

Metodología para la Estimación del Potencial Energético Solar. Caso de Estudio Motul, Yucatán.

Rafael Chávez Tec, José Luis Adrián Perales Alcacio, Elma Guadalupe Yam Huh
Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Motul
rafael.chavez@itsmotul.edu.mx

RESUMEN

El uso de energías provenientes de fuentes renovables es actualmente una de las claves para la transición energética en México y otros países. La energía fotovoltaica es una tecnología que utiliza la radiación solar para convertirla en energía eléctrica. Uno de los parámetros más importantes a considerar en la energía solar fotovoltaica es la evaluación del potencial energético solar (PES) en una zona determinada. Para ello es fundamental conocer cuáles son las horas solares pico (HSP) en la región de estudio. En este trabajo se desarrolló un procedimiento para la obtención del valor del PES. Se tomaron mediciones de forma periódica de los valores de irradiancia utilizando un instrumento de para medir la radiación solar. Partiendo de esos datos se calculó la irradiación solar, la cual puede ser interpretada como el área bajo la curva de la irradiancia, y el resultado se divide entre 1000 w/m^2 para obtener las horas solares pico. Finalmente se propone un sistema fotovoltaico de una potencia determinada y se calcula la energía que generará ese sistema a lo largo del día.

Palabras claves: Irradiancia, Irradiación, Hora Solar Pico, potencial energético, energía solar

ABSTRACT

The use of energy from renewable sources is currently one of the keys to the energy transition in Mexico and other countries. Photovoltaic energy is a technology that uses solar radiation to convert it into electrical energy. One of the most important parameters to consider in photovoltaic solar energy is the evaluation of the solar energy potential (SEP) in each area. For this, it is essential to know what the peak solar hours (PSH) are in the study region. In this work, a procedure was developed to obtain the SEP value. Periodic measurements of irradiance values were taken using an instrument to measure solar radiation. Starting from these data, solar irradiance was calculated, which can be interpreted as the area under the irradiance curve, and the result is divided by 1000 w/m^2 to obtain peak solar hours. Finally, a photovoltaic system of a certain power is proposed and the energy that this system will generate throughout the day is calculated.

1. INTRODUCCIÓN

Prácticamente a partir del año 2009, las energías renovables y la eficiencia energética forman parte de la tendencia a la transición energética en México, así como en otros países (García-Alcocer, 2018; York et al., 2019). Una de las alternativas más recurrentes para alcanzar este objetivo es la energía solar fotovoltaica, en la cual se aprovecha la radiación solar como fuente de energía renovable para ser transformada en energía eléctrica mediante la utilización de celdas solares (Gutiérrez, et al., 2018; Sánchez et al., 2017). En el año 2021 la energía solar fotovoltaica representaba el 3.65% de las energías renovables que se aprovechan a nivel mundial (EMBER, 2022). Teniendo tal relevancia en el desarrollo socioeconómico global, es necesario conocer sobre el origen, la forma y el efecto de la radiación solar para que su aprovechamiento sea más eficiente y su beneficio pueda extenderse a la mayor parte de la población.

El sol se puede considerar como una máquina de fusión nuclear, y en ese proceso se genera una gran cantidad de energía, la cual se libera en el espacio en forma de radiación electromagnética en todas las direcciones (Vega De Kuyper, J.C. y Ramírez Morales, S., 2014). El sol irradia una cantidad de energía de aproximadamente 3.845×10^{26} Watts. Por lo tanto, por cada segundo que transcurre, cuatro millones de toneladas de su masa se convierten en energía. (Smets et al., 2016). Del total de la energía solamente una billonésima parte de ésta llega a la tierra. Para poder estimar la energía que llega fuera de la atmosfera terrestre se utiliza la siguiente relación:

$$E_s = \frac{\text{Potencia de radiación solar } (P_s)}{\text{Área de esfera Sol - Tierra}}$$

Donde:

$$P_s = 3.845 \times 10^{26} \text{ watts}$$

$$\text{Distancia Sol - Tierra} = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$E_s = \frac{\text{Potencia de radiación solar } (P_s)}{4\pi r_{\text{sol-tierra}}^2}$$

$$E_s = \frac{3.845 \times 10^{26} \text{ watts}}{4\pi(1.496 \times 10^{11} \text{ m})^2} = 1367 \text{ w/m}^2$$

a este parámetro se le llama constante solar. La energía proveniente del sol tiene que atravesar la atmósfera, lo que hace que la radiación se atenúe al llegar a la superficie terrestre permitiendo que lleguen aproximadamente 1000 w/m^2 en referencia al nivel del mar, en un día sin nubes y cuando el sol se encuentra en el cenit. A este parámetro se le denomina Irradiancia G, y se define como la potencia o radiación incidente por unidad de superficie (Duffie et al., 2013). La irradiancia varía a lo largo del día dependiendo de las condiciones climáticas y la hora, entre otros factores. Cabe mencionar que los datos de irradiancia se deben medir al ángulo óptimo si es para módulos que van a tener estructura fija. Para determinar la inclinación óptima de una superficie fija se utiliza la siguiente fórmula basada en análisis estadísticos de radiación anual sobre superficies situadas a diferentes latitudes:

$$\beta_{opt} = 3.7 + (0.69) \cdot |\varphi|$$

Donde:

$$\beta_{opt}: \text{ángulo de inclinación óptimo (grados)}$$
$$|\varphi|: \text{latitud del lugar, sin signo (grados)}$$

Esta fórmula es válida para aplicaciones de utilización anual las cuales busquen la máxima captación de energía solar a lo largo del año (Castejón & Santamaría, 2010). Aunado a esto, la superficie a medir deberá estar orientada al sur si el lugar se encuentra en el hemisferio norte y hacia el norte si este último se encuentra en el hemisferio sur.

Para calcular la energía a lo largo del día sobre la superficie de la tierra es necesario calcular el área bajo la curva de irradiancia. A este dato se le conoce como **irradiación H** y no es nada más que la cantidad de energía solar recibida durante un periodo de tiempo. Se mide en Wh/m^2 (Castejón & Santamaría, 2010). El cálculo del área se realiza utilizando **la regla del trapecio de aplicación múltiple** la cual, es un método de integración numérica que calcula un valor aproximado de dicha área. La fórmula de para realizar este procedimiento queda expresada de la siguiente manera:

$$I = (b - a) \frac{f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n)}{2n}$$

En la fórmula se explica que se deberán calcular el área de n trapecios, los cuales al sumarlos nos darán el valor aproximado total de dicha área. Cabe señalar que mientras más pequeños sean los intervalos en el eje x el cálculo será mucho más exacto (P.Canale & C. Chapra, 2011).

Otra forma de poder obtener dicho cálculo es utilizando el software Excel aplicando las opciones de línea de tendencia y de ahí aproximar dicha línea a la función original. Una vez realizado esto se procede a obtener la función de la gráfica y después integrarla en el intervalo de un día con el fin de obtener el área correspondiente equivalente a la irradiación diaria como se muestra a continuación:

$$H = \int_t^T G dt$$

$$H = \text{Irradiación en } Wh/m^2$$

$$G = \text{Irradiancia en } W/m^2$$

Ambos métodos se presentan en este documento.

Una vez obtenido el dato de irradiación por cualquiera de los métodos mostrados con anterioridad, es necesario dividir el resultado obtenido entre $1000 w/m^2$ para obtener las Horas Solares Pico (HPS) las cuales nos van a servir para determinar el potencial energético de un sistema solar fotovoltaico o térmico en una zona determinada. Las horas solares pico se definen como el número de horas que el sol tendría que entregar $1000 w/m^2$ para igualar el comportamiento real, donde según Valencia (2019) la irradiancia varía en cada momento.

Energía solar fotovoltaica

En el año 1838 el efecto fotovoltaico fue descubierto por el francés Alexandre Edmond Becquerel cuando experimentaba con una pila electrolítica cuyos electrodos eran de platino. En dicho experimento comprobó que la corriente eléctrica se desplazaba a uno de los electrodos cuando este se exponía al sol (Sánchez et al., 2017). No fue hasta en el año de 1953 cuando dicho efecto se utilizó en una aplicación práctica. El ingeniero Gerald Pearson quien trabajaba en los laboratorios Bell mientras experimentaba con electrónica de semiconductores fabricó por accidente una celda fotovoltaica hecha de silicio. A partir de este descubrimiento otros dos de sus colaboradores de la misma empresa Daryl Chaplin y Calvin Fuller perfeccionaron este invento de tal forma que las nuevas celdas proporcionaban más energía y podrían disponer de aplicaciones más prácticas.

La base de la generación de energía fotovoltaica es la celda fotovoltaica. Según la NOM-001-SEDE 2012 en el artículo 690-2, una celda fotovoltaica se define como un dispositivo fotovoltaico básico que genera electricidad cuando está expuesta a la radiación solar. Sin embargo, para aplicaciones de generación de energía eléctrica se requieren los módulos solares. Un módulo solar es una unidad completa protegida ambientalmente, que consta de varias celdas solares, óptica y otros componentes, diseñados para generar energía de corriente continua cuando es expuesta a la luz del sol. (Comité Consultivo Nacional de Normalización de Instalaciones Eléctricas y por la Dirección General de Distribución y Abastecimiento de Energía Eléctrica, 2012)

Cálculo del potencial energético solar

Para poder calcular el potencial energético solar o energía fotovoltaica diaria de un sitio determinado se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Energía diaria} \frac{Wh}{\text{día}} = \text{Potencia del sistema} \times HSP$$

Donde:

Potencia del sistema: Corresponde a la potencia total de los módulos W
HSP: Hora solar pico h

2. METODOLOGÍA

El método 1 consiste en el cálculo del parámetro de irradiación utilizando la regla del trapecio de aplicación múltiple. En el método 2 se utilizó la opción de línea de tendencia en Excel para obtener la ecuación de la irradiancia y a partir realizar la integración en el intervalo de 1 día. Estos se describen a continuación:

Método 1

a) Materiales

Los materiales utilizados para la realización de este proyecto son los siguientes:

- 1.-Un sensor lector de luz Spectrum 3415FX; el cual tiene integrado un medidor de radiación solar.
- 2.-Un goniómetro o medidor de ángulos que puede ser digital (aplicación de celular).

3.-Una computadora con Microsoft Office (Excel) para graficar los datos.

b) Ubicación

Las mediciones para la evaluación de potencial energético se realizaron en una institución de educación superior ubicada la ciudad de Motul Yucatán, cuya ubicación se muestra a continuación:

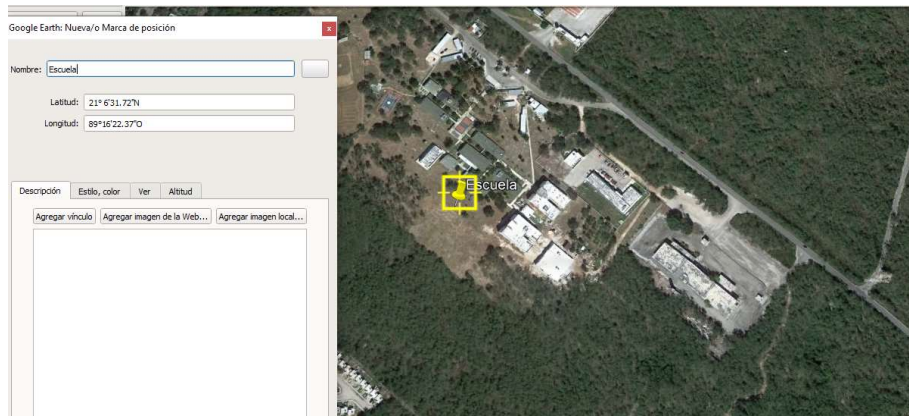


Figura 1. Ubicación del sitio de medición en Motul, Yucatán.

Como se puede observar dicho punto de medición corresponde a la **latitud 21° 6'31.72"N** y **longitud 89°16'22.37"O**.

c) Medición de irradiancia

Se procedió a realizar las mediciones de irradiancia calculando el ángulo óptimo donde se va a montar el sensor lector de luz Spectrum 3415FX. La latitud 21° 6'31.72"N equivale a 21.1088° decimales por lo que:

$$\beta_{opt} = 3.7 + (0.69) \cdot |21.1088|$$
$$\beta_{opt} = 18.26^\circ$$

β_{opt} es el ángulo al cual se toma la medición utilizando un goniómetro digital (aplicación para celular). La superficie quedará orientada hacia el sur ya que la latitud indica que la zona de estudio se encuentra ubicada en el hemisferio norte.



Figura 2. Orientación e inclinación de la superficie a medir

Para tener una buena aproximación, los datos de irradiancia se midieron cada hora empezando las lecturas desde las 6 am hasta las 6 pm (horas donde se tiene la disponibilidad de radiación solar).

d) Cálculo de irradiancia

Para poder calcular la cantidad de energía solar recibida en un día (irradiancia) se procedió a calcular el área bajo la curva de la gráfica de irradiancia utilizando la regla del trapecio de aplicación múltiple. Para esta labor se utilizó el software Excel para poder tabular los datos y realizar los cálculos de una manera más rápida.

e) Cálculo de las Horas Solares Pico (HSP)

Para calcular las Horas Solares Pico se utiliza la siguiente fórmula:

$$HSP = \frac{\text{Irradiancia } Wh/m^2}{1000 W/m^2}$$

f) Cálculo de la producción energética diaria

Una vez obtenidas las Horas Solares Pico, se procede a calcular la energía generada por el sistema de la siguiente forma:

$$\text{Energía diaria } \frac{Wh}{\text{día}} = \text{Potencia del } x \text{ HSP}$$

Método 2

a) Cálculo de irradiancia

A partir de la gráfica de irradiancia procedemos a obtener la ecuación que representa dicho parámetro mediante el uso de la función de línea de tendencia en el software Excel.

Una vez teniendo la ecuación, se procede a integrarla en un intervalo de un día.

b) Cálculo de las Horas Solares Pico (HSP)

Del mismo modo que el método 1 utilizamos la fórmula para hallar las horas solares pico.

c) Cálculo de la producción energética diaria

Una vez obtenidas las Horas Solares Pico, se procede a calcular la energía generada por el sistema utilizando la misma fórmula del método 1.

3. RESULTADOS.

Los datos obtenidos de irradiancia utilizando el sensor lector de luz Spectrum 3415FX son los siguientes:

Tabla 1. Tabulación de mediciones de irradiancia (W/m²).

Hora	Irradiancia W/m ²
06:00	3
07:00	64
08:00	243
09:00	325
10:00	649
11:00	740
12:00	950
13:00	1001
14:00	921
15:00	768
16:00	513
17:00	210
18:00	2

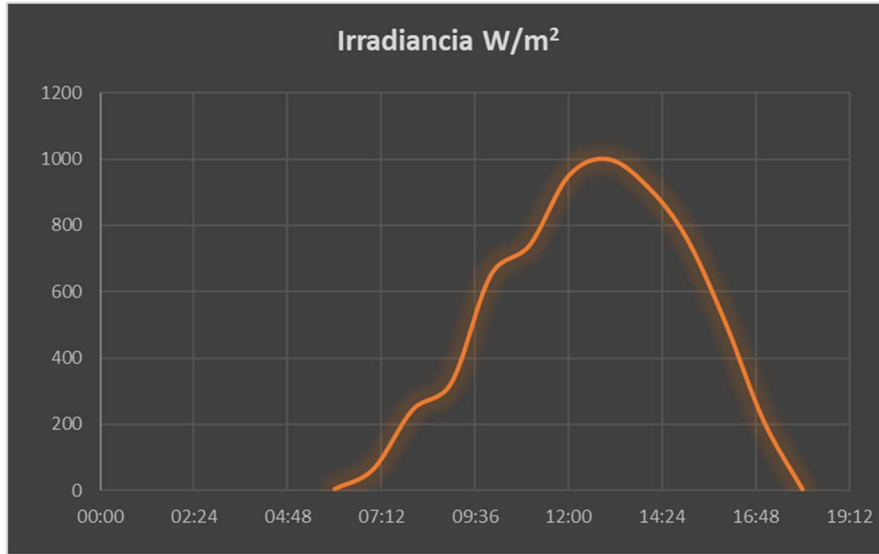


Figura 3. Grafica de los datos de irradiancia

Método 1

Obtenemos las áreas individuales utilizando la fórmula de la regla del trapecio múltiple (ver figura 4):

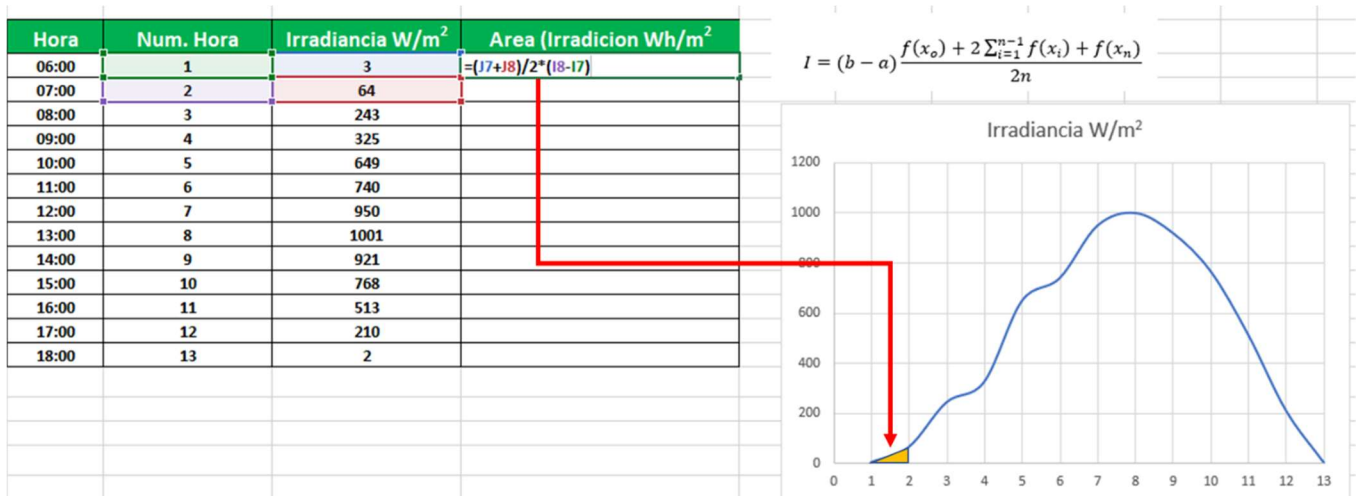


Figura 4. Cálculo de áreas individuales aplicando la regla del trapecio. (elaboración propia utilizando MS Excel)

En seguida sumamos todas las áreas individuales. El dato obtenido representa el área bajo la curva (irradiación). Dicho procedimiento se muestra en la siguiente figura:

Hora	Num. Hora	Irradiancia W/m ²	Area (Irradicion Wh/m ²)
06:00	1	3	33.5
07:00	2	64	153.5
08:00	3	243	284
09:00	4	325	487
10:00	5	649	694.5
11:00	6	740	845
12:00	7	950	975.5
13:00	8	1001	961
14:00	9	921	844.5
15:00	10	768	640.5
16:00	11	513	361.5
17:00	12	210	106
18:00	13	2	
		Σ ÁREA TOTAL	6386.50

Figura 5. Obtención de la irradiación calculando el área total bajo la curva (Elaboración propia utilizando MS Excel)

Calculamos las Horas Solares Pico (HSP):

$$HSP = \frac{6386.5Wh/m^2}{1000 W/m^2} = 6.38 h$$

Obtenemos la producción de energía diaria. Para este ejemplo se considerará un sistema fotovoltaico cuya salida de potencia es de 5 Kw. Por lo tanto, la producción energética de ese día será:

$$Energía\ diaria = 5\ kW \times 6.38h = 31.9\ kWh$$

Método 2

A partir de la gráfica de irradiancia procedemos a obtener la ecuación que representa dicho parámetro mediante el uso de línea de tendencia en el software Excel. Para ello es necesario ajustar la línea de tendencia seleccionando la opción de *polinómica* (ver figura 6):

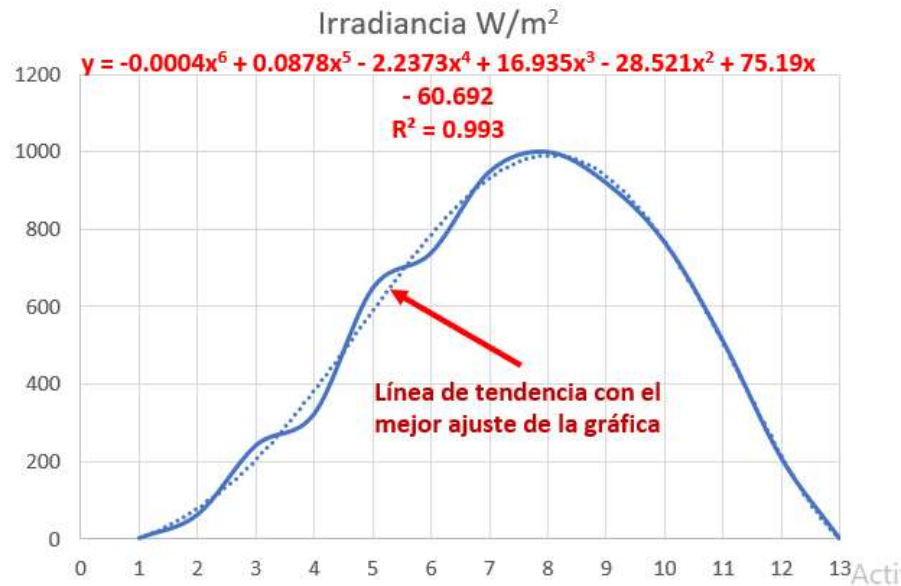


Figura 6. Obtención de la ecuación de la curva (elaboración propia utilizando MS Excel)

Donde $y = f(x) = \text{Irradiancia}$ y $x = t$ (Tiempo en horas)

Se puede observar que la gráfica tiene una $R^2=0.993$, lo que quiere decir que se tiene una buena aproximación de la línea de tendencia con respecto a la gráfica de irradiancia.

Para poder obtener el dato de irradiación se procede a integrar dicha ecuación quedando de la siguiente forma:

$$H = \int_t^T G dt$$

$$H = \int_1^{13} -0.0004 t^6 + 0.0878 t^5 - 2.2373 t^4 + 16.935 t^3 - 28.521 t^2 + 71.19 t - 60.692 dt$$

Al realizar la integración se deduce que la irradiación diaria es:

$$H = 6162.82 \text{ Wh/m}^2$$

Calculamos las Horas Solares Pico (HSP)

$$HSP = \frac{6162.82 \text{ Wh/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} = 6.16 \text{ h}$$

Considerando un sistema fotovoltaico cuya salida de potencia sea la misma que el método 1 es decir 5Kw. Por lo tanto, la generación energética diaria será:

$$\text{Energía diaria} = 5 \text{ kW} \times 6.16 \text{ h} = 30.8 \text{ kWh}$$

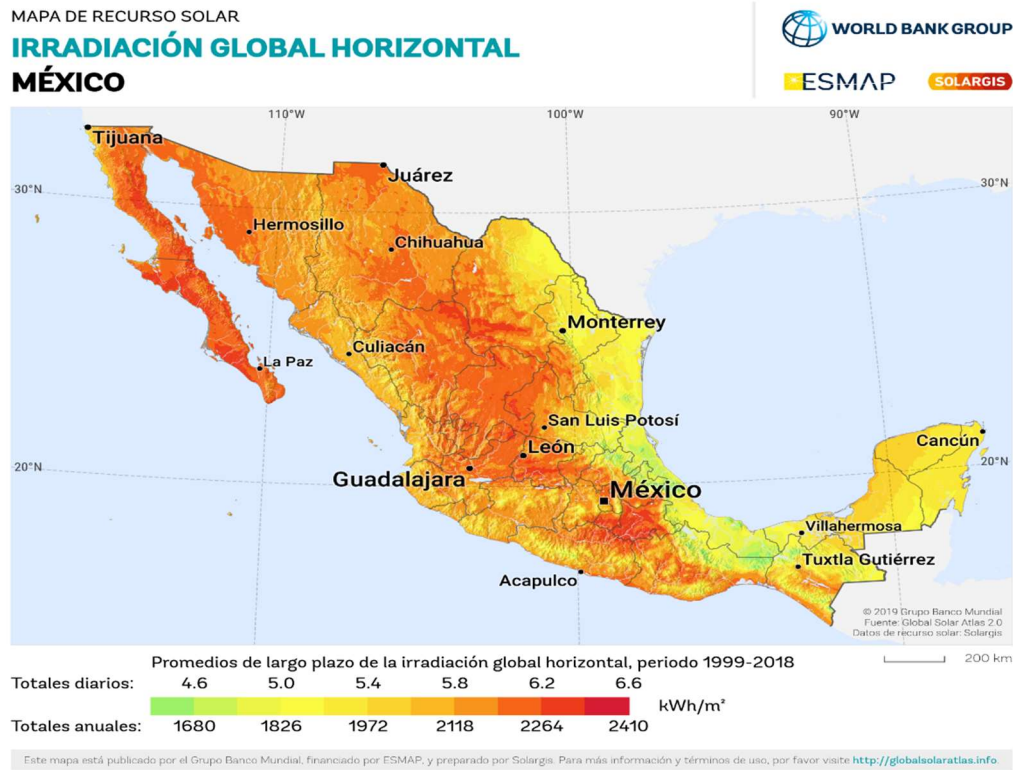


Figura 6. Distribución de la irradiación solar sobre un plano horizontal en México (Fuente: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>)

4. DISCUSIÓN

Los sistemas fotovoltaicos son equipos para la generación de energía eléctrica que para su óptimo funcionamiento dependen tanto del ángulo de inclinación de los paneles solares como de la captación de radiación solar, para lo cual la estimación de la irradiancia es crucial (Danandeh et al., 2018). En el caso de este trabajo la irradiancia estimada presentó un valor máximo de 1001 W/m² entre las 12 y las 13 horas de la tarde, y se observa que los datos al inicio y al final del día son mínimos de tal forma que se traducen en una curva tipo campana que es característica en este tipo de mediciones, tomando en cuenta que la única diferencia es el desplazamiento del punto máximo debido a las diferentes latitudes y condiciones climáticas que se desarrollan en cada sitio de experimentación (Rodríguez Aya et al., 2017).

Comparativamente, tanto el método I como el método II muestran variación poco significativa, por lo que la utilización de ambos métodos es confiable para la estimación del potencial energético solar de una determinada zona. Específicamente, la diferencia entre ambos métodos es que uno utiliza herramientas matemáticas como el cálculo integral y el otro se aplica aritmética simple para la obtención de los datos. La estimación de este parámetro puede obtenerse en cualquier mes del año que se a de interés, aplicando la misma metodología que se propone con cualquiera de los dos métodos.

5. CONCLUSIONES Y/O PROYECTOS FUTUROS.

Por lo general, la estimación del potencial energético solar se realiza empleando un data logger o utilizando métodos más complejos (Danandeh et al., 2018); sin embargo, a través de este trabajo se ha demostrado que también se puede estimar la irradiancia utilizando el método de la regla del trapecio, o bien, el método de línea de tendencia en el software Excel. Las metodologías mostradas en este documento tienen una aplicación práctica, sobre todo cuando no se cuenta con un equipo disponible, como los data logger. El presente trabajo puede ser de utilidad para quienes se dedican a desarrollar proyectos de energía solar fotovoltaica o al diseño de instrumentos de medición energética; o mejor aún, para realizar prácticas en instituciones educativas que no cuentan con la infraestructura necesaria.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castejón Oliva et al. (2010). Instalaciones Solares Fotovoltaicas. En Instalaciones Solares Fotovoltaicas (pág. 15). Madrid: Editex, S.A.
- CCEEA. <https://ccea.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/como-obtener-la-hora-solar-pico-en-mexico>
- Chapman, et al. The Top Ten Algorithms in Data Mining. U.S.A.: CRC Press.
- Canale, et al. (2011). Métodos Numéricos para Ingenieros. México: McGraw-Hill.
- Comité Consultivo Nacional de Normalización de Instalaciones Eléctricas y por la Dirección General de Distribución y Abastecimiento de Energía Eléctrica, 2012
- Danandeh, MA., Mousavi, S.M., (2018). “Solar irradiance estimation models and optimum tilt angle approaches: A comparative study”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 92, pp. 319–330
- Duffie, J.A. y Beckman, W.A. (2013). Solar Engineering for Solar Process. John Wiley & Sons
- EMBER. (2022). EMBER. Obtenido de <https://ember-climate.org/data/data-explorer/>
- García Alcocer, GI., (2018). La transición energética hacia las tecnologías limpias: un motor para el desarrollo de México. En Anglés Hernández, M. y Palomino Guerrero, M. Aportes sobre la configuración del derecho energético en México, (pp 101-118). UNAM
- Gutiérrez Villegas, JA., Quiroz Martínez, R., Torres Nuñez, RA., Mejía Pérez, GA., (2018). Evolución de la normatividad y su impacto en el aumento de los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) instalados en México. Revista de Operaciones Tecnológicas. Vol.2 No.7, pp. 1-6
- Rodríguez Aya, AA., Figueredo Luna, JA., Chica García JA., (2018). Análisis del potencial energético solar basado en mediciones in situ en el municipio de Acacias-Meta. in 6th Engineering, Science and Technology Conference, KnE Engineering, pp 690–700.
- Sánchez Juárez, A., Escobar Martínez, D., Santos Magdaleno, R., Sánchez Pérez, PA., (2017) Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar. Instituto de Energías Renovables (UNAM)
- Smets, et al., Solar Energy, (2019). Cambridge: UIT Cambridge Ltd
- Vega De Kuyper, J.C. y Ramirez Morales, S. (2014). Fuentes de Energía Renovables y No Renovables. Aplicaciones. Grupo Editor Alfaomega

York, R., Bell, SE., (2019). Energy transitions or additions? Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy. *Energy Research & Social Science*, vol 51, pp 40–43