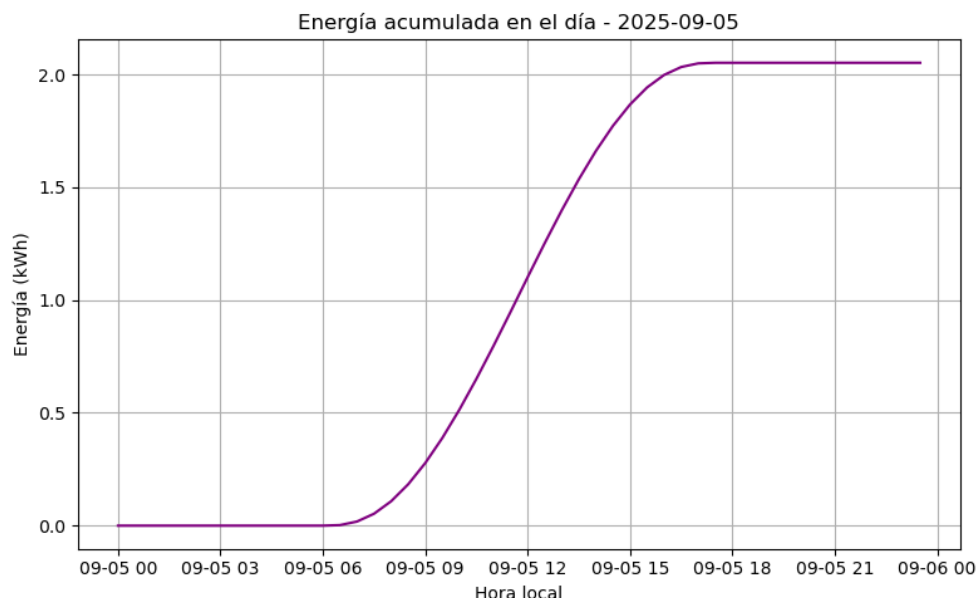


Figura 6

Energía fotovoltaica acumulada durante el día (simulación en Python, 2025-09-05)

Comparación con datos de referencia

Para validar el modelo, los resultados se contrastaron con valores de radiación solar obtenidos de plataformas especializadas (como PVGIS o Meteonorm).

- Una coincidencia razonable indica que el modelo es adecuado para estimaciones iniciales.
- Las diferencias observadas pueden deberse a la simplificación de los efectos atmosféricos o a la variabilidad climática real.

Discusión

Los resultados obtenidos permiten analizar de manera práctica la relación entre la posición solar, la irradiancia disponible y la energía generada por un panel fotovoltaico. En primer lugar, la gráfica de altitud solar mostró un comportamiento esperado: el sol asciende desde el amanecer, alcanza un máximo hacia el mediodía y luego desciende hasta el atardecer. Este patrón confirma la importancia de la ubicación geográfica y la hora del día en la disponibilidad de radiación solar. En el caso de Colombia, por su cercanía al ecuador, se observa que el sol alcanza ángulos de altitud elevados durante gran parte del año, lo que favorece la captación de energía.

En cuanto a la irradiancia incidente sobre el panel, se evidenció que los valores más altos

se concentran alrededor del mediodía, cuando el sol está más cercano a la vertical. Esto coincide con lo esperado teóricamente, ya que un ángulo de incidencia más perpendicular maximiza la cantidad de radiación absorbida. La orientación y la inclinación del panel también jugaron un papel clave, pues pequeñas variaciones en estos parámetros pueden afectar de manera significativa la energía captada. Este aspecto es fundamental en el diseño de sistemas solares, donde se busca optimizar la inclinación para cada ubicación geográfica.

Respecto a la producción de energía, la simulación mostró un perfil en forma de campana, con valores bajos en las primeras horas de la mañana y en la tarde, y un pico de potencia hacia la mitad del día. Este comportamiento es coherente con la variación diaria de la irradiancia solar y permite estimar la energía total que podría aportar el panel en una jornada típica. Aunque el modelo empleado es simplificado y no considera efectos como nubosidad, sombras u otras pérdidas eléctricas, los resultados ofrecen una aproximación útil para comprender el funcionamiento básico de un sistema fotovoltaico.

La comparación con datos de referencia disponibles en plataformas de radiación solar evidenció que, si bien existen diferencias, el modelo reproduce de manera aceptable las tendencias principales. Las discrepancias se explican por la variabilidad climática real y por las simplificaciones del modelo, que asume condiciones atmosféricas promedio. A pesar de ello, la herramienta desarrollada cumple con el objetivo de integrar conceptos de geometría solar, irradiancia y conversión fotovoltaica en un entorno de simulación accesible y aplicable a distintos escenarios.

En general, la simulación permitió comprender cómo se relacionan los factores astronómicos y físicos en la producción de energía solar, y evidenció la importancia de una adecuada parametrización en el diseño de sistemas fotovoltaicos. Estos resultados constituyen un primer paso hacia modelos más complejos que podrían incorporar variaciones meteorológicas, diferentes tipos de paneles o configuraciones de sistemas solares más avanzadas.

Conclusiones

El desarrollo de la simulación permitió comprender de manera clara la relación entre la posición del sol, la irradiancia disponible y la energía generada por un panel fotovoltaico. Se evidenció que factores astronómicos como la latitud, la longitud, la hora del día y la época del año determinan la trayectoria solar y, en consecuencia, influyen directamente en la producción energética.

Los resultados mostraron que la irradiancia máxima se presenta alrededor del mediodía, cuando el sol alcanza su mayor altitud, y que la inclinación y orientación del panel juegan un papel fundamental en el aprovechamiento de la radiación. De este modo, se confirma la importancia de ajustar adecuadamente la geometría del sistema fotovoltaico según la ubicación geográfica.

Aunque el modelo utilizado fue simplificado y no consideró variaciones atmosféricas complejas, la comparación con datos de referencia indicó que los cálculos ofrecen una aproximación válida y útil para fines académicos y de diseño preliminar. Esto resalta el valor de las herramientas computacionales como Python en la enseñanza y análisis de sistemas de energía renovable.

En términos generales, el proyecto permitió integrar conceptos de geometría solar, irradiancia y conversión fotovoltaica, fortaleciendo la comprensión teórica y práctica sobre el funcionamiento de los sistemas solares. Además, abre la posibilidad de futuras mejoras incorporando condiciones meteorológicas reales, diferentes tecnologías de paneles o configuraciones más avanzadas para una estimación más precisa.

Referencias

Solar Reviews. (n.d.). *Types of solar panels: Monocrystalline, polycrystalline, and thin-film*.

Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de <https://www.solarreviews.com/blog/pros-and-cons-of-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels>

Boston Solar. (n.d.). *How do temperature and shade affect solar panel efficiency?*. Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de <https://www.bostonsolar.us/solar-blog-resource-center/blog/how-do-temperature-and-shade-affect-solar-panel-efficiency/>

PV Education. (n.d.). *Effect of temperature*. Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>

PV Education. (n.d.). *Declination angle*. Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/declination-angle>

Wikipedia. (n.d.). *Solar irradiance*. Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_irradiance

Wikipedia. (n.d.). *Equation of time*. Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de https://en.wikipedia.org/wiki/Equation_of_time

Wikipedia. (n.d.). *Solar azimuth angle*. Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_azimuth_angle

Wikipedia. (n.d.). *Solar zenith angle*. Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_zenith_angle