

**ENERGIA SOLAR DISPONIBLE EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

**Valdés-Barrón M.G.\*, Bonifaz-Alfonzo R.\*, González-Cabrera A.E.\*, Estévez-Pérez H.R.\*,  
Rodríguez-Rasilla I.\*, Retama-Hernández A., Riveros-Rosas D.\***

\* Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad No. 3000, Ciudad de México, C.P. 04510, México. [mauro@geofisica.unam.mx](mailto:mauro@geofisica.unam.mx)

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.6107>

**RESUMEN**

En el año 2014, con recursos del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (PINVII-7), se instalaron 10 piranómetros en las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Estos instrumentos se encuentran conectados al sistema de adquisición de datos de la RAMA por lo que existe una medición cada minuto. Los instrumentos fueron calibrados por el Servicio Solarimétrico Mexicano y referenciados a la Escala Radiométrica Mundial, garantizando que la calibración de las mediciones. Con la información solarimétrica de esta red, durante sus primeros cuatro años, se elaboraron mapas de Irradiación Solar Global en superficie, así como la Base de Datos correspondiente. Toda la información y los mapas, se encuentra disponible en la página de Internet del Servicio Solarimétrico Mexicano y puede ser consultada libremente (<http://areas.geofisica.unam.mx/solarimetrico/>). Este proyecto no tiene fecha para concluir, por lo que cada año se incrementará la base de datos y los mapas se volverán a elaborar anualmente para aumentar su certidumbre.

**PALABRAS CLAVE:** Irradiación solar global, climatología solar, Recurso Solar, Energía Disponible.

**ABSTRACT**

In 2014, with funds of the Institute of Science and Technology of Mexico City (PINVII-7), 10 pyranometers were installed in stations from the Automatic Network of Atmospheric Monitoring (RAMA), of the Secretariat of the Environment of México City. These instruments are connected to the data acquisition system of the RAMA, sampled every minute. The instruments were calibrated by the Mexican Solarimetric Service and referenced to the Global Radiometric Scale, so the information generated is considered reliable. With the first four years information of this network, Global Solar Irradiation maps were prepared on the surface, as well as the corresponding Data Base. All information and maps are available on the website of the Solarimetric Mexican Service <http://areas.geofisica.unam.mx/solarimetrico/> and can be consulted freely. This project does not have an ending date, so the database will be increased each year and the maps will be re-prepared annually to increase their certainty.

**KEYWORDS:** Global Solar Irradiation, Solar Climatology, Solar Resource, Available Energy.

## INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de cualquier recurso natural implica como un primer paso la evaluación del mismo. Cuantificar su disponibilidad a lo largo del tiempo, y en el caso específico de la radiación solar, es necesario estudiar su distribución temporal, y espacial. La diversidad y desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar, demandan además que la información tenga la precisión suficiente para el diseño de dispositivos y plantas de aprovechamiento.

La evaluación del recurso solar no es una tarea sencilla, se debe de planificar el número de sensores y los sitios para instalarlos (González-Cabrera et al, 2018; Valdés-Barrón et al, 2014; Riveros-Rosas et al, 2014). Lo anterior requiere evaluar la infraestructura disponible y la requerida; elegir los sensores con las características requeridas para el muestreo de acuerdo con estándares internacionales y finalmente la elección de la plataforma más conveniente para almacenar y mostrar la información obtenida en mapas de irradiación solar en superficie.

A través del Convenio Específico de Colaboración “Evaluación de la energía solar disponible en el Distrito Federal” (PINV11-7), en 2014 dió inicio la instalación de 10 piranómetros en igual número de estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), de la Secretaria del Medio Ambiente (SMA) del entonces Gobierno del Distrito Federal (GDF).

Con 5 años de información de Irradiación Solar Global Horizontal, es posible construir mapas del recurso solar en superficie para la Ciudad de México (CDMX), como un primer producto que coadyuve al aprovechamiento de la energía solar y al mismo tiempo contribuir al combate de la contaminación ambiental y el cambio climático entre otras acciones. La información solarimétrica generada permite además elaborar las gráficas de energía disponible que permiten determinar, mes a mes, la energía de la que dispone un dispositivo de aprovechamiento que requiere un nivel de irradiancia superior (global o directa) a un cierto umbral de funcionamiento. En este trabajo se presentan gráficos de energía disponible obtenidos de los datos de radiación solar de la estación solarimétrica de ciudad universitaria, en la ciudad de México (Bourgues, 1992; Mhulia, 2009).

## METODOLOGIA

Se colocaron 10 piranómetros Hukseflux modelo SP20 en igual número de estaciones de la RAMA de la SMA de la CDMX, cumpliendo con las características de instalación recomendadas por la organización meteorológica mundial (OMM) (Organización Meteorológica Mundial, 2017; Sengupta et al, 2015). Cada radiómetro fue conectado a un amplificador de señal, marca Kipp & Zonen modelo AMPBOX, diseñado expresamente para el uso en los piranómetros de tipo termo-eléctrico (Tabla No. 1). Un undécimo sensor se colocó en el Observatorio de Radiación Solar (ORS), del Instituto de Geofísica (IGF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al lado de un piranómetro marca Kipp & Zonen modelo CMP21, éste último utilizado desde el año 2012 en el ORS, lo anterior con la finalidad de conocer el comportamiento de los piranómetros acoplados a los amplificadores. Un último piranómetro Hukseflux con su amplificador de señal, está a resguardo para ser el instrumento de referencia de esta red. En la figura 1 se muestran los sitios donde fueron instalados los piranómetros, es importante observar que el área de trabajo puede considerarse para este estudio como una planicie limitada por zonas montañosas (cuenca).

Tabla 1. Instrumentos y localización.

Pir. No.	No. de serie	Estación
1	2159	Acolman
2	2164	Ajusco
3	2168	Lab. A.A.
4	2173	Chalco
5	2183	Montecillos
6	2184	Cuautitlan
7	2190	Santa Fé
8	2192	Tlalnepantla
9	2194	UAM Izt.
10	2195	Xalostoc
11	2196	UNAM
12	2197	Referencia

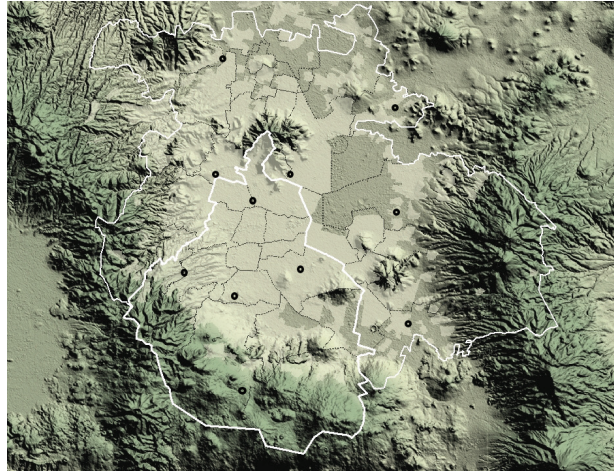


Fig. 1 Mapa de la distribución de estaciones.

A partir de los registros de la irradiancia medida cada minuto, se procedió a la obtención de la irradiación diaria promedio mensual, de cada una de las estaciones para cada mes del año. Con esta información se formaron 12 matrices (mensuales), que se procesaron en un Sistema de Información Geográfica (ArcGis), donde se aplicó una interpolación utilizando el método Kriging (Distancia Inversa Ponderada). La principal razón para utilizar este método fue el bajo número de puntos de medición en superficie, dada la extensión del área de estudio que el área de estudio es relativamente pequeña y sobre todo debido al fenómeno estudiado, considerar el área sin variaciones importantes de altitud (figura 1).

#### Energía solar disponible.

A través de curvas de frecuencia acumulada (CFA), de la irradiancia solar global de los datos medidos (2014-2019), podemos obtener la energía solar disponible. Las CFA representan la frecuencia, en términos del número de horas promedio, con la que la irradiancia global incidente es mayor o igual a cierto nivel crítico ( $I_c$ ).

Primero se crean los intervalos de confianza que corresponden a los diferentes niveles críticos o umbrales de irradiancia global que sean convenientes para el usuario. En el análisis realizado a los datos del ORS, los intervalos de confianza o niveles críticos se establecieron en  $25 \text{ W/m}^2$  y el rango total del gráfico fue de  $0$  a  $1400 \text{ W/m}^2$ . Como siguiente paso, se procede a contar el número de veces que la irradiancia, minuto a minuto, se ubicó dentro de los intervalos de los niveles críticos.

Con los resultados de estos cálculos, se construyen las CFA, para cada mes del año del sitio de observación. La irradiancia ( $\text{W/m}^2$ ) se subdivide en tantos intervalos como niveles críticos se requieran y se realiza un conteo del tiempo en que la irradiancia se ubicó dentro del intervalo del nivel crítico a lo largo del día durante periodos de 1 minuto desde que sale el Sol hasta que se oculta.

Para cada nivel crítico de irradiancia ( $I_c$ ) se obtiene el tiempo en horas por día  $Nh(I)$ . A partir de esta función la energía disponible por arriba del nivel crítico se obtiene con la Ec. (1):

$$E_{disponible}(I_c) = \int_{I_c}^{I_{max}} Nh(I) dI \quad (1)$$

#### Número de Horas-pico

Adicionalmente se obtuvieron los gráficos de horas pico de las estaciones. La cantidad de irradiación solar recibida en una unidad de área unitaria durante una hora a razón de  $1000 \text{ W/m}^2$ , se ha convenido llamarla hora-pico, la cual podemos entender como  $1 \text{ hora-pico} = 1000 \text{ Wh/m}^2$ . La equivalencia con el SI  $1 \text{ hora-pico}$  es de  $3.6 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ . El número de horas-pico, representa las horas que el captador aparentemente recibe el valor pico de la irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Datos

Los instrumentos fueron colocados en plataformas sobre las casetas de medición de la RAMA (figura No. 2), cumpliendo con las características recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Dentro de las casetas se instalaron los amplificadores de señal para que los sistemas de adquisición pudieran medir variaciones de décimas de  $W/m^2$ ; en cuanto al mantenimiento, el personal de la RAMA incluyó dentro de las tareas a realizar la limpieza de los domos de los piranómetros, también el ORS como Centro Regional de Medición de la Radiación Solar de OMM, llevó a cabo la calibración de los piranómetros, referenciándolos a la Escala Radiométrica Mundial (Finsterle W, 2015). Las gráficas de energía disponible y de horas pico para el ORS fueron obtenidas a partir de un periodo de datos mayor a 10 años (1993-2005) tanto para radiación global como para radiación directa.



Fig. 2 Estación Tlalnepantla, Edo. de México.

RESULTADOS

Se elaboraron los mapas mensuales de irradiación solar promedio diaria mensual, aquí se presentan dos meses ejemplo, Enero y Septiembre (Figura 3). En la figura, llama la atención la homogeneidad de la irradiación recibida en toda la Cuenca de México (también conocida como valle de México) Pues a pesar de ser una región rodeada por montañas, la gran extensión que cubre es prácticamente plana y de clima homogéneo, por lo que no hay variaciones significativas en los niveles de irradiancia.

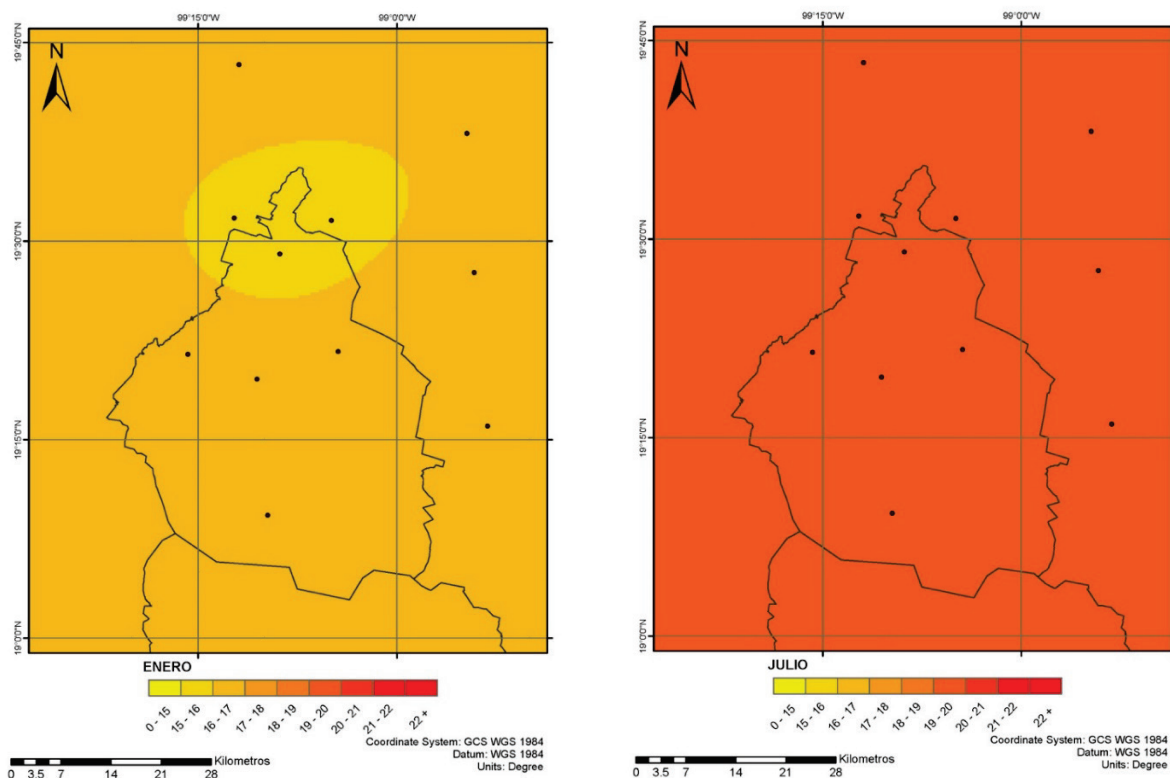


Fig. 3 Irradiación diaria promedio mensual, (izq) Enero, (der) Septiembre

Los 12 mapas se podrán consultar en la página del Servicio Solarimétrico Mexicano (<http://rayenari.igeofcu.unam.mx/mexico/datsolar.html>)

También en esta dirección de internet, se podrá consultar la base de datos de las 11 estaciones (incluida la estación UNAM), con una resolución temporal de hasta 1 minuto.

Los gráficos de horas pico se obtuvieron en promedio para los doce meses del año de los datos disponibles en la base de datos de la RAMA hasta el año 2018. En la figura 4 se presentan los valores de horas pico para la estación del ORS.

Los gráficos de energía disponible están disponibles para la estación del ORS en Ciudad Universitaria, Ciudad de México (figura 5). La metodología se aplicará para el resto de las estaciones, sin embargo, dados los resultados mostrados en la figura 3, no se esperan diferencias significativas a las mostradas en la figura 5.

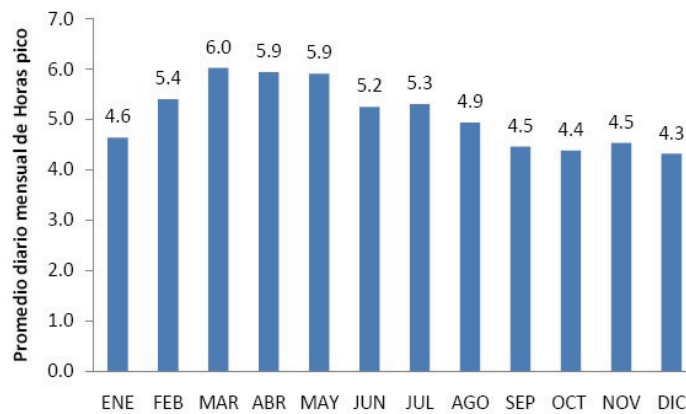


Fig. 4 Horas Pico para la estación Ciudad Universitaria

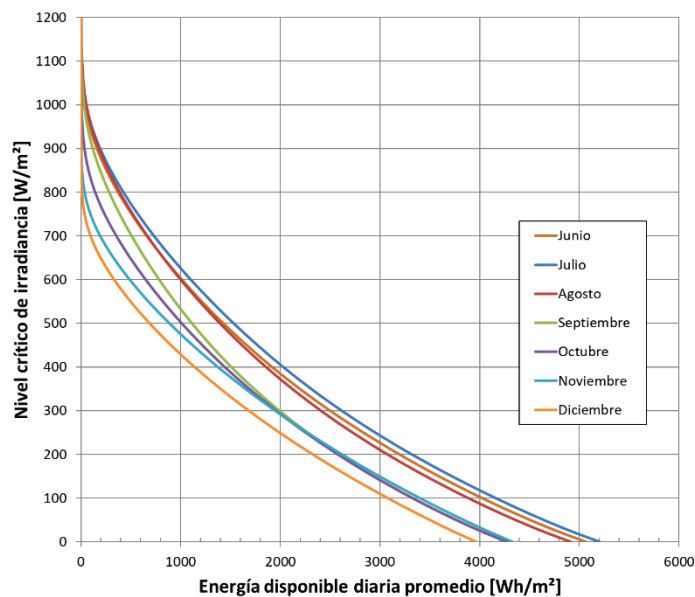


Fig. 5 Energía Solar Disponible para la estación Ciudad Universitaria

## CONCLUSIONES

El contar con una red de piranómetros termo-eléctricos, clasificados de acuerdo a la ISO 9060:2018 como instrumentos de Clase A, con un mantenimiento aunque mínimo (no se realiza diario), lo suficientemente frecuente para confiar en las observaciones, un programa de calibración y cumpliendo con los requerimientos que marcan los organismos internacionales para la instalación de los sensores de radiación solar, se logró crear una base de datos lo suficientemente confiable para poder generar productos de uso inmediato para el aprovechamiento de la energía solar a través de sistemas fotovoltaicos y de calentamiento.

También con esta información es posible elaborar políticas gubernamentales para el aprovechamiento de la energía solar, más acordes a la realidad, aumentando considerablemente la probabilidad de éxito de las mismas, y al mismo tiempo poder hacer frente a otros graves problemas como son la contaminación ambiental, el cambio climático, etc..

## REFERENCIAS

1. Bourges, B., "Climatic Data Handbook for Europe", Climatic Data for the Design of Solar Energy Systems, Kluwer Academic Publishers, 1992
2. Duffie John, A. Beckman William, "Solar Engineering of Thermal processes", 4 edition, John Wiley & Sons, (2006).
3. Finsterle W. WMO IOM Report No. 124, "WMO International Pyrheliometer Comparison IPC-XII", PMOD/WRC, Davos, June 2016
4. Gonzalez-Cabrera A.E., Riveros-Rosas D., Valdes-Barrón M.G., Bonifaz-Alfonzo R., Velasco-Herrera V.M., Estevez-Perez H.R. and Carabali G., "New Reference Solarimetric Network for Mexico"; SolarPACES 2017, Santiago de Chile 26 al 29 de septiembre, 2017. AIP Proceedings 2033,190007, 2018.
5. Muhlia Velázquez A., "Sobre la estimación estadística de la energía de radiación solar disponible", Revista de Energías Renovables, ANES, Vol. 1, No. 1, Año 1, Pag. 8 – 10, Marzo 2009.
6. Organización Meteorológica Mundial, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. OMM No. 8, 2017
7. Riveros-Rosas D, Bonifaz R., Valdes M., Rivas R. "Análisis por Región de Información Solarimétrica en la República Mexicana" XI congreso Iberoamericano de energía solar y XXXVIII Semana Nacional de Energía Solar, Querétaro, Querétaro, México, octubre, 2014
8. Manajit Sengupta, Aron Habte, Sarah Kurtz, Aron Dobos, Stefan Wilbert, Elke Lorenz, Tom Stoffel, Dave Renné, Christian A. Gueymard, Daryl Myers, Steve Wilcox, Philippe Blanc, Richard Perez. "Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications". [Research Report] Technical Report NREL/TP-5D00-63112, National Renewable Energy Laboratory. 2015, 236 p. fahal-01184753f
9. Valdés-Barrón M., Riveros-Rosas D., Arancibia-Bulnes C.A., Bonifaz R., "The Solar Resource Assessment in Mexico: State of Art", Energy Procedia 57, pp. 1299-1308, 2014.