

Evaluación de bases de datos de irradiancia e irradiación solar mediante sensores remotos y reanálisis, con aproximación de cobertura nubosa en México

Evaluation of solar irradiance and irradiation databases through remote sensors and reanalysis, with cloud cover approximation in Mexico

Katia Fernández-González*, Carlos Manuel Welsh-Rodríguez** y Gabriela Díaz-Félix***

Recibido: 18/10/2024. Aceptado: 17/02/2025. Publicado: 01/04/2025.

Resumen. Existen diferentes bases de datos que ensamblan datos satelitales y reanálisis para estimar valores solarimétricos en zonas con ausencia de instrumentos de medición, no obstante, actualmente estos mantienen un margen de error desconocido para el caso de México. En vista de ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar las bases públicas de irradiancia e irradiancia con disponibilidad geográfica-temporal para el país. Dicha información fue completada con el factor de nubosidad estimado, igualmente, por teledetección. La evaluación se realizó comparando datos terrestres (estaciones solarimétricas, meteorológicas y mareográficas) con datos estimados en un intervalo mensual mediante métricas estadísticas para el periodo 2014-2023. Como resultado, se reunieron 15 bases de estimaciones mundiales como The National Solar Radiation Database (NSRDB), Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER), base de reanálisis de quinta generación del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA5), Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), por mencionar algunas. Cada una siendo funcional, errando hasta 25 % para el caso de México, empero, los mejores resultados de estimación solarimétrica fueron con POWER y CERES_EBAF con subestimación, entre 0.8 % a 16 % de error absoluto y correlaciones fuertes (0.66 a 0.99). Para el factor de nubosidad,

cada una de las bases consultadas es factible dependiendo de la resolución temporal y espacial requerida. Finalmente, se determina que el porcentaje de cobertura nubosa presente afecta directamente la capacidad de estimación de las bases de datos solarimétricos.

Palabras clave: solarimetría, teledetección, datos observacionales, radiación de onda corta, nubosidad.

Abstract. There are various databases that compile satellite data and reanalysis to estimate solarimetric values in areas lacking measurement instruments. However, these currently maintain an unknown margin of error for Mexico. Regarding to that, the work objective was to evaluate public radiation and irradiance databases with geographic-temporal availability for the country. This information was complemented with the cloud cover factor, also estimated via remote sensing. The evaluation was carried out by comparing terrestrial data (solarimetric, meteorological, and tide-gauge stations) with estimated data on a monthly interval using statistical metrics for the period 2014–2023. As a result, 15 global estimation databases were compiled, such as The National Solar Radiation Database (NSRDB), Prediction of

* Universidad Veracruzana. Centro de Ciencias de la Tierra. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán, s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa, México. <https://orcid.org/0009-0004-2619-3143>. Email: katia.fergon@outlook.es

** Universidad Veracruzana. Centro de Ciencias de la Tierra. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán, s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa, México. <https://orcid.org/0000-0001-8062-1445>. Email: cwelsh@uv.mx Autor de correspondencia.

*** Universidad Veracruzana. Facultad de Instrumentación Electrónica Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán, S/N, Zona Universitaria, 91090, Xalapa, México. <https://orcid.org/0000-0002-9422-5862> EMAIL: gabdiaz@uv.mx

Worldwide Energy Resources (POWER), the fifth-generation reanalysis database of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA5), and Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), among others. Each proved functional, with errors up to 25 % for Mexico; however, the best solarimetric estimation results were obtained with POWER and CERES_EBAF, showing underestimations of 0.8 % to 16 % absolute error and strong correlations (0.66 to

0.99). For the cloud cover factor, each database consulted is feasible depending on the required temporal and spatial resolution. Finally, it is determined that the percentage of cloud cover directly affects the estimation capacity of the solarimetric databases.

Keywords: solarimetry, remote sensing, observational data, shortwave radiation, cloudiness.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la energía solar ha ido evolucionando conforme los años. No obstante, hace poco más de 50 años comenzó el interés por la radiación solar en México (Hernández *et al.*, 1991). El término radiación solar es comúnmente utilizado para referirse a la energía proveniente del sol en forma de radiación electromagnética, sin embargo, existen otras definiciones que componen la nomenclatura de la energía solar. En otras palabras, el concepto de radiación solar es empleado erróneamente para referirse a términos como irradiación e irradiancia. Por un lado, irradiación es la energía que, en forma de radiación, se integra durante un intervalo de tiempo en una superficie, generalmente sus unidades son , mientras que, irradiancia se define como la cantidad de energía medida instantáneamente en un punto específico y es medida en (Tejeda-Martínez y Gómez-Azpeitia, 2015). El valor de estos parámetros es determinado por instrumentos en superficie como heliógrafos, pirheliómetros, piranómetros, entre otros. Dichas mediciones diarias son realizadas por instituciones nacionales, entre las principales se encuentran el Servicio Solarimétrico Nacional (SSN), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) y la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA). Sin embargo, Estrada-Cajigal (2008) describe que en un principio dichos equipos eran escasos en el país, por lo que, se optó por calcular los valores de irradiación partiendo de modelos empíricos. Estos requerían de entrada variables meteorológicas básicas que se obtenían fácilmente, tales como humedad relativa, temperatura e irradiación extraterrestre (Díaz-Félix, 2012). No obstante, con el tiempo se hicieron ortodoxos y fueron sustituidos por programas com-

putacionales que desarrollaron la adquisición de datos por sistemas de percepción remota (Tejeda-Martínez y Gómez-Azpeitia, 2015).

Las primeras aproximaciones superficiales desarrolladas para México fueron mapas de isohelias por interpolación a mano libre (Hernández *et al.*, 1991), donde se ilustra la distribución espacial desigual de la irradiación, es decir, que existen zonas con mayor incidencia de energía solar que otras (Estrada-Cajigal, 2008). Estas variaciones son causadas por factores geográficos, como la orografía, latitud, altitud y paisaje, a su vez atmosféricos, como la presencia de nubes, aerosoles, entre otros (Hernández *et al.*, 1991).

El factor de nubosidad se ha relacionado ampliamente con la dispersión e incidencia de la irradiación global (Calbó *et al.*, 2016). Por lo que, a partir de las propiedades y comportamiento de las nubes presentes, surgió la idea de implementar satélites meteorológicos geoestacionarios para estimar los valores de la energía solar (Estrada-Cajigal, 2008). En México las observaciones superficiales de nubosidad se realizan mediante el conteo de días despejados, medio nublados o nublados cerrados en los observatorios atmosféricos (Tejeda-Martínez y Gómez-Azpeitia, 2015). Dichos datos de cobertura nubosa en el cielo son necesarios para perfeccionar los métodos de estimación, empero, con el tiempo se han dejado de registrar continuamente. Además, Díaz-Félix (2012) menciona que estas observaciones son factibles sólo si se toman máximo a 100 km de distancia de los puntos de medición de irradiancia.

Con la recopilación de ambos datos meteorológicos se elaboran numerosos productos (mapas de distribución, gráficos de energía disponible, entre otros) que se han integrado a investigaciones y recopilaciones como el Atlas Solar de la República Mexicana (1991) y el Prontuario Solar (2015). Donde más allá de temas de relevancia científica e

histórica se describen softwares y bases de datos de irradiación solar, determinando que el comportamiento solar en superficie está constantemente ligado a medir sus componentes, ya que su incidencia no es la misma a lo largo del país (Tejeda-Martínez y Gómez-Azpeitia, 2015). Pese a esto, en el país resultan insuficientes los puntos de observación con utilidad en el desarrollo de proyectos científicos, energéticos, entre otros. La interpretación de los valores por satélites meteorológicos geoestacionarios continuó siendo una herramienta significativa para sustituir las mediciones *in situ*, ya que algunas organizaciones de monitoreo atmosférico se encargaron de crear plataformas web para visualizar y descargar los registros de cada satélite a nivel de la superficie. Sumado a ello, existen empresas y organismos que cuentan con información privada del recurso solar mexicano para fines comerciales que limitan ampliamente la utilización de datos de calidad.

Ante esta situación, actualmente las bases de datos por reanálisis son el método más empleado gracias a su accesibilidad y descarga gratuita. Los diferentes tipos de reanálisis integran principalmente observaciones de sitios de todo el mundo, en un conjunto de datos completo y consistente, mediante la asimilación simultáneamente restringida por leyes físicas a partir de modelos numéricos de predicción del tiempo (Habte *et al.*, 2017). Entre los principales reanálisis se encuentran ERA5, The National Centers for Environmental Prediction con the National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications Version 2 (MERRA 2) y Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER). En conclusión, existen tres diferentes métodos para la generación de datos solarimétricos en México. Estos son la disposición de una red de instrumentos en superficie, información de satélites geoestacionarios meteorológicos y productos de modelos de estimación por reanálisis. Se encuentran dos problemas primordiales al ejecutar los conjuntos generados por sensores remotos y reanálisis: en el primero se mantiene un margen de error y calidad desconocido, en el segundo destaca su falta de disponibilidad temporal-geográfica del país.

Considerando al sol como la mayor fuente inagotable de energía, la implementación de estos

datos está lejos de acabar (Petrarca, 2021). Es necesario realizar un estudio para conocer las bases públicas más competentes de estimaciones solares y de nubosidad para el caso de México, puesto que, actualmente no existen trabajos de investigación que generen dicha información.

Según lo expuesto, el objetivo de este estudio es evaluar las bases de datos disponibles de irradiación e irradiancia. De manera que se determinará el error de estimación y adaptabilidad de cada una para seleccionar aquellas que alcancen los mejores resultados replicando el comportamiento de cada parámetro solar. Para el caso de la nubosidad, se complementará la información solarimétrica con las estimaciones satelitales del área total de nubes en los puntos de evaluación. Mostrando como el comportamiento espaciotemporal de la energía solar en superficie es influenciado por la presencia o ausencia de nubosidad.

El presente trabajo pretende apoyar con nuevas técnicas de adquisición de bases de datos solarimétricos, para su posterior aplicación climatológica, agrícola, energética, entre otras según el usuario en cuestión.

METODOLOGÍA

Recopilación de las bases de datos

Por razones de vigencia y continuidad en los conjuntos encontrados, se establecieron las siguientes cinco características específicas para verificar la confiabilidad de la fuente y la calidad de los datos salientes:

1. Pertenecer a una organización gubernamental, académica o de investigación
2. Ser totalmente gratuita y de uso público
3. Disponibilidad geográfica de México
4. Vigente
5. Contener un periodo de datos mínimo de 20 años.

Manejo de datos solarimétricos y nubosidad

Las mediciones horarias de irradiancia fueron promediadas para posteriormente obtener los resultados mensuales, en otras palabras, se toma-

ron en cuenta todos los valores por hora, diurnos y nocturnos, para cada mes dentro del periodo determinado más adelante. Las unidades establecidas para la irradiancia e irradiación fueron y respectivamente, según el Sistema Internacional de Unidades. Por lo que, para el caso de la irradiancia se ocupó la ecuación 1 de conversión:

$$\frac{W}{m^2} \text{ a } \frac{MJ}{m^2} = \frac{\text{Segundos al día}}{1000000}$$

Ecuación 1

$$\frac{W}{m^2} = 0.0864 \frac{MJ}{m^2}$$

El valor estándar utilizado para determinar la cantidad anual de irradiación fue determinado con los promedios mensuales anteriores, se calculó la irradiación promedio anual mediante la ecuación 2:

$$\frac{MJ}{m^2} \text{ a } \frac{kWatt-hora}{m^2 \text{ día}} = \frac{\text{Segundos en una hora}}{1000}$$

Ecuación 2

$$\frac{MJ}{m^2} = 3.6 \frac{kWatt-hora}{m^2 \text{ día}}$$

Para el caso de la nubosidad, el parámetro ocupado fue fracción total de nubosidad, conocida con otros términos como “cantidad de nubes” o “cobertura nubosa”, ya que, de acuerdo con Enríquez-Alonso (2016) es la propiedad que describe esta condición en general. La fracción total de nubosidad se expresa en porcentaje (%) de 0 a 100, para este caso se integran los valores en un promedio mensual. En la Tabla I se estableció el porcentaje equivalente al número de octas para los términos “despejado”, “parcialmente nublado”, “nublado” y “completamente nublado”

Tabla I. Clasificación del porcentaje de fracción de nubosidad.

Porcentaje	Categoría
0-30%	Despejado
31%-60%	Parcialmente nublado
61%-90%	Nublado
91%-100%	Completamente nublado

Fuente: elaboración propia (transformación de número de octas a porcentaje) a partir de datos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), <http://worldweather.wmo.int/oktas.htm>.

según la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Fuentes de datos en superficie

Se efectuó una búsqueda exhaustiva en los sitios web oficiales de las instituciones nacionales que realizan mediciones horarias de irradiancia y que cumplen con el PROY-NMX-AA-166. Cabe recalcar, que mientras se realizó esta evaluación la página oficial del SMN sufrió una intromisión en su servidor, debido a esto, se inhabilitó la proporción de cualquier tipo de datos provenientes de la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA).

Finalmente se trabajó con las bases de datos en superficie de las siguientes dependencias:

1. Servicio Solarimétrico Mexicano (SSM)
2. La Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA)
3. La Red mareográfica de CICESE
4. El Servicio Académico de Monitoreo Meteorológico y Oceanográfico (SAMMO).

Métricos estadísticos de comparación

Con la finalidad de realizar la evaluación entre las series de datos y valores estimados, se implementaron los siguientes cuatro métodos estadísticos donde Mo representa el valor estimado, Me el valor real y n el número total de datos.

1) La raíz del error cuadrático medio (RMSD)

El RMSD es la raíz cuadrada de la diferencia de los valores estimados y los valores medidos in situ (ecuación 3). Especialmente, se utiliza para evaluar la precisión de modelos de estimación. De igual modo, se caracteriza por ser una medida sensible a cualquier valor extremo. Es decir, cada cambio instantáneo se muestra de manera explícita en las series de tiempo evaluadas (Porrini, 2017).

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Mo - Me]^2}$$

Ecuación 3

2) Error de sesgo medio (MBE)

El MBE captura las desviaciones promedio entre dos conjuntos de datos (ecuación 4). Los valores

cercanos a 0 son los mejores, los valores negativos indican subestimación y los valores positivos indican sobreestimación (Turkish State Meteorological Service, s.f.).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Mo - Me] \quad \text{Ecuación 4}$$

3) Coeficiente de correlación de Pearson (r)

El Coeficiente de Correlación de Pearson (r) mide la covariación entre al menos dos variables (ecuación 5). Dicho de otro modo, si los valores de una característica cambian consistentemente conforme a los de la otra. De manera que, el coeficiente de correlación se empleó para cuantificar la covarianza entre los valores de las observaciones in situ y los valores estimados (Hernández-Lalinde *et al.*, 2018).

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(Mo - \overline{Mo})(Me - \overline{Me})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Mo - \overline{Mo})^2 \sum_{i=1}^n (Me - \overline{Me})^2}} \quad \text{Ecuación. 5}$$

4) Error porcentual absoluto medio (MAPE)

El MAPE es un indicador de desempeño de datos para establecer la precisión de valores estimados con respecto a valores observados en la superficie (ecuación 6). A menudo, se usa para evaluar la fiabilidad absoluta de los modelos de predicción, dando como resultado en qué porcentaje la información estimada es precisa (Crawford-Vidal *et al.*, 2020).

$$MAPE(\%) = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Me - Mo|}{Me} \right) \quad \text{Ecuación 6}$$

RESULTADOS

Bases de datos

Se sometieron a revisión más de 25 ensambles de datos globales, pero solamente 15 de ellos cumplieron con los criterios anteriores. En la Tabla II se muestra el nombre completo de cada base de datos de sensores remotos o reanálisis y la abreviatura otorgada para fines prácticos.

Tabla II. Bases de datos seleccionadas para la evaluación.

Abreviatura	Nombre completo
POWER	Prediction of Worldwide Energy Resources
NSRDB	National Solar Radiation Database
CERES_EBAF	Clouds and the Earth's Radiant Energy System_Energy Balanced and Filled
CERES_SYN	Clouds and the Earth's Radiant Energy System_ SYNoptic TOA and surface fluxes and clouds
ERA 5	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis Version 5
NCEP (NCAR)	The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) with the National Center for Atmospheric Research (NCAR)
NCEP (DOE)	The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) with the National Center for Atmospheric Research (NCAR) Version 2
MERRA 2	The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications Version 2
CM SAF	The Satellite Application Facility on Climate Monitoring
FLDAS	Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System
CERES_CLD	Clouds and the Earth's Radiant Energy System_ CldTypHist Algorithm
CLIMCAPS	Community Long-term Infrared Microwave Coupled Product System
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project
PATMOS-x	The Pathfinder Atmospheres Extended (PATMOS-x) Cloud Properties Climate Data Record (CDR)

Fuente: elaboración propia a partir de la recopilación realizada en este estudio.

Cabe señalar que, con respecto al sitio Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), se utilizaron tres subconjuntos como bases independientes, puesto que, la composición de cada algoritmo es diferente. De las 15 bases seleccionadas, 10 proporcionan irradiancia e irradiación promedio y 12 calculan la fracción total del área nubosa promedio diario y mensual (Tabla III).

Puntos de referencia

La consulta y descarga de mediciones horarias de irradiancia se efectuó mediante los sitios oficiales de las dependencias universitarias y de investigación mencionadas. Para empezar, se llevó a cabo un análisis exploratorio donde se estableció que cada sitio de medición debía cumplir, mínimo, con el 75 % del total de datos hasta 2023. Por tal razón, fueron descartados 30 puntos de evaluación: tres observatorios atmosféricos, 12 estaciones mareográficas y 15 estaciones solarimétricas.

Las series temporales fueron analizadas para determinar el periodo de evaluación, donde la mayoría mostró variaciones iniciales debido al momento de la instalación del instrumental correspondiente. De manera que, la homogenización de las mediciones comenzó el 1 de junio de 2014, como resultado, el periodo determinado fue de junio 2014 a junio 2023. La evaluación se llevó a cabo a través de 20 puntos de referencia con observaciones de irradiancia y datos de irradiación a lo largo de todo México (Figura I). De los cuales 13 son observatorios atmosféricos pertenecientes a la RUOA, tres estaciones del SSM, tres estaciones

de la Red mareográfica de CICESE y la estación del SAMMO (Tabla IV).

Métricos estadísticos

De manera general se presentan los resultados en promedio del MBE y MAPE (Tabla V) en los 20 sitios de evaluación. Dando como primera aproximación que nueve de diez bases subestiman la irradiancia, CERES_EBAF y MERRA2 señalan el menor y mayor porcentaje de error respectivamente (MAPE). Asimismo, las diez subestiman la irradiación en menor magnitud a comparación del parámetro anterior y nuevamente CERES_EBAF con 5.8 % mantiene el porcentaje de error mínimo y MERRA2 con 11.1 % el máximo.

De manera general, se expone que las bases de datos evaluadas estiman con mayor precisión la irradiación que la irradiancia.

Evaluación por regiones

Con el fin de evaluar la variación de un parámetro meteorológico en términos de su distribución espaciotemporal, y de acuerdo con Diaz-Félix (2012), se sugiere dividir en subregiones o subperiodos de tiempo (meses o estaciones del año). Ya que, se presentan diferencias considerables entre los diversos tipos de clima y la orografía del país. Estos factores, como ya se mencionó, afectan la distribución de la irradiancia, a la par, se deben reflejar en las estimaciones suministradas por las bases de datos. A fin de generar un desarrollo más amplio, se seleccionaron siete de los 20 sitios sometidos a esta evaluación para cada zona principal del país. En la figura II se ilustra la distribución geográfica

Tabla III. Clasificación del tipo de parámetro proporcionado por cada base de datos.

Parámetros	Base de Datos														
	POWER	NSRDB	CERES_EBAF	CERES_SYN	ERA 5	NCEP (NCAR)	NCEP (DOE)	MERRA 2	CM SAF	FLDAS	CERES_CLD	CLIMCAPS	MODIS	ISCCP	PATMOS-x
Irradiancia e irradiación	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
Nubosidad			x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x

Fuente: elaboración propia a partir de la información obtenida de cada base de datos de sensores remotos y reanálisis presentada en la Tabla II.

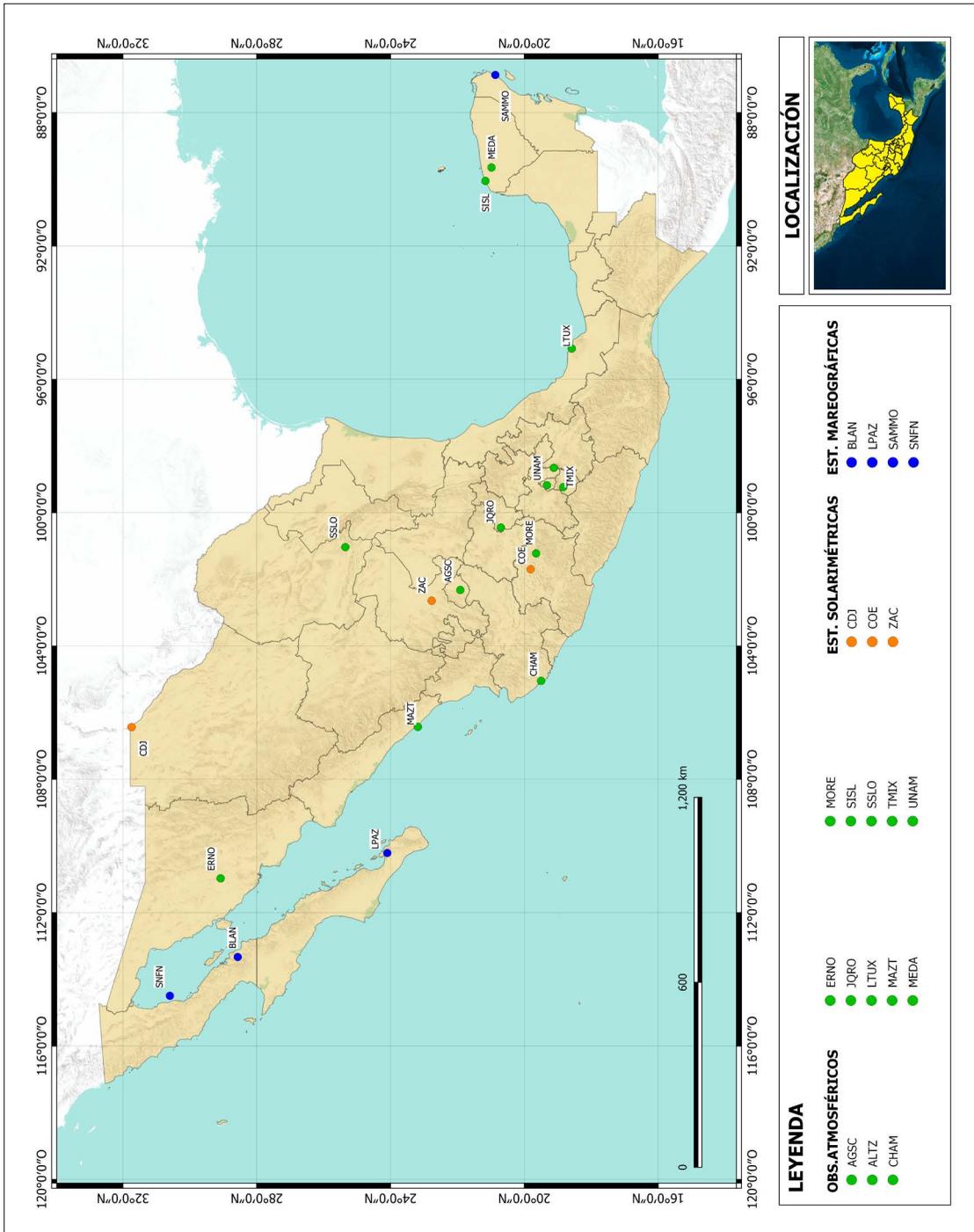


Figura I. Estaciones y observatorios utilizados en la evaluación. Fuente: elaboración propia en QGIS a partir de los puntos de referencia presentados en la Tabla IV.

Tabla IV. Observatorios atmosféricos, estaciones mareográficas y solarimétricas.

CLAVE	ESTACIÓN/OBSERVATORIO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (msnm)
AGSC	Observatorio Atmosférico Aguascalientes, Aguascalientes	21.9157	-102.319	1868
ALTZ	Observatorio Atmosférico Alzomoni Amecameca de Juárez, Edo. de México	19.1187	-98.6552	3985
BLAN	Estación Mareográfica Bahía de los Ángeles, B.C.N.	28.57	-113.33	0
CDJ	Estación solarimétrica Ciudad Juárez, Chihuahua	31.743	-106.432	1127
CHAM	Observatorio Atmosférico Chamela	19.4983	-105.0446	91
COE	Estación solarimétrica Coneo, Michoacán	19.813	-101.695	1990
ERNO	Observatorio Atmosférico Hermosillo, Sonora	29.0814	-110.9706	154
JQRO	Observatorio Atmosférico Juriquilla, Querétaro	20.703	-100.4473	1945
LPAZ	Estación Mareográfica La Paz, B.C.S	24.1	-110.21	0
LTUX	Observatorio Atmosférico Las Tuxtlas, Veracruz	18.5853	-95.0752	180
MAZT	Observatorio Atmosférico Mazatlán, Sinaloa	23.1836	-106.425	20
MEDA	Observatorio Atmosférico Mérida, Yucatán	20.9838	-89.6452	25
MORE	Observatorio Atmosférico Morelia, Michoacán	19.6493	-101.2221	1936
SAMMO	Estación Mareográfica SAMMO	20.8682	-86.8683	5
SISL	Observatorio Atmosférico Temixco, Morelos	21.1645	-90.0484	8
SNFN	Estación Mareográfica San Felipe, B.C.N.	30.59816	-114.49325	0
SSLO	Observatorio Atmosférico Saltillo, Coahuila	25.3532	-101.0332	1786
TMIX	Observatorio Atmosférico Temixco, Morelos	18.8405	-99.2362	1253
UNAM	Observatorio Atmosférico UNAM, Ciudad de México	19.3262	-99.1761	2280
ZAC	Estación solarimétrica Zacatecas, Zacatecas	22.772	-102.644	2316

Fuente: elaboración propia con los puntos de referencia ilustrados en la Figura I.

Tabla V. Resultados promedio de MBE y MAPE de irradiancia e irradiación.

PARÁMETRO	IRRADIANCIA		IRRADIACIÓN	
	MBE	MAPE	MBE	MAPE
MÉTRICA				
POWER	0.2	7.7%	0.12	6.9%
NSRDB	0.8	8.8%	0.26	7.5%
CERES_EBAF	0.04	7.5%	0.08	5.8%
CERES_SYN	0.1	8.8%	0.1	6.9%
ERA5	0.3	9.1%	0.17	7.4%
NCEP (NCAR)	1.5	12.5%	0.53	10.8%
NCEP (DOE)	-0.4	10.9%	0.04	8.7%
MERRA2	0.4	12.8%	0.19	11.1%
CM SAF	1	9.6%	0.35	7.7%
FLDAS	0.3	12.7%	0.14	10.8%

Fuente: elaboración propia con los promedios resultantes de MBE y MAPE en los puntos de referencia de la Tabla IV.

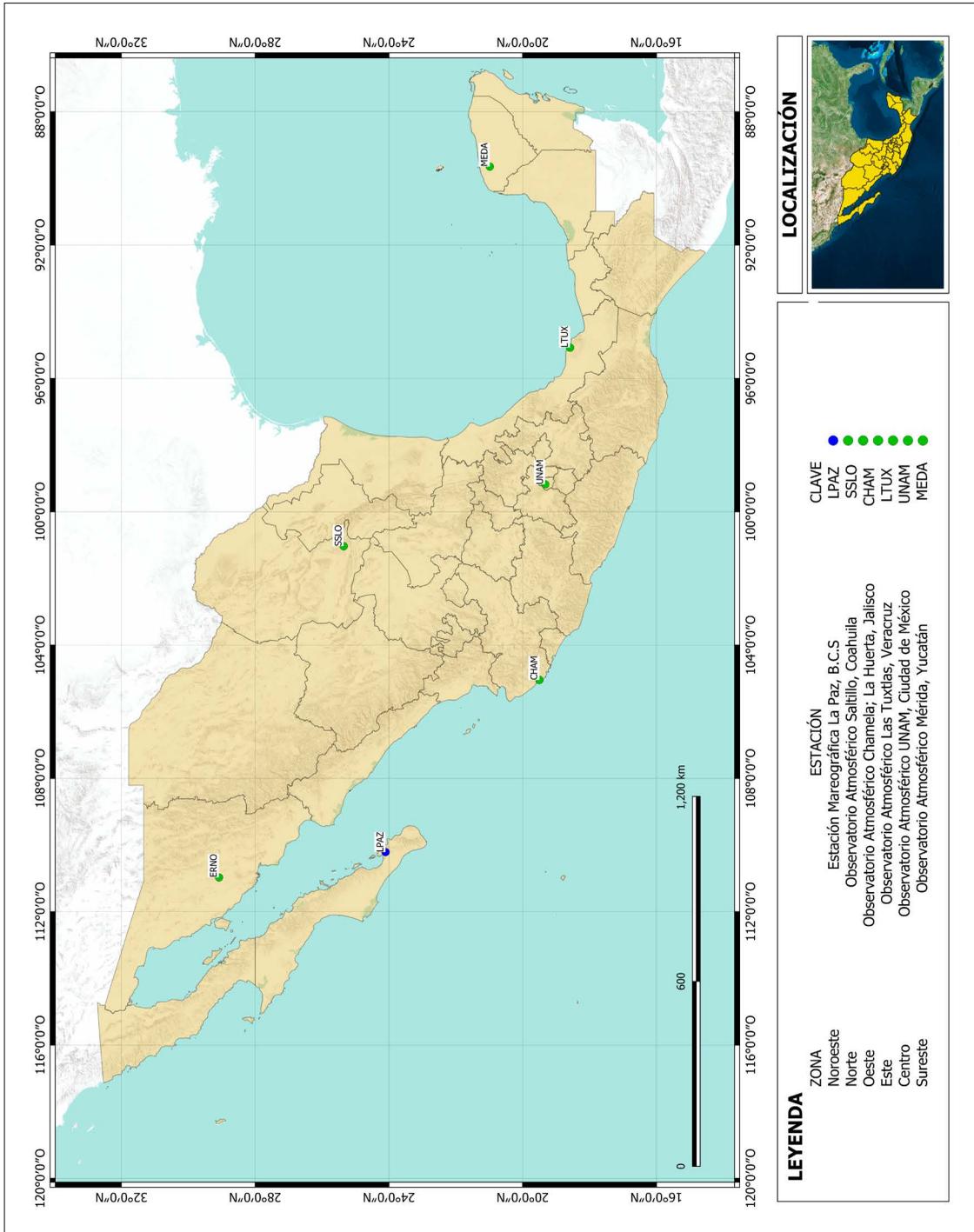


Figura II. Estación y observatorios utilizados para el análisis de regiones. Fuente: elaboración en QGIS propia a partir de los puntos de referencia determinados.

de la estación mareográfica y los seis observatorios atmosféricos.

En el apartado de ANEXOS se presentan las tablas completas del RMSD, MBE, r y MAPE de la irradiancia mensual y la irradiación anual. Tras dicha evaluación estadística, se observó que los valores estimados con mejores resultados fueron en el observatorio de Hermosillo, Sonora (ERNO); en contraste los errores más grandes se obtuvieron en el observatorio de Las Tuxtlas, Veracruz (LTUX). Con base en el criterio anterior, se muestran los gráficos

del comportamiento mensual de cada parámetro suministrados en ambos lugares.

En la Figura III, en ERNO se muestra que seis bases de datos replican con precisión los valores reales. A excepción de NCEP (NCAR) que sobrestima los datos durante la mayoría de los meses, MERRA2 y FLDAS que muestran un comportamiento desfasado.

En LTUX las diferencias entre los valores reales y estimados son ampliamente notorias, a excepción de los meses de otoño (septiembre, octubre y

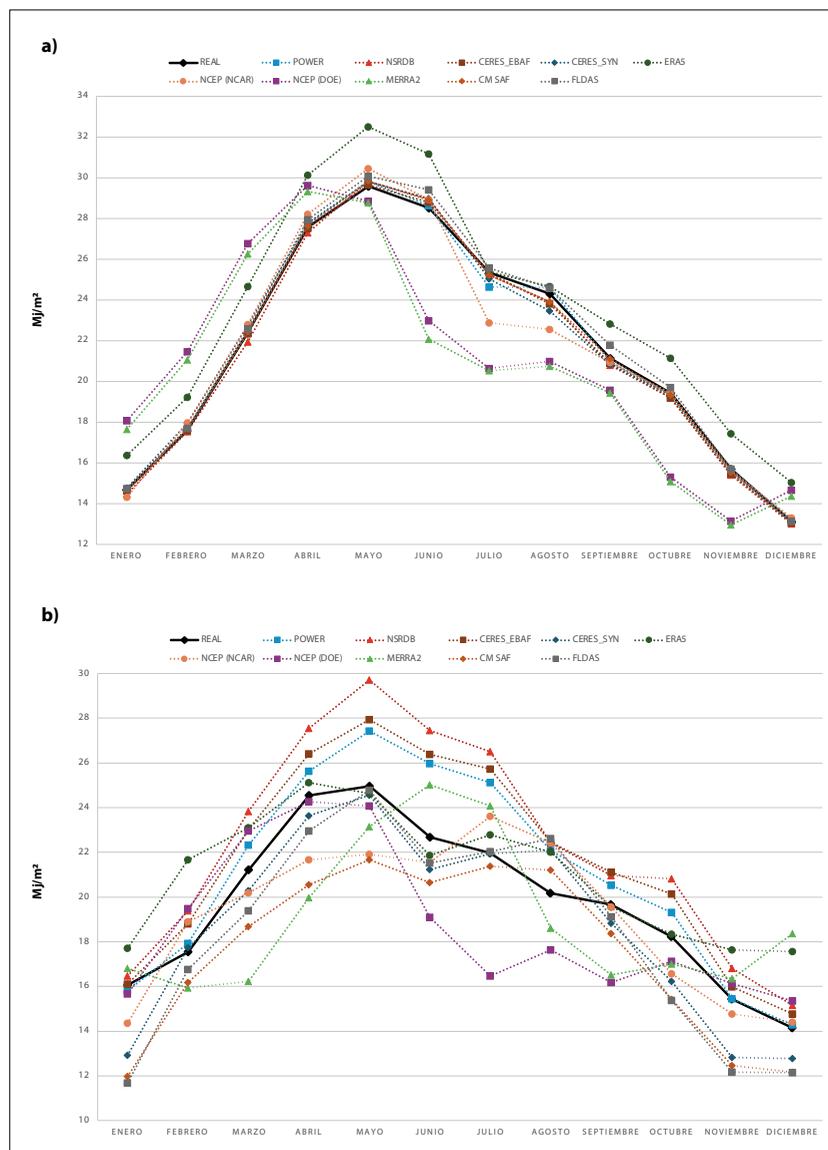


Figura III. Irradiancia mensual observada y estimada para a) ERNO y b) LTUX. Fuente: elaboración propia mediante los datos mensuales promedio de la irradiancia a lo largo de un año.

noviembre) donde las variaciones máximas fueron de , destacando que las bases contienen diferencias notorias entre sí, sobre todo MERRA2 y FLDAS.

En la Figura IV se observan valores promedio anuales entre 5 a 6 , de modo que, los niveles de irradiación en estas zonas del país son óptimos para el desarrollo de proyectos energéticos como se ha planteado en proyecciones gubernamentales y privadas. En el caso de la irradiación anual podemos observar que los promedios en ERNO son similares con un margen máximo de 0.51 , asimismo en LTUX se nota un desplazamiento más grande llegando a 0.76 . Destacando que, en LTUX la base que obtuvo un resultado más cercano al real fue CM SAF y en ERNO fue CERES_SYN dando el valor exacto. Por otro lado, NCEP(NCAR) sobreesestimó la irradiación en ambos casos, obteniendo los resultados con mayor inexactitud.

En este segundo apartado se ilustran los gráficos correspondientes al comportamiento de la fracción total de nubosidad promedio mensual, del periodo establecido, estimada por las doce bases datos.

En la Figura V la característica principal, en ambos casos, es que la mayoría de las estimaciones se comportan de manera similar. Aunque no se contó con datos de referencia en superficie, es notorio que los comportamientos son congruentes entre sí, lo que indica que la mayoría de las bases replican la fracción de nubosidad de manera eficiente. Los valores más altos se encuentran en julio, agosto y septiembre en ambos puntos. Lo anterior está ampliamente relacionado a la presencia de la dinámica atmosférica de cada región, según la época del año.

La Figura VI muestra la cobertura nubosa presente con base en la variación de la irradiación en superficie. Es decir, la climatología conocida sobre el débil desarrollo de nubes en la zona noroeste y norte del país provoca un alto nivel entrante de energía solar. Ambos casos concuerdan con la zona del país en la que se ubican. Por un lado, ERNO, en el noroeste del territorio nacional, predominan meses despejados a parcialmente nublados y, LTUX, en el este, prevalecen los meses parcialmente nublados a nublados. En este mismo sentido, la distribución espacial de las nubes es difícil de estimar actualmente debido a los múltiples criterios

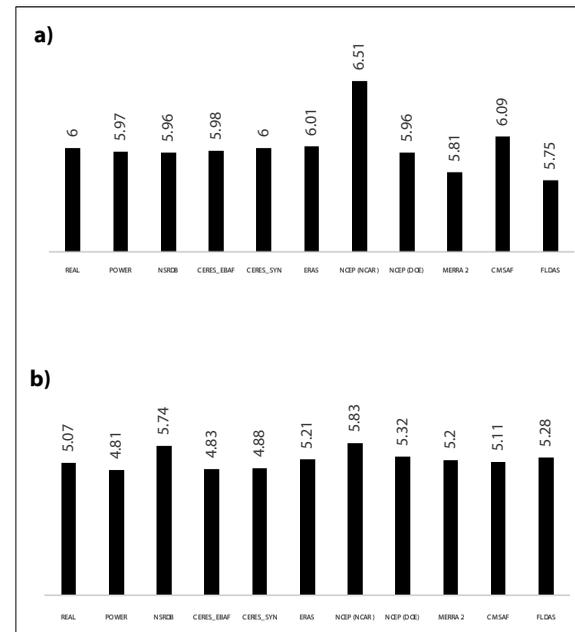


Figura IV. Irradiación promedio anual para a) ERNO y b) LTUX. Fuente: elaboración propia mediante la transformación de datos de irradiancia mensual a irradiación promedio anual en el periodo de evaluación.

que intervienen en ello. Para esta clasificación, los datos obtenidos por cada base de datos fueron relativamente similares, aunque se destaca un mayor número de coincidencias en ERNO, debido a su ubicación geográfica sobre los desiertos de México, donde mayormente existe una menor cantidad de nubosidad; contrariamente a LTUX, donde hay una mayor discrepancia por su cercanía al Golfo de México, y, por ende, una mayor dinámica para la formación de nubes.

Adicionalmente, se plantea que el grado de nubosidad afecta la asimilación simultánea de los diferentes tipos de reanálisis y sensores remotos, reduciendo principalmente la eficiencia en que estos integran los datos observacionales, propiedades físicas y atmosféricas de sitios de todo el mundo. En el caso de LTUX, con mayor cobertura nubosa, se obtuvo una discrepancia mayormente alta de los valores solarimétricos estimados, en contraste, las métricas estadísticas en ERNO presentaron mayor exactitud y niveles inferiores al 60 % en fracción total de nubosidad.

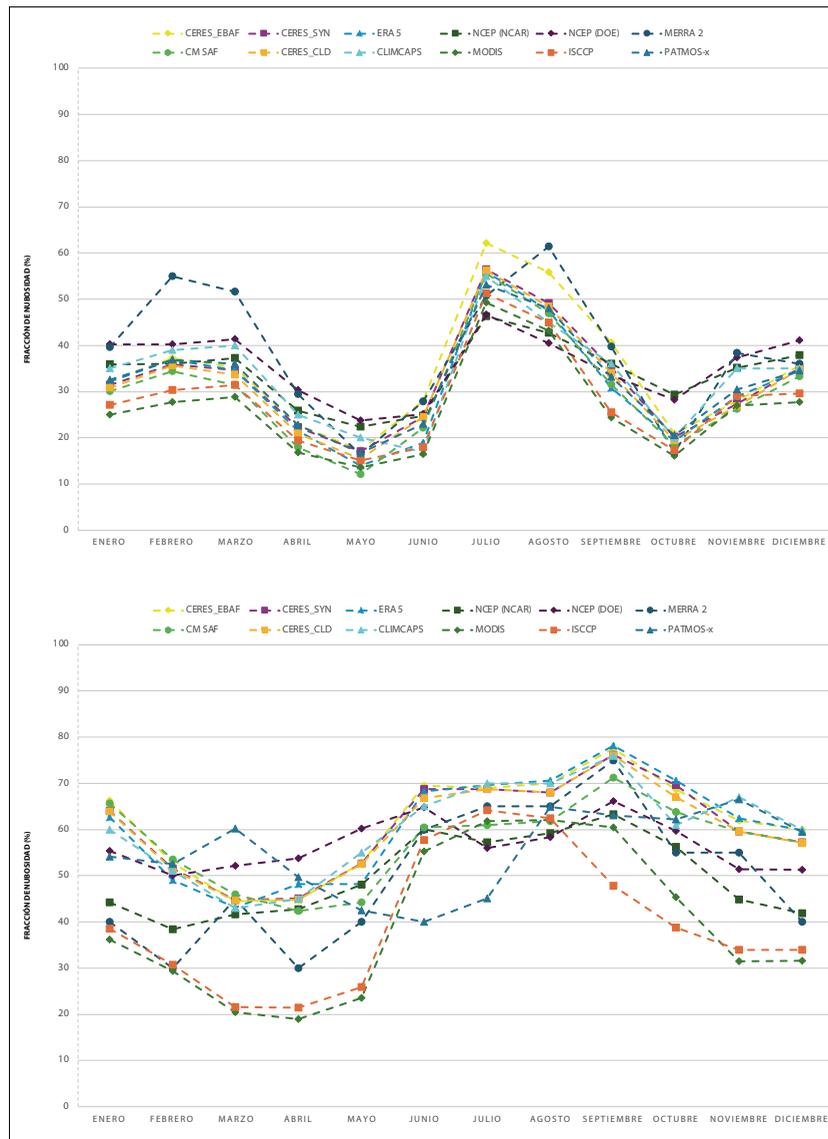


Figura V. Fracción de nubosidad promedio mensual para a) ERNO y b) LTUX. Fuente: elaboración propia donde mediante los porcentajes de fracción de nubosidad promedio a lo largo de un año.

Determinación de las bases de datos “ideales”

Después de analizar los resultados obtenidos por las bases de datos solarimétricos, se expone que POWER fue la mejor evaluada, debido a su menor margen de error en las estimaciones de la irradiancia, además sus valores de irradiación fueron muy similares al promedio de las mediciones. NSRDB obtuvo mejor desempeño en el cálculo de irradiación promedio anual, no obstante, sus actualizaciones permanecen disponibles hasta el año 2023. Esto limita de manera significativa la implementación de esta base

de datos para futuros proyectos. CERES_EBAF fue el conjunto de irradiancia más preciso establecido por los métodos estadísticos y para el caso de la irradiación su desempeño fue muy competente. CERES_SYN obtuvo un alto rendimiento en las estimaciones de irradiación, llegando a destacar en las zonas centrales del país. ERA5 demostró un porcentaje de error pequeño, sin embargo, no superó a las otras bases de datos. NCEP (NCAR) subestimó la irradiación y fracción de nubosidad anual en gran magnitud, lo que ilustró una deficiencia para

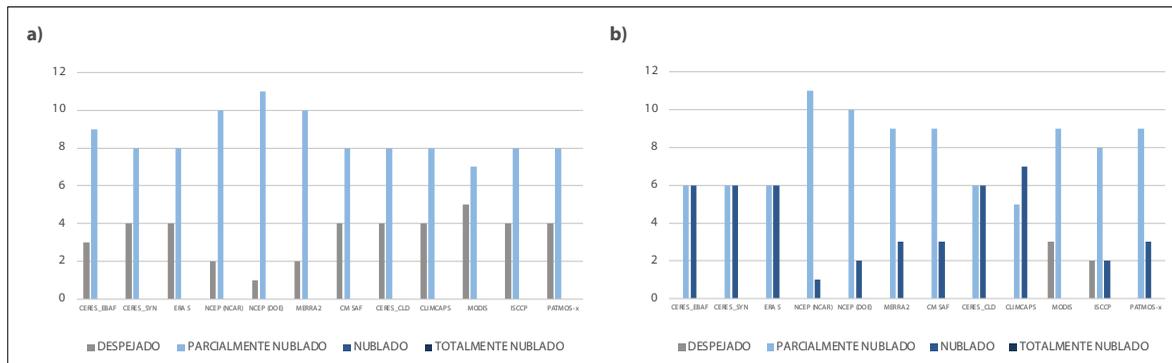


Figura VI. Meses totalmente nublados, nublados, parcialmente nublados y despejados en promedio para a) ERNO y b) LTUX. Fuente: elaboración propia mediante la clasificación establecida de la OMM.

estimar las variables de interés. NCEP (DOE) siendo la versión mejorada del producto anterior, suministró un mayor grado de exactitud en los valores de irradiancia e irradiación, a su vez se encontraron similitudes en la estimación de la nubosidad. Asimismo, CM SAF demostró una implementación óptima para este caso, ya que, los valores salientes fueron muy parecidos a las mediciones de irradiancia en la mayoría de los puntos de evaluación. MERRA2 tuvo un desempeño deficiente, debido a que se adaptó mejor a ciertas áreas del país que a otras, por lo que, no es recomendado para su aplicación nacional. Por último, FLDAS fue la base con el peor rendimiento solarimétrico, careciendo de adaptabilidad en el territorio mexicano.

Tomando en cuenta lo anterior, se proponen las bases POWER y CERES_EBAF como las sobresalientes en la generación de datos solarimétricos.

Por un lado, POWER es un sitio web con una interfaz amigable que, a través de un mapa interactivo de respuesta rápida le permite al usuario descargar, en diferentes formatos, las estimaciones de irradiancia global, directa, difusa, entre otros. Se encuentra en constante mantenimiento al ser una base compuesta por varios modelos y datos de sistemas de percepción remota pertenecientes a la NASA. Cuenta con una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (celda de 55.56×55.56 km). Aunque subestima ligeramente las estimaciones de irradiancia e irradiación, consiguió correlaciones fuertes (0.66 a 0.99) y generó del 1.7 % al 15.15 % de error absoluto para irradiancia y 0.8 % a 12.35 % para

irradiación. Además, mostró mayor adaptabilidad espacial en el análisis por regiones.

La segunda opción CERES_EBAF es una página web con diseño burdo y simple, donde se debe crear una cuenta para tener acceso gratuito a los datos de flujos solares en superficie (irradiancia global, de onda corta y de onda larga en la atmósfera superior, entre otros). A diferencia de POWER, el formato de descarga disponible únicamente es netCDF3 y la resolución espacial es ligeramente inferior, con una cuadrícula regional de $1^\circ \times 1^\circ$ (celda de 111.1×111.1 km). Los datos de irradiancia destacaron con diferencias máximas de 3.2, correlaciones fuertes (0.68 a 0.99) y un margen de error absoluto del 1.26 % al 16 %, siendo los más exactos en la mayoría de los puntos de referencia. Por otro lado, para la irradiación los porcentajes de error absoluto se redujeron a comparación de POWER, con 0.67 % a 14.64 %. CERES_EBAF mostró subestimación para ambos parámetros solares en los 20 sitios de evaluación. Aun así, también es recomendable utilizar las bases de datos de NSRDB (con 7.5 % y 8.8 %), CERES_SYN (con 6.9 % y 8.8 %) y CM SAF (con 7.7 % y 9.6 %), ya que, en promedio, obtuvieron porcentajes de error absoluto aceptables de irradiación e irradiancia, respectivamente.

Para el caso del área total de nubosidad, MODIS fue de los resultados más similares para estimarla, en especial, en las zonas norte y noroeste. PATMOS-x implementó conjuntos definidos que incluyen parámetros más específicos de la cobertura nubosa del cielo, mostrando mayor definición temporal

y espacial para cada punto. CERES_CLD es de los datos de nubosidad más precisos, al destacar que fueron similares a los productos de CERES_EBAF, CERES_SYN, ERA5, CM SAF y CLIMCAPS. Por último, ISCCP modeló el factor de nubosidad en promedio parcialmente aceptable, obteniendo un comportamiento subestimado a comparación de otras bases.

Las doce bases que estiman el porcentaje de fracción total de nubosidad se compararon entre sí, replicando el comportamiento atmosférico exitosamente. Cabe destacar que, a falta de observaciones es difícil determinar concretamente los porcentajes de nubosidad. A pesar de ello, se destacan aquellos productos que tenían un nivel superior de resolución espaciotemporal para generar porcentajes con mayor exactitud. Tales como CERES_CLD, MODIS y PATMOS- x.

DISCUSIÓN

La cantidad de información solarimétrica es un factor importante para realizar evaluaciones de datos modelados y estimados. Es bien conocido que, al tener un mayor número de datos se tendrán resultados más satisfactorios y aceptables estadísticamente. Asimismo, el periodo de tiempo no ha sido lo suficientemente continuo. En numerosos estudios se han ocupado rangos de años diferentes, como en el caso de dos evaluaciones realizadas al NSRDB. En dichos ejemplos, Sengupta *et al.* (2015) tomaron en cuenta siete años, mientras que Habte *et al.* (2017) ocuparon 17 años, por la antigüedad de los registros en superficie. Y más aún, otros autores han realizado productos tomando en cuenta menos datos, como en el caso de Tejeda-Martínez y Gómez-Azpeitia (2015), Díaz-Félix (2012) y Miranda-Jiménez (2016). En esta evaluación se consideró prudente ocupar los datos disponibles por minuto de los últimos nueve años, con el fin de obtener hallazgos significativos y precisos en la implementación de las bases de datos. Por otro lado, los 20 puntos de referencia ocupados son insuficientes para evaluar en todo el país, no obstante, como primer acercamiento este estudio plantea ser lo suficientemente aceptable

para generar información utilizable. Las bases de irradiación e irradiancia estimada se han convertido en una importante herramienta, gracias a su aplicabilidad en los últimos años. Los estudios realizados por Tejeda-Martínez y Gómez-Azpeitia (2015), Díaz-Félix (2012) y Petrarca (2021) apoyan la implementación de la irradiación solar en México como fuente de energía renovable, debido a las características inagotables y constantes del sol. Del mismo modo, con dichos valores solarimétricos disponibles se pueden realizar proyectos científicos nacionales de gran importancia. Autores como Silvero *et al.* (2022) han caracterizado las tendencias a largo plazo de la irradiancia solar en superficie utilizando datos directamente de productos de reanálisis.

CONCLUSIONES

Se cumplió con el objetivo de evaluar la capacidad de cada base de datos de irradiación, irradiancia y nubosidad a lo largo del país. Se planteó que los registros de irradiancia global en superficie provienen de una cantidad limitada de sensores, provenientes de los observatorios/estaciones meteorológicas, solarimétricas y mareográficas, lo que afectó la aplicación de las métricas estadísticas. Actualmente, los productos siguen siendo limitados para el caso del país, a pesar de ello, las bases de datos evaluadas se adaptaron eficientemente a México como método de estimación en puntos donde no existen instrumentos para realizar mediciones.

Los valores de irradiancia e irradiación promedio, extraídos de las diez bases evaluadas, tuvieron una aproximación cercana al comportamiento de las mediciones en superficie. Destacando POWER y CERES_EBAF como las bases de datos mejor evaluadas para estimar los valores de los parámetros solares, principalmente por la resolución espaciotemporal y procedimiento de descarga accesible. Se estima que la base de datos POWER es la más recomendable para estimar los parámetros de irradiancia e irradiación para cualquier área de México.

Aunque este trabajo está más enfocado en los valores solarimétricos, será necesario en un futuro incluir con datos de calidad la fracción total de

nubosidad para los puntos de evaluación, se debe generar y mejorar estos datos, estimaciones puntuales de nubosidad brindarán mayor conocimiento sobre el comportamiento espaciotemporal de la energía solar en las diferentes regiones del país.

De este modo, al comparar los mejores resultados estimados de irradiancia e irradiación con las estimaciones del parámetro nuboso se concluye que, la inexactitud de los valores estimados fue mayor en los puntos de medición donde se presenta mayor porcentaje de cobertura nubosa mensual. De manera que es importante tomar en cuenta este primer acercamiento para validar las afectaciones potenciales que tiene las bases de datos de sensores remotos y reanálisis bajo condiciones nubladas a completamente nubladas.

Las 15 fuentes presentan similitudes con potencial de ser utilizadas en México, sin embargo, se sugiere analizar una resolución temporal más específica, tal como la diaria u horaria. Asimismo, se recomienda utilizar parámetros de fracción total de nubosidad con la clasificación de nubes altas, medias y bajas debido a los tipos de nubes en capas individuales tienen efectos directos de la irradiancia entrante.

En resumen, el presente estudio temporal y espacial de la solarimetría en México demuestra un alto potencial de incidencia anual del orden de 4.5 a 6, contemplando la presencia de nubosidad. Esto ofrece un área de oportunidad para la explotación, uso e implementación de proyectos con estas fuentes de energía, impactando e incidiendo en proyectos nacionales en distintos ámbitos como energía, agricultura, arquitectura, biología, entre otros, esencial para continuar con el desarrollo científico en el país.

AGRADECIMIENTOS

A los revisores de la revista *Investigaciones Geográficas*, ya que sus aportaciones fueron primordiales para dar sentido al artículo. Sus comentarios ofrecieron una perspectiva objetiva y contribuyeron a dar relevancia a la investigación con un impacto y sentido académicos.

REFERENCIAS

- Calbó, J., Enriquez-Alonso, A., Sanchez-Romero, A., González, J.-A., y Sanchez-Lorenzo, A. (2016). Nubosidad y radiación solar en la Península Ibérica entre 1950 y 2050. De las evidencias observacionales a las simulaciones climáticas. X Congreso Internacional AEC. Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio (pp. 57-66). <http://dx.doi.org/10.14198/XCongresoAECAlicante2016-05>
- Crawford-Vidal, R. A., López-López, A. M., Lorduy, J. V., y Wilches-Bonilla, C. A. (2020). Sistemas de medición de variables meteorológicas alimentados por energía solar en la ciudad de Montería. https://cici.unillanos.edu.co/media2020/memorias/CICI_2020_paper_104.pdf
- Díaz-Félix, G. (2012). *Ocho modelos para estimar la cantidad de irradiación solar global en la República Mexicana* [Trabajo de grado, Universidad Veracruzana]. Universidad Veracruzana
- Enríquez-Alonso, A. (2016). *Evaluación de modelos climáticos: el comportamiento de la variable nubosidad* [Tesis doctoral, Universidad de Girona]. <http://hdl.handle.net/10803/392164>
- Estrada-Cajigal, V. (2008). Fuentes de Información de Datos de Radiación Solar. [Archivo PDF] Recuperado 14 de octubre de 2023. <https://docer.ar/doc/n001eve>
- Habte, A., Sengupta, M., y Lopez, A. (2017). Evaluation of the national solar radiation database (NSRDB): 1998-2015. <https://doi.org/10.2172/1351859>
- Hernández, E., Tejeda-Martínez, A., y Reyes, S. (1991). *Atlas solar de la república mexicana*. Universidad Veracruzana y Universidad de Colima.
- Hernández-Lalinde, J. D., Espinosa-Castro, F., Rodríguez, J. E., Chacón-Rangel, J. G., Toloza Sierra, C. A., Arenas-Torrado, M. K., Carrillo-Sierra, S. M., y Bermúdez-Pirela, V. J. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5), 587-595. <https://www.redalyc.org/journal/559/55963207025/55963207025.pdf>
- Miranda-Jiménez, R. (2016). *Reducción atmosférica de la radiación solar en la Península de Baja California*. [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/580>
- Petrarca, R. (2021). Energías limpias en México: proyecciones para la energía solar. *Revista del Observatorio Internacional de Salarios Dignos*, 3(1), 1-24. <https://repositorio.lasalle.mx/handle/lasalle/2577>

- Porrini, C. (2017). *Evaluación del modelo regional WRF para pronósticos de radiación solar en superficie dentro del territorio uruguayo*. [Trabajo de grado, Universidad de la República (Uruguay)]. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/19177>
- Sengupta, M., Weekley, A., Habte, A., Lopez, A., y Molling, C. (2015). Validation of the National Solar Radiation Database (NSRDB) (2005-2012). <https://www.osti.gov/biblio/1225344>
- Silvero, C. I., Medina, F. D., Molina, M. L., Mansilla, G. A., Heredia, T., y Elias, A. G. (2022). Tendencia de la irradiancia solar en superficie en la región del NOA basado en el reanálisis NCEP/NCAR R1. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26, 317-324. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/154210>
- Tejeda-Martínez, A., y Gómez-Azpeitia, G. (2015). *Prontuario solar de México*. Universidad Veracruzana y Universidad de Colima. [http://www.uco.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Prontuario-solar-de-Mexico-\(noviembre-de-2015\)_6.pdf](http://www.uco.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Prontuario-solar-de-Mexico-(noviembre-de-2015)_6.pdf)
- Turkish State Meteorological Service. (s.f). Model Evaluation [Archivo PDF] Recuperado 25 de noviembre de 2024. <https://www.mgm.gov.tr/FTPDATA/arastirma/toz/sdswa/DescriptiveInformation.pdf>

ANEXOS

Raíz del error cuadrático medio (RMSD) de irradiancia mensual (Mj/m2)

CLAVE	POWER	NSRDB	CERES_ EBAF	CERES_ SYN	ERA5	NCEP (NCAR)	NCEP (DOE)	MERRA2	CM SAF	FLDAS
CHAM	2.56	2.73	2.64	2.78	2.77	3.03	3.55	3.99	2.63	4.01
ERNO	0.47	0.43	0.36	0.34	0.55	2.13	1.2	3.88	0.57	3.83
LPAZ	2.34	3.39	2.7	2.6	3.46	3.54	3.26	3.05	3.6	2.73
LTUX	3.29	4.46	3.21	3.26	3.48	4.35	3.31	4.76	3.68	4.4
MEDA	1.19	0.83	1.02	2.23	0.97	1.92	1.7	1.92	1.59	3.37
SSLO	1.92	1.72	1.54	2.97	2.19	4.25	2.29	3.74	2.88	3.14
UNAM	1.53	2.03	1.6	2.55	1.86	2.52	2.61	3.63	2.8	3.69

Error de sesgo medio (MBE) de irradiancia mensual (Mj/m2)

CLAVE	POWER	NSRDB	CERES_ EBAF	CERES_ SYN	ERA5	NCEP (NCAR)	NCEP (DOE)	MERRA2	CM SAF	FLDAS
CHAM	0.28	0.4	0.36	0.09	-0.13	1.3	-0.75	-1.3	0.73	-1.48
ERNO	-0.1	-0.17	-0.09	0.01	0.02	1.84	-0.14	-0.67	0.31	-0.92
LPAZ	1.34	2.59	1.93	1.76	2.78	2.75	2.36	2.29	2.87	1.77
LTUX	-0.76	2.61	-0.7	-0.5	0.78	2.84	0.98	0.73	0.44	0.93
MEDA	-0.71	0.33	-0.46	-0.3	-0.35	1.84	-0.29	-0.66	1.29	-0.17
SSLO	1.33	0.65	0.7	0.79	1.64	3.97	1.69	2.11	2.28	1.13
UNAM	0.13	1.07	0.16	0.48	0.92	1.43	-1.72	2.33	1.89	2.46

Coeficiente de correlación de Pearson de irradiancia mensual

CLAVE	POWER	NSRDB	CERES_ EBAF	CERES_ SYN	ERA5	NCEP (NCAR)	NCEP (DOE)	MERRA2	CM SAF	FLDAS
CHAM	0.82	0.81	0.8	0.77	0.77	0.78	0.67	0.61	0.82	0.62
ERNO	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.75	0.99	0.76
LPAZ	0.9	0.89	0.9	0.9	0.9	0.87	0.89	0.89	0.9	0.89
LTUX	0.7	0.66	0.71	0.7	0.59	0.7	0.7	0.31	0.68	0.4
MEDA	0.97	0.98	0.97	0.8	0.97	0.94	0.93	0.84	0.97	0.49
SSLO	0.94	0.93	0.95	0.77	0.94	0.94	0.94	0.73	0.93	0.76
UNAM	0.87	0.83	0.86	0.61	0.85	0.75	0.78	0.61	0.8	0.61

Error porcentual absoluto medio (MAPE) de irradiancia mensual

CLAVE	POWER	NSRDB	CERES_ EBAF	CERES_ SYN	ERA5	NCEP (NCAR)	NCEP (DOE)	MERRA2	CM SAF	FLDAS
CHAM	9.18	10.02	9.44	9.98	10.54	12.31	14.32	15.93	9.6	16.09
ERNO	1.7	1.54	1.26	1.24	2.03	9.35	3.96	15.62	1.99	15.19
LPAZ	9.48	14.01	11.1	10.45	14.82	14.96	12.95	12.79	15.18	10.88
LTUX	15.15	21.65	14.98	15.2	17.76	24.99	17.55	25.11	17.37	23.42
MEDA	4.43	2.69	3.9	9.57	4.14	7.89	7.13	8.12	6.47	14.32
SSLO	9.08	7.4	7.14	12.83	10.28	21.51	10.49	17.31	8.46	13.79
UNAM	5.68	8.47	6.95	10.8	8.49	11.31	10.01	16	12.13	16.45

Raiz del error cuadrático medio (RMSD) de irradiación anual (kWatt-hora/m ² día)										
CLAVE	POWER	NSRDB	CERES_ EBAF	CERES_ SYN	ERA5	NCEP (NCAR)	NCEP (DOE)	MERRA2	CM SAF	FLDAS
CHAM	0.36	0.44	0.41	0.4	0.48	0.58	0.64	0.87	0.41	0.87
ERNO	0.09	0.08	0.06	0.05	0.1	0.56	0.27	0.99	0.11	0.97
LPAZ	0.47	0.81	0.6	0.57	0.84	0.81	0.74	0.72	0.89	0.61
LTUX	0.39	0.78	0.36	0.35	0.46	0.93	0.34	0.94	0.49	0.85
MEDA	0.29	0.45	0.23	0.21	0.5	0.39	0.47	0.47	0.41	0.87
SSLO	0.38	0.29	0.22	0.59	0.47	1.11	0.5	0.86	0.66	0.65
UNAM	0.12	0.35	0.16	0.4	0.31	0.47	0.51	0.78	0.6	0.8

Error de sesgo medio (MBE) de irradiación anual (kWatt-hora/m ² día)										
CLAVE	POWER	NSRDB	CERES_ EBAF	CERES_ SYN	ERA5	NCEP (NCAR)	NCEP (DOE)	MERRA2	CM SAF	FLDAS
CHAM	0.11	0.15	0.14	0.07	0.02	0.4	-0.16	-0.28	0.24	-0.33
ERNO	-0.03	-0.04	-0.02	0	0	0.51	-0.05	-0.19	0.08	-0.26
LPAZ	0.35	0.7	0.51	0.47	0.74	0.73	0.62	-0.63	0.77	0.48
LTUX	-0.26	0.67	-0.24	-0.19	0.14	0.76	0.25	-0.13	0.04	0.21
MEDA	-0.19	-0.18	-0.12	-0.1	-0.09	0.42	0.07	-0.06	0.37	0.07
SSLO	0.37	0.2	0.2	0.24	0.45	1.1	0.47	0.61	0.4	0.47
UNAM	0.04	0.3	0.05	0.14	0.25	0.39	-0.48	0.64	0.52	0.68

Coeficiente de correlación de Pearson de irradiación anual										
CLAVE	POWER	NSRDB	CERES_ EBAF	CERES_ SYN	ERA5	NCEP (NCAR)	NCEP (DOE)	MERRA2	CM SAF	FLDAS
CHAM	0.97	0.94	0.95	0.95	0.91	0.93	0.86	0.73	0.97	0.74
ERNO	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.78	0.99	0.79
LPAZ	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98
LTUX	0.95	0.93	0.96	0.96	0.93	0.83	0.97	0.48	0.94	0.59
MEDA	0.98	0.9	0.98	0.84	0.99	0.97	0.96	0.84	0.99	0.96
SSLO	0.99	0.98	0.99	0.87	0.99	0.99	0.99	0.84	0.99	0.87
UNAM	0.98	0.96	0.97	0.82	0.97	0.94	0.96	0.83	0.94	0.82

Error porcentual absoluto medio (MAPE) de irradiación anual										
CLAVE	POWER	NSRDB	CERES_ EBAF	CERES_ SYN	ERA5	NCEP (NCAR)	NCEP (DOE)	MERRA2	CM SAF	FLDAS
CHAM	6.28	7.81	7.03	6.89	8.11	9.42	9.04	12.64	6.89	12.27
ERNO	0.88	1.19	0.67	0.62	1.28	9.03	2.74	15.5	1.24	15.02
LPAZ	6.06	12.19	8.83	8	12.79	12.76	10.72	10.97	13.19	8.56
LTUX	5.47	14.11	5.41	5.15	7.04	17.88	6.9	15.85	7.24	15.16
MEDA	3.61	5.28	3.12	8.61	3.39	7.37	5.98	7.38	6.33	13.05
SSLO	6.99	4.45	4	9.23	8.25	20.63	8.37	11.35	11.32	10.15
UNAM	1.73	5.34	2.4	6	4.58	7.13	8.94	11.79	9.22	12.48