



Universidad Nacional Autónoma de México
Centro de Investigación en Energía



Centro de Investigación
en Energía

ANEXO 6 - I

Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de las Energías Renovables en México

Energía Solar

Documento preparado para la Dirección General de Desarrollo
Tecnológico de la Subsecretaría de Planeación y Desarrollo
Tecnológico de la SENER

Coordinador General: Dr. Pablo Mulás del Pozo

Autores:

Dr. Claudio A. Estrada Gasca
Dr. Camilo A. Arancibia Bulnes
Dr. Rubén Dorantes Rodríguez
Dr. Jorge Islas Samperio
Dr. Agustín Muhlia Velásquez

CIE UNAM (Coordinador de Energía Solar)
CIE UNAM
UAM-A (De estancia sabática en el CIE)
CIE UNAM
IG UNAM

Mayo del 2005

Primera Parte: Evaluación del Recurso Solar en México

1 Introducción y Definiciones

Cualquier aplicación de la Energía Solar requiere una evaluación del recurso solar. Por evaluación del recurso solar se entiende la determinación (de preferencia a partir de mediciones) de la cantidad de energía solar disponible para ser utilizada en una aplicación. Como diferentes tipos de sistemas solares utilizan diferentes componentes de la radiación solar, dicha evaluación puede significar cosas un poco diferentes dependiendo de la aplicación. Del mismo modo, el nivel de detalle con que se requiere conocer estas componentes puede ser bastante diferente de una aplicación a otra.

En cuanto a componentes de la radiación solar, desde el punto de vista de las aplicaciones actuales conviene distinguir dos: la radiación solar directa y la radiación solar difusa. La primera es la radiación solar que llega a la superficie de la tierra directamente del disco solar (en línea recta), pero atenuada en su intensidad por la acción de la atmósfera. La segunda es la radiación que ha sido dispersada (esparcida) por las componentes de la atmósfera, de modo que llega a la superficie desde diferentes puntos de la bóveda celeste, pero no del disco solar. Estas dos componentes conforman lo que se conoce como la radiación solar global, o hemisférica.

Aunque todos los colectores solares tienen capacidad de utilizar la radiación directa, su capacidad de usar radiación difusa depende del factor de concentración de la radiación que los caracteriza¹. Específicamente un colector con factor de concentración C utiliza una fracción $1/C$ de la radiación difusa. Los colectores solares planos, paneles fotovoltaicos y otros colectores que no concentran la radiación pueden utilizar ambas componentes de la radiación, mientras que los colectores de alta concentración, como los de canal parabólico, plato parabólico y torre central aprovechan prácticamente sólo la radiación directa. La agricultura es por antonomasia un sistema que aprovecha eficientemente la energía de radiación (Radiación Fotosintéticamente Activa, tanto directa como difusa) que incide sobre las superficies foliares arbitrariamente orientadas, por supuesto, que las plantas silvestres son ya de ese tipo de sistemas, solo que cuando se hace agricultura, el hombre ayuda a que esos sistemas sean más eficientes, por ejemplo orientando su ubicación en el terreno, mejorando las especies (bioingeniería), etc.

El parámetro básico y que más comúnmente se mide es la radiación solar global que incide sobre una superficie horizontal, medición que se expresa en términos de su irradiancia (densidad de flujo de energía de radiación en W/m^2). Esto es, la radiación solar global es la que se mide con un piranómetro en posición horizontal. Cabe diferenciar esta medición con la medición realizada con un piranómetro inclinado, en

¹ La concentración de un colector se define como el cociente del área de captación de energía solar, entre el área del receptor hacia donde esa energía es dirigida. Este cociente se refiere a qué tanto un colector logra aumentar la densidad del flujo de energía en el receptor, aumentando consecuentemente la temperatura de operación del sistema.

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

donde además de la componente directa y la difusa de la radiación solar, hay una fracción de radiación solar reflejada por el suelo que también recibe el piranómetro. Después de la radiación global horizontal los parámetros que siguen en importancia son la radiación solar difusa y la directa, cuya medición también se expresan en términos de su irradiancia dada en W/m^2 ; sin embargo estas cantidades se miden en mucho menos sitios que la radiación global.

Otra distinción que se puede hacer es la medición de diferentes partes del espectro; es decir, la separación entre la radiación solar ultravioleta (UV), la visible (Vis.), la radiación fotosintéticamente activa (que forma parte del visible) y la infrarroja (IR).

Los efectos de la atmósfera son determinantes en la intensidad de la radiación solar, lo que da como resultado una gran variabilidad de este parámetro con el tiempo y con la ubicación geográfica. La cantidad de energía disponible puede presentar diferencias importantes, no sólo de un día a otro o de un mes a otro, si no de un año a otro. Así mismo, puede haber variaciones importantes entre sitios relativamente cercanos debido a diferencias en el microclima.

Debido a la situación arriba descrita, no existe una manera sencilla de predecir el valor de la irradiancia solar en un sitio o momento dado. Esto tiene implicaciones en el diseño de instalaciones solares, las cuales se construyen para operar durante un número grande de años. Es muy importante poder estimar la energía disponible a lo largo de la vida útil del sistema, pero también su variabilidad. Por lo tanto, para poder conocer realmente el recurso solar disponible en un sitio, se requiere hacer mediciones sistemáticas de la radiación global a lo largo de un período de varios años (por lo menos tres años, pero idealmente durante un período de diez). Esto permitiría obtener lo que se conoce como un año solar típico a partir del conocimiento de la climatología del parámetro mencionado.

Desde el punto de vista temporal, los datos de radiación solar pueden estar disponibles en forma de valores instantáneos, medidos con diferentes frecuencias (segundos, minutos, horas), pero también en forma de totales acumulados o promedios sobre determinados períodos de tiempo. En este último caso lo más frecuente es que los datos se reporten en forma de totales diarios para cada día del año, o en forma de un promedio de estos totales diarios para cada mes. En particular, el total diario de la radiación solar global horizontal se denomina irradiación total diaria (dada en MJ/m^2), la cual se obtiene integrando la irradiancia a lo largo del periodo diurno.

Para llevar a cabo simulaciones térmicas de instalaciones solares, edificios, etc., lo más conveniente es poder contar con datos de radiación total para cada hora del día (denominada irradiación horaria; MJ/m^2), ya sea por separado para cada día del año, o por promedios sobre los días de un mes.

La transición hacia las energías renovables ya ha comenzado a ocurrir, con esfuerzos importantes en la Comunidad Europea, Estados Unidos, Japón, e Israel. Dicha transición debe ocurrir de manera relativamente rápida, ya que los efectos nocivos de los combustibles fósiles en el medio ambiente y el cada vez más persistente aumento de sus precios así lo dictan. En este contexto la evaluación del recurso solar se vuelve una tarea urgente. Aunque ha habido importantes esfuerzos a nivel nacional para llevar a cabo esta evaluación, ha faltado una política que encauce el trabajo de

Eliminado: 16
Insertado: 16
Eliminado: 16

manera coherente y persistente. A continuación hacemos una breve reseña histórica de dichos esfuerzos.

2 Medición de Radiación Solar en México

Las mediciones de radiación solar en México datan del año de 1911 (Muhlia, 1990, Estrada-Cajigal, 1992), cuando fueron iniciadas por el Dr. Ladislao Gorczyński, que las continuó hasta 1917. Posteriormente, personal del Servicio Meteorológico Mexicano continúa esta tarea en el Observatorio Astronómico de Tacubaya bajo la dirección del mismo Dr. Gorczyński, de 1923 a 1928. Las anteriores fueron mediciones de radiación directa usando un pirheliómetro de compensación eléctrica de Ångström. Los resultados de estas mediciones se publicaron en reportes, de los cuales una parte se encuentran en los archivos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, en la actualidad es una dependencia de la Comisión Nacional del Agua), mientras no se sabe con certeza la ubicación actual del resto.

No hay registro de mediciones posteriores si no desde el año de 1957, cuando con motivo del Año Geofísico Internacional, el Instituto de Ciencia Aplicada y el Instituto de Geofísica de la UNAM, retoman esta tarea. Se instalaron cinco estaciones solarimétricas: en Ciudad Universitaria, D.F.; Alzomoni, Estado de México, San Cristóbal de las Casas, Chis.; Veracruz, Ver. y Chihuahua, Chi. Moviéndose en 1959 la estación de Alzomoni a Tlamacas, Estado de México. También se instaló en 1960 una estación en San Luís Potosí, S.L.P. De estas estaciones las únicas que operaron por un período largo fueron la de Chihuahua, Chi., durante quince años y la de Ciudad Universitaria, que opera hasta la fecha. En años recientes el Instituto de Geofísica de la UNAM puso en operación una estación en Orizabita, Hgo., la cual también continúa en operación a la fecha. Se ha intentado instalar estaciones en otros lugares pero no han tenido éxito.

Por otro lado, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, también puso en operación en 1979 una pequeña red de cuatro estaciones. Desgraciadamente los datos obtenidos no fueron de la calidad adecuada, debido a que los instrumentos usados eran dispositivos cuyo diseño no había sido suficientemente puesto a prueba en condiciones de operación continua. Debido a esto y otros problemas, dicha red dejó de operar en 1983.

Además de lo anterior, varias instituciones académicas han realizado mediciones en diferentes épocas. En algunos casos estas mediciones han sido hechas durante períodos muy cortos, por lo que sus datos no son realmente útiles para hacer una estimación estadística del recurso solar, y en otros no es información fácilmente accesible.

Algunas instituciones han medido radiación solar con interés específicamente en la evaluación del recurso energético solar, como por ejemplo el Centro de investigación en Energía de la UNAM, a partir de 1990 (Quiñones Aguilar y col., 2002) y el Grupo de Energía de la Universidad de Sonora, a partir de 1993 (Villa Martínez y col., 2001).

Por parte de algunas dependencias gubernamentales se han instalado redes de estaciones meteorológicas en el país, algunas de las cuales han contado con sensores de radiación solar:

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

En los años 70, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) instaló piranógrafos bimetálicos y heliógrafos en alrededor de 60 estaciones meteorológicas de su red; sin embargo los piranógrafos no fueron recalibrados sistemáticamente ni se procesó la información recabada.

En los años 80, la CFE creó una red solarimétrica de alrededor de 20 estaciones, equipadas con piranógrafos, localizadas en cuencas hidrológicas. No mantuvo un programa de calibración de estos equipos, ni programas para el procesamiento de la información. En años recientes instalaron 6 estaciones con equipo moderno. No se sabe si los mantienen recalibrados.

En la actualidad las redes de dependencias gubernamentales que están en operación son las siguientes:

El SMN opera una red de 94 estaciones automáticas (<http://smn.cna.gob.mx/productos/emas/emas.html>), que miden la irradiancia solar global con piranómetros estándar de segunda clase. Estos piranómetros ya han alcanzado una antigüedad de entre 1 y 5 años, dependiendo del sitio en donde se instalaron, y aunque fueron referenciados de fábrica, no se ha seguido posteriormente un programa para su recalibración. La red de estaciones tiene una cobertura bastante amplia del territorio nacional, sin embargo fue diseñada tomando en cuenta solo criterios hidrológicos, dejando de lado otros que se refieren a los usos del suelo, la orografía y los diferentes climas que existen en el territorio nacional (Tabla 1).

La Comisión Federal de Electricidad cuenta con una red de alrededor de 20 piranógrafos sin recalibración y 6 piranómetros también sin recalibración.

La Secretaría de Marina cuenta con una red de alrededor de 10 piranógrafos sin recalibrar y 10 heliógrafos. En fechas recientes ha instalado 22 estaciones meteorológicas automáticas con piranómetro.

La Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, a través de la Red Automatizada de Monitoreo Ambiental (RAMA) cuenta con 5 piranómetros referenciados (<http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnrama2.htm>). Esta red además hace mediciones de radiación solar UV en diez de sus estaciones y radiación fotosintéticamente activa en cuatro de ellas.

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

Tabla 1. Lista de las estaciones automáticas del Servicio Meteorológico Nacional.

ESTADO	ESTACIONES
BAJA CALIFORNIA	MEXICALI, SAN QUINTÍN, BAHÍA DE LOS ANGELES, PRESA ABELARDO L. RODRÍGUEZ (TIJUANA), PRESA EMILIO LÓPEZ ZAMORA (ENSENADA)
BAJA CALIFORNIA SUR	SANTA ROSALÍA, CD. CONSTITUCIÓN, CABO SAN LUCAS, GUSTAVO DÍAZ ORDAZ
CAMPECHE	CD. DEL CARMEN, CAMPECHE, CALAKMUL
CHIAPAS	PALENQUE
CHIHUAHUA	CHINIPAS, GUACHOCHI, URIQUE, MAGUARICHI, CHINATÚ, BASASEACHI
DISTRITO FEDERAL	PIMENTEL, TEZONTLE, AEROPUERTO, COORDINACIÓN DEL S. M. N., ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS IPN
DURANGO	LAS VEGAS, AGUSTIN MELGAR
GUANAJUATO	PRESA ALLENDE,
GUERRERO	ACAPULCO, CD. ALTAMIRANO, PETACALCO
HIDALGO	PACHUCA, HUEJUTLA
JALISCO	LOS COLOMOS, RÍO TOMATLAN, TIZAPAN, JOCOTEPEC, CHAPALA
MEXICO	NEVADO DE TOLUCA, PRESA MADÍN, ATLACOMULCO, CERRO CATEDRAL
MICHOACAN	APATZINGAN, ANGAMACUTIRO
MORELOS	INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
NUEVO LEÓN	PRESA EL CUCHILLO
OAXACA	PUERTO ÁNGEL, PINOTEPA NACIONAL, MATIAS ROMERO
PUEBLA	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE TECAMACHALCO, IZUCAR DE MATAMOROS
QUERÉTARO	HUIMILPAN
QUINTANA ROO	CANCÚN, CHETUMAL, SIAN KA'AN, COZUMEL
SAN LUIS POTOSI	MATEHUALA
SONORA	ALAMOS, YECORA
TAMAULIPAS	MATAMOROS, SOTO LA MARINA, ALTAMIRA, SAN FERNANDO
TLAXCALA	HUAMANTLA
VERACRUZ	JALAPA, TUXPAN, ALVARADO, CD. ALEMÁN, LA CANGREGERA, CENTRO DE PREVISIÓN
YUCATAN	TANTAKIN, MÉRIDA, CELESTÚN, RÍO LAGARTOS
ZACATECAS	ZACATECAS

3 Bases de datos

El Centro Mundial de Radiación solar (World Radiation Data Centre; WRDC), localizado San Petersburgo, Rusia, sirve como archivo central de datos de radiación solar medidos en más de mil sitios alrededor del mundo. Fue establecido en 1964, por una resolución de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization; WMO). Su objetivo es centralizar y publicar la información radiométrica solar del mundo, con objeto de asegurar la disponibilidad de dicha información para la comunidad científica internacional. De toda la información almacenada en el WRDC, actualmente se puede obtener en su sitio de Internet (<http://wrdc-mgo.nrel.gov/>; mantenido por el National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos, NREL) los datos de los años 1964 a 1993.

Por otra parte, en los Estados Unidos existe la Base de Datos Nacional de Radiación Solar (National Solar Radiation Data Base; NSRDB). En ella se almacenan 30 años (1961-1990) de datos de radiación solar y datos meteorológicos complementarios, de

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

237 sitios en territorio estadounidense, más sitios de Puerto Rico y Guam. Esta base de datos se almacena en el Renewable Resource Data Center (RReDC; <http://rredc.nrel.gov/>), que es mantenido por el NREL.

En base a los datos de la NSRDB se ha desarrollado un año meteorológico típico (AMT) para los diferentes sitios de los Estados Unidos, el cual está disponible también en el sitio de Internet (http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/). Este AMT consiste en datos horarios de radiación solar y variables meteorológicas, para cada día del año. La intención de hacer disponible estos datos es que puedan ser usados para llevar a cabo simulaciones de sistemas de energía solar y edificios, para ayudar en tareas de diseño y comparación.

Para Europa existe una base de datos de radiación solar mantenida por el Institute for Environment and Sustainability, del Joint Research Centre, de la Comisión Europea (<http://iamest.jrc.it/pvgis/pv/solmod/solmod4.htm>). Esta base de datos está basada en el Atlas Europeo de radiación solar, que contiene información obtenida a partir de datos de más de 500 estaciones meteorológicas en Europa. La base de datos se ofrece dentro de un Sistema de Información Geográfico y permite llevar a cabo estimaciones de energía disponibles para colectores térmicos y fotovoltaicos de diferentes inclinaciones, para cualquier sitio del subcontinente europeo. También existe la base de datos: The European Database of Daylight and Solar Radiation (<http://www.satellite-light.com/core.htm>).

3.1 Bases de datos para México

Como se mencionó arriba en el sitio de Internet del WRDC, hay datos para los años 1964 a1993. En particular, para el caso de México, información de cuatro puntos de medición se puede obtener de ese sitio: Ciudad Universitaria, en México, D. F. (1967-2004); Chihuahua, Chih. (1967-1976); Orizabita, Hgo. (1968-2004); Comitán, Chis. (1988). Para este último sitio no se tiene un año completo y la información almacenada consiste en el total de horas diarias de sol brillante.

Como se mencionó más arriba, el SMN opera una red de 94 estaciones que miden la radiación solar global. Los datos de los últimos 90 días pueden ser consultados en la página del SMN (<http://smn.cna.gob.mx/productos/emas/emas.html>), en forma de promedios diarios de irradiancia solar global. Para datos de más largo plazo es necesario comunicarse directamente con el personal del SMN.

Unas cuantas universidades del país han hecho pública en Internet información de radiación solar: desde luego el Observatorio de Radiación Solar del IGF-UNAM, ya mencionado anteriormente, con sus datos para Ciudad Universitaria, en el D.F. y Orizabita Hgo. (<http://www.geofisica.unam.mx/ors/ors-red.html>); el Grupo de Energía de la Universidad de Sonora (<http://sun.iq.uson.mx/pclima/index.html>); y de manera más incipiente el Centro de Investigación en Energía de la UNAM (<http://xml.cie.unam.mx/xml/se/cs/meteo.xml>).

Recientemente, el IGF-UNAM ha propuesto la creación de una base de datos nacional, con un servidor de Internet, para hacer ampliamente disponible la información de radiación solar (Valdés y col., 2001). Se busca conjuntar en esta base de datos la información que ha sido medida por diferentes organizaciones en el país, como

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

universidades, centros de investigación, Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Federal de Electricidad, Comisión Nacional del Agua, Armada de México, etc. Sin embargo, no basta con reunir los datos dispersos en una sola base de datos; para asegurar una alta calidad en la información solarimétrica es necesario que los piranómetros que se usen sean sujetos de un sistemático y permanente programa de mantenimiento preventivo y referenciación (recalibración) contra los estándares que mantienen la escala de Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference, WRR).

4 Estimación a partir de modelos

Los modelos para la estimación de la radiación solar se hacen necesarios como referencias que ayudan al mejor entendimiento de los diferentes factores geométricos (astronómicos) y ambientales que afectan los flujos de la energía de radiación solar y para hacer estimaciones de estos flujos en ciertos sitios de interés, en donde no se cuenta con mediciones de la radiación global ni de sus componentes.

En el pasado la medición de la radiación solar era poco común, de modo que los primeros modelos que se desarrollaron tenían como objetivo la determinación de la irradiancia solar global a partir de variables meteorológicas ampliamente medidas, como humedad, precipitación, cubierta de nubes y heliofania (horas de sol brillante, también llamada a veces insolación). Al irse volviendo más común la medición de la irradiancia solar global se desarrollaron modelos para determinar las componentes directa y difusa, como por ejemplo el de Liu y Jordan (1960).

También se han desarrollado modelos basados en principios físicos (modelos teóricos) que buscan obtener valores de las componentes de la radiación solar a través de cálculos detallados. Sin embargo dichos modelos, aún en los casos más simples, requieren como datos de entrada una cantidad de información difícil de obtener, lo que les resta utilidad práctica. En un nivel intermedio entre los modelos empíricos y los basados en principios físicos, están los semi-empíricos, (ver por ejemplo, Bird y Riordan, 1986).

Aunque la escasez de datos medidos para México y otras partes del mundo hace que los modelos del tipo descrito y la información generada a partir de ellos sean de utilidad, en la actualidad han cobrado mucha mayor importancia los métodos para estimar la radiación solar y sus componentes a partir de datos proporcionados por las imágenes satelitales. Estos métodos se discuten a continuación.

5 Estimaciones a Partir de Datos de Satélite

Los satélites geoestacionarios llevan a cabo un monitoreo de la atmósfera y la cubierta de nubes de la tierra de manera continua en el tiempo y abarcando extensas regiones del mundo. La resolución sobre las regiones de gran cobertura geográfica es aproximadamente de 1 Km², cuando se trata de imágenes en el espectro visible. Al ser la cubierta de nubes el parámetro que más influencia tiene sobre la radiación solar, esta capacidad de los satélites de brindar una información detallada de dicha cubierta se traduce en un importante potencial para evaluar el recurso solar (Renné y col., 1999; Perez y col., 2001).

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

La gran ventaja de los métodos de estimación de radiación basados en datos satelitales es precisamente su resolución espacial. Con ellos es posible generar mapas de radiación solar con una resolución muy detallada (de 2 a 10 Km²) sobre regiones específicas. Esto los convierte en una fuente de información muy adecuada, por ejemplo, para ser integrada en Sistemas de Información Geográfica.

Como cualquier estimación a partir de modelos, aquellas basadas en datos de satélite tienen una exactitud limitada. Convencionalmente se considera un error cuadrático medio de entre 20 y 25% para estas estimaciones, cuando se las compara con mediciones llevadas a cabo por estaciones localizadas en sitios específicos (ver por ejemplo, Beyer y col., 1996). Hay estudios que ubican este error en un valor menor. Por ejemplo, Zelenka y col. (1999) llevaron a cabo un estudio en que llegan a la conclusión de que el error real de los métodos para obtener irradiancias a partir de datos de satélite es de alrededor del 12%. El resto del error es atribuido por los autores al hecho de que los satélites permiten estimar promedios sobre áreas grandes, de varios kilómetros cuadrados. Cuando se compara estos valores con mediciones en estaciones específicas, de manera natural ocurre un error cuadrático medio de alrededor del 15%, ya que los valores medidos por una estación no proveen un promedio de la región si no una medición en un punto con un clima bien específico.

A pesar de las grandes ventajas que presenta la estimación de la irradiancia solar a partir de información satelital, no se debe menospreciar la importancia de una red terrestre que provea información de un número grande de puntos bien distribuidos sobre un territorio dado. Para que los métodos satelitales den resultados razonables, es necesario calibrarlos (sintonizarlos) con datos de superficie, lo cual requiere de una buena cobertura de una red terrestre constituida por estaciones situadas estratégicamente.

5.1 Estimaciones Satelitales Para México

En el caso de México se han llevado a cabo estimaciones de la irradiancia solar en base a datos de satélite. Tal es el caso de los trabajos de Galindo y Valdés (1992) y de Galindo Estrada y Cifuentes Nava (1996). El segundo trabajo es en realidad una extensión del primero y comparten la misma metodología.

Los cálculos de Galindo, Cifuentes y Valdés fueron realizados a partir de datos de radiómetros VISSR con un rango de detección de radiación entre 550 y 750 nm de longitud de onda, embarcados en los satélites geoestacionarios SMS-2 y GOES-2, fijos en el ecuador en los meridianos 75° O y 135° O, respectivamente. Los archivos usados consisten en siete imágenes diarias con resolución de un grado por un grado (latitud y longitud), y son traducidos en irradiancias de acuerdo al método de Tarpley, modificado por Galindo y col. (1991). La modificación de los coeficientes de correlación del modelo se hizo mediante la comparación con los datos medidos en Ciudad Universitaria (CU), México, D. F., por el Instituto de Geofísica de la UNAM, en el año de 1984.

Con este método se generaron mapas de isolíneas de irradiación diaria en promedios para cada mes (Galindo y Valdés, 1992), como se ilustra en la Fig. 2, y tablas de irradiación promedio diaria para cada mes y para las capitales estatales (Galindo Estrada y Cifuentes Nava, 1996).

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

Como argumenta Estrada-Cajigal (1992), al haberse modificado este método para México haciendo uso del contraste de sus resultados contra los datos de una sola estación en tierra (CU) y para un solo año, no es posible esperar una gran exactitud en sus resultados. Según estima este autor, los errores pueden alcanzar valores de hasta 40% para algunos sitios.

6 Mapas de Radiación Solar para México

Como se ha descrito en las secciones anteriores, varios mapas y tablas de radiación solar para México han sido publicados por diferentes investigadores. Al ser relativamente escasos los datos medidos en tierra que han estado disponibles para la elaboración de estos mapas, todos ellos se basan en métodos estimativos de diferentes tipos. Como se ha discutido más arriba, cada metodología tiene sus propias limitaciones. En las Figs. 1, 2 y 3 se muestran ejemplos de este tipo de mapas.

Como resulta aparente del examen de los ejemplos que se muestran en las Figs. 1 a 3, es posible encontrar diferencias muy importantes entre las estimaciones de la irradiación que han hecho diferentes autores. Renné y col. (2000) hicieron una comparación de los diferentes resultados disponibles en la literatura hasta esa fecha y encontraron que las diferencias entre ellas alcanzan hasta el 20%. En particular compararon los trabajos de Galindo y Valdés (1992), Hernández y col. (1991), Almanza y col. (1992), Galindo y Chávez (1977).

Las grandes diferencias que se pueden observar en los resultados de diferentes autores son atribuibles a la naturaleza empírica de los métodos usados, pero también a la escasez de sitios de medición de la radiación solar en superficie. Por ejemplo, en el trabajo de Almanza y col. (1992), el modelo se contrastó contra sólo tres sitios de México con datos de radiación disponibles para entonces. Para suplir un poco esta limitación se usaron también datos de puntos de medición en los Estados Unidos que se encontraron muy cercanos a la frontera con México.

En el trabajo mencionado de Renné y col. (2000), también se presentan algunos resultados obtenidos con el método que usa el modelo CSR (Climatological Solar Radiation Model). Ellos estiman que este método puede ser más exacto que los usados previamente. Sin embargo, a falta de contraste con más datos medidos en estaciones solarimétricas, la situación es la misma que con otros modelos: no hay una certeza sobre la posible exactitud de los datos.

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

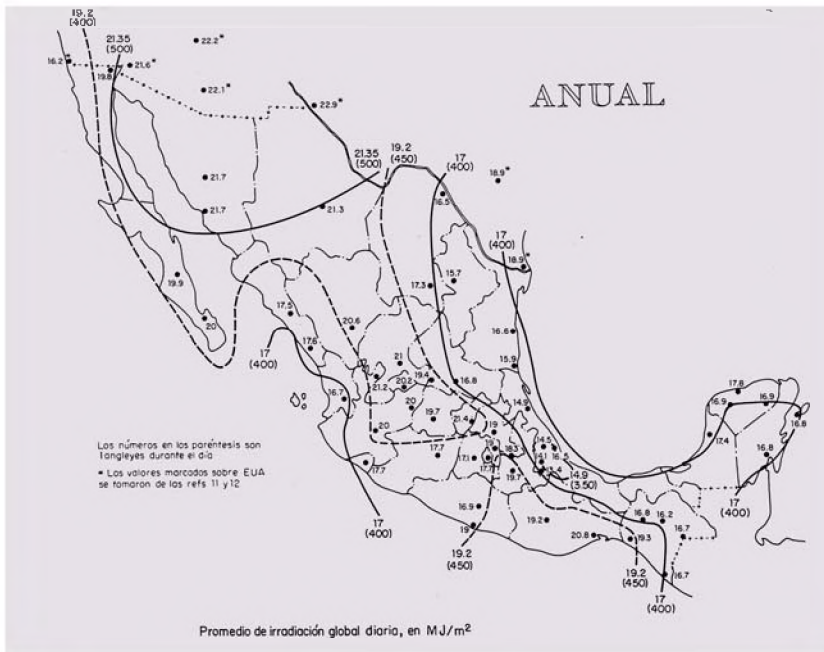


Figura 1. Isoleínas de insolación promedio anual para México, en MJ/m²/día; tomado de (Almanza y col., 1992).

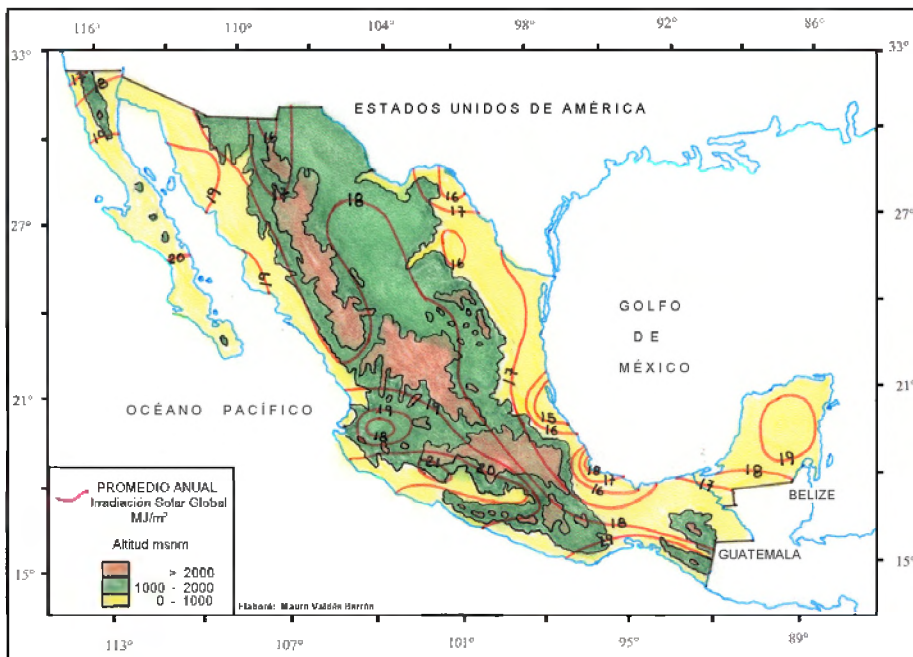


Figura 2. Isoleínas de Insolación promedio anual para México, en MJ/m²/día; adaptado de (Galindo y Valdés, 1992).

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

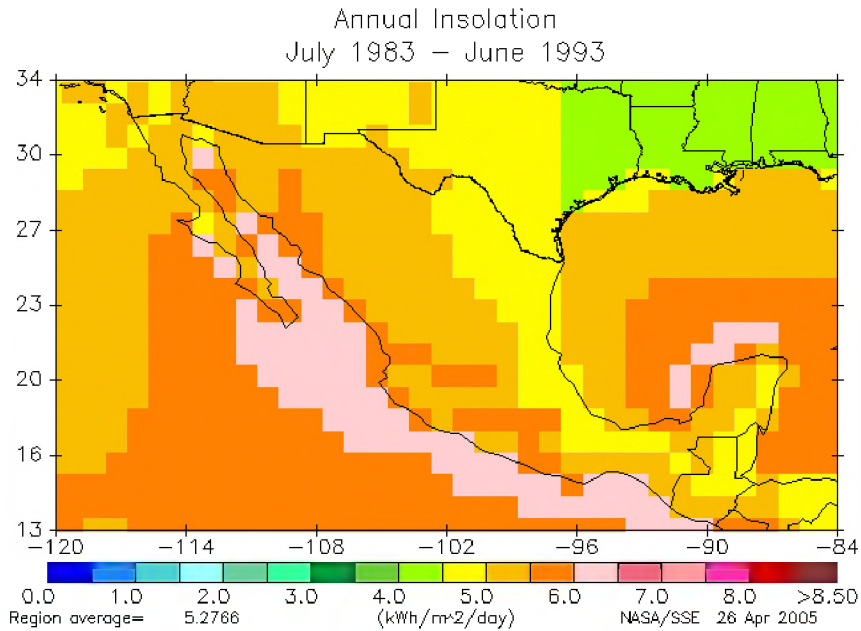


Figura 3. Mapa obtenido a partir del modelo de la NASA (NASA, 2005).

7 Tendencias actuales y tareas a futuro

No parece haber duda respecto a que el uso de satélites para la evaluación del recurso solar seguirá siendo la tendencia dominante en los próximos años (Perez y col., 2001; Renné y col., 1999). El potencial que tienen estos métodos para abarcar grandes extensiones geográficas con buena resolución es algo que no tiene ningún otro método en la actualidad. Sin embargo, los satélites por sí mismos no pueden proveer una evaluación del recurso, debido a que miden parámetros que no se relacionan de manera simple con la irradiancia de la radiación global solar. Por lo tanto, para poder llevar a cabo una adecuada estimación del recurso solar partiendo de datos satelitales, es necesario contar con métodos que hayan sido bien calibrados con una base amplia de datos medidos en tierra. Los modelos han mejorado considerablemente en años recientes (Perez y col., 2001; Renné y col., 1999; Zelenka y col., 1999) y es previsible que haya todavía desarrollos en este campo. Por otro lado, aún hay una importante carencia de información de mediciones en tierra para muchas regiones del territorio mexicano. Esto por el momento no permite hacer una evaluación adecuada de los resultados que se han generado con los modelos.

Como se discutió más arriba, entre los mapas que se han publicado para la radiación solar en México se pueden observar diferencias incluso mayores al 20%, y las diferencias con respecto a los datos medidos con que se cuenta pueden llegar en algunos casos hasta el 40%. Esto contrasta fuertemente con el margen de error

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

alcanzable por los modelos satelitales modernos, que se ha estimado en 13%, y nos indica que hay un importante potencial de mejoría.

Es claro que a pesar del valor que han tenido en el pasado los mapas existentes, como única fuente disponible de información de radiación solar para el país, es indispensable contar con información actualizada. En ese sentido, el Observatorio de Radiación Solar del IGF-UNAM, trabaja actualmente en la elaboración de nuevos mapas de radiación solar para México, basados en la información solarimétrica facilitada por el SMN. Dicha información deberá todavía ser validada actualizando los programas de recalibración de los piranómetros de las 94 estaciones del SMN. La elaboración de estos nuevos mapas será un desarrollo muy importante, ya que será la primera ocasión en que se podrá contar con mapas basados en datos medidos en un número significativo de estaciones. Hay que tener en cuenta sin embargo, que hay regiones del país totalmente ignoradas por esta red de estaciones.

De acuerdo al estado actual del desarrollo de las tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar, que requieren de información cada vez más detallada de radiación, resulta claro que la publicación de mapas de promedios mensuales de irradiación total diaria cubre sólo el mínimo indispensable de las necesidades de los usuarios. En ese sentido, resulta muy pertinente el esfuerzo que ha venido haciendo el IGF-UNAM (Valdés y col., 2001), en el sentido de establecer una Base de Datos Nacional de Radiación Solar, que pueda ser consultada fácilmente en la red de Internet y que integre la información que ha sido medida por diferentes instituciones en el país. Esta base de datos permitirá almacenar una mayor cantidad de información, con pasos de tiempo cortos (una hora, 10 minutos, etc.) y de más de una variable solarimétrica, en los casos en que estén disponibles. Sin embargo, resulta muy importante asegurar la calidad de los datos que se integren a dicha base de datos.

Para asegurar la calidad de los datos es necesario que las diversas instituciones establezcan programas para la calibración, al menos bianual, de sus sensores de radiación solar. Como se ha explicado más arriba, México cuenta con una institución reconocida por la OMM, para llevar a cabo la calibración de equipos, la cual es el Observatorio de Radiación Solar del IGF-UNAM. Este Observatorio es uno de los Centros Radiométricos Regionales de la AR-IV, el cual tiene como una de sus funciones principales el de coadyuvar con dicha organización en la diseminación de la Referencia Radiométrica Mundial. Para esto, dicho observatorio lleva a cabo una comparación anual de los equipos a nivel nacional, y cada cinco años una intercomparación regional (la AR-IV comprende los países de América del Norte, del Centro y el Caribe). Además de lo anterior, participa quinquenalmente en las calibraciones internacionales, con sus equipos de referencia, que se llevan a cabo en el Centro Radiométrico Mundial, en Davos, Suiza. Por lo tanto, la calibración de los equipos a nivel nacional puede llevarse fácilmente a cabo si existe el interés de las instituciones, a través de convenios de colaboración o proyectos conjuntos con el IGF-UNAM.

En el caso de datos antiguos también es necesario llevar a cabo una depuración, para mejorar su calidad. Incluso en algunos casos es posible corregir en los datos los efectos de descalibración de los sensores, aunque ésta es una tarea laboriosa que requiere mucha intervención humana.

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

A pesar de la mejoría que ha habido en cuanto al número de estaciones, es necesario el establecimiento de un número mayor, en sitios elegidos estratégicamente de acuerdo a criterios de evaluación del recurso solar, para asegurar una cobertura suficiente del país.

Es importante incorporar las bases de datos de radiación a Sistemas de Información Geográfica, que ofrezcan a los instaladores, ingenieros y tomadores de decisiones, herramientas diversas relacionadas con el recurso solar. Esto incluiría la evaluación de las diferentes componentes de la radiación solar para cualquier sitio del país, a partir de modelos bien calibrados respecto a estos datos. También se deben incluir herramientas que permitan estimar el rendimiento de diferentes tipos de colectores según su ubicación, orientación y tipo de tecnología. Este tipo de herramientas ya se han desarrollado en otros países y constituyen un factor decisivo para el impulso a las energías renovables, al dar un grado mucho mayor de certidumbre a la toma de decisiones. En particular, estas herramientas permiten la evaluación con un grado mucho mayor de certidumbre de la viabilidad económica de proyectos de energía solar, facilitando el proceso de su financiación.

Agradecimientos

Los autores reconocen el apoyo brindado por el Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar (CIE-UNAM) en la recopilación de información.

Referencias

- Almanza Salgado, R., Estrada-Cajigal Ramírez, V., Barrientos Avila, J. (1992). Actualización de los Mapas de Irradiación Global Solar en la República Mexicana. Series del Instituto de Ingeniería No. 543. Instituto de Ingeniería, UNAM, México (ISSN 0185-2345).
- Beyer, H. G., Costanzo, C., Heinemann, D. (1996). Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy*, vol. 56, pp. 207-212.
- Bird, R. E., Riordan, C. (1986). Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted plates at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 25, pp. 87-97.
- Estrada-Cajigal, V. (1992). Datos de Radiación Solar en la República Mexicana, alcances y limitaciones. *La Revista Solar*, No. 21, pp. 10-19.
- Fernández Zayas, J. L., Estrada-Cajigal, V. (1983). Cálculo de la Radiación Solar Instantánea en la República Mexicana. Series del Instituto de Ingeniería No. 472, Instituto de Ingeniería, UNAM, México (ISSN 0185-2345).
- Galindo, I., Castro, S., Valdés, M. (1991). Satellite derived solar irradiance over Mexico. *Atmósfera*, vol. 4, pp. 169-201.
- Galindo, I., Valdés, M. (1992). México, Atlas de Radiación Solar. Programa Universitario de Energía, UNAM, México.

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

- Galindo Estrada, I., Cifuentes Nava, G. (1996). Radiación Solar Global en la Republica Mexicana: Valores Horarios Medios. Programa Universitario de Energía, UNAM, México (ISBN 968-36-5446-0).
- Galindo, I., Chávez, A. (1977). Estudio del clima solar en la república mexicana I. Radiación solar total. Instituto de Geofísica, UNAM y Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional, México.
- Hernández, E., Tejeda, A., Reyes, S. (1991). Atlas Solar de la República Mexicana. Universidad de Colima, Universidad Veracruzana, México (ISBN 968-834-230-0).
- Iqbal, M. (1983). An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, Toronto (ISBN 012-373752-4).
- Liu, B. Y. H., Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, vol. 4, pp. 1-19.
- Maxwell, E. M., George, R. L., Wilcox, S. M. (1998). A climatological solar radiation model. Proceedings of The ASES 1998, Annual Conference. American Solar Energy Society. pp. 505-510.
- Muhlia, A. (1990). Algo de Historia de la Solarimetría en México. II Taller de Radiación Solar, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Palmira Morelos, 23 al 25 de mayo de 1990. pp 21-25.
- NASA (2005). Sitio de internet "Surface meteorology and Solar Energy" (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>) del Earth Science Enterprise Program de la NASA, Estados Unidos.
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., Vignola, F. (2002). A new operational model for satellite derived irradiances: description and validation. *Solar Energy*, vol. 73, pp. 307-317.
- Perez, R., Aguiar, R., Collares-Pereira, M., Dumortier, D., Estrada-Cajigal, V., Gueymard C., Ineichen, P., Littlefair, P., Lund, H., Michalsky, J., Olseth, J. A., Renné, D., Rymes, M., Skartveit, A., Vignola F., Zelenka, A. (2001). Solar Resource Assessment: A Review. In J. Gordon (editor), *Solar Energy, the State of the Art*. James & James, Londres (ISBN 1-902916-23-9), pp. 497-575.
- Quiñones Aguilar, J. J., Arancibia Bulnes, C. A., Estrada, C. A. (2002). Análisis de datos de radiación solar global y temperatura ambiente en Temixco, Morelos. Memorias de la XXVI Semana Nacional de Energía Solar, Asociación Nacional de Energía Solar, México, pp. 579-573.
- Renné, D., George, R., Brady, L., Marion, B., Estrada-Cajigal, V., (2000). Estimating Solar Resources in México Using Cloud Cover Data. In C. A. Estrada (editor), *Proceedings of the ISES Millennium Solar Forum 2000*. Asociación Nacional de Energía Solar, México (ISBN 968-5219-01-X), pp. 627-632.
- Renné, D. S., Perez, R., Zelenka, A., Whitlock, C. (1999). Use of weather and climate research satellites for estimating solar resources. In Y. D. Goswami, K. W. Böer (editors), *Advances in Solar Energy*, Vol. 13. American Solar Energy Society, Boulder, Colorado (ISBN 0-89553-256-5). Chapter 5, pp. 171-239.
- Valdés, M., Bonifaz, R., Galindo, L. (2001). Base Nacional de Datos de Radiación Solar. En R. J. Dorantes Rodríguez, E. Rincón Mejía, L. E. Hernández, R. Acosta Olea (editores), *Memoria de la XXV Semana Nacional de Energía Solar*. Asociación Nacional de Energía Solar, México (ISBN 968-5219-02-8), pp. 515-516.
- Villa Martínez, H. A., Robles García, S., Cabanillas López, R. E. (2001). Sistema de Acceso, a Través de Internet, a los Datos de la Estación Solarimétrica de la

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16

Universidad de Sonora. En R. J. Dorantes Rodríguez, E. Rincón Mejía, L. E. Hernández, R. Acosta Olea (editores), Memoria de la XXV Semana Nacional de Energía Solar. Asociación Nacional de Energía Solar, México (ISBN 968-5219-02-8), pp. 493-496.

Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., Renné, D. (1999). Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 62, pp. 199-207.

Eliminado: 16

Insertado: 16

Eliminado: 16