

Red Solarimétrica Mexicana.

METODO DE INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE ESTACIONES
SOLARIMÉTRICAS
Y MÉTODO DE OBTENCIÓN DE MAPAS MENSUALES DE IRRADIACIÓN SOLAR

Servicio Solarimétrico Mexicano

Instituto de Geofísica

Universidad Nacional Autónoma de México

Contenido

1. Introducción.....	3
2. Regionalización de la República Mexicana utilizando métodos cuantitativos	4
Método de regionalización	4
Resultados.....	6
3. Sitios propuestos y estaciones seleccionadas.....	8
4. Instalación de estaciones y mantenimiento.....	11
Instalación.....	11
5. Mapas de distribución de Irradiancia Solar.....	13
6. Referencias.....	15

1. Introducción.

La evaluación del recurso solar para su aprovechamiento, es un problema estratégico para la planeación energética a nivel nacional. Existen diferentes metodologías para poder cumplir este objetivo, las cuales van desde la colocación de una red de sensores en superficie, hasta la utilización de imágenes de satélites combinada con modelos de transferencia radiativa.

La medición directa de la radiación solar en superficie a partir de radiómetros, representa el método más confiable de evaluación en un sitio específico, siempre y cuando se sigan los protocolos de medición adecuados para dicha tarea. Sin embargo en diversas ocasiones, resulta difícil proveer el mantenimiento adecuado de este tipo de estaciones e incluso seguir adecuadamente los protocolos de instalación y medición. Por ejemplo, la red de estaciones EMAs (Estación Meteorológica Automática) del Servicio Meteorológico Nacional, es una red extensa que cuenta con casi doscientas estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país. Cada estación cuenta con un piranómetro para la medición de la irradiancia solar global. Sin embargo, las estaciones fueron instaladas para satisfacer requerimientos de medición hidrometeorológicos y no solarimétricos, por esta razón una gran cantidad de estas estaciones no cumplen con los criterios de instalación y mantenimiento que se requieren para una buena medición de la radiación solar.

Por otro lado, la gran variedad de tecnologías existentes para el aprovechamiento de la energía solar, requiere de la medición de un mayor número de parámetros de la radiación solar, adicionales a la irradiancia global. Por ejemplo, los sistemas de concentración de foco puntual requieren de mediciones de irradiancia directa, las aplicaciones de química solar requieren de mediciones de la radiación ultravioleta, y los sistemas solares pasivos requieren de irradiancia solar global y diseños arquitectónicos sustentables suelen requerir de los.

Una estación solarimétrica, que cuente con el suficiente número de radiómetros, sensores y equipamiento necesario para la medición y registro de la información, resulta demasiado costosa para poder financiar una red extensa de estaciones [Valdes-Barrón, et al, 2014] [Riveros-Rosas, et al, 2015]. Por esta razón, es necesario el uso de métodos indirectos como es son la aplicación de modelos de radiación en superficie a partir de imágenes de satélite. Dichos modelos se han aplicado con éxito durante las últimas dos décadas en diversas partes del mundo, permitiendo realizar estimaciones de diversos parámetros de la irradiancia solar y su distribución en superficies extensas con una gran resolución.

Evaluar la precisión de estos modelos requiere de información de referencia en superficie, la cual puede obtener de un número limitado de estaciones solarimétricas de referencia, con el único propósito de evaluar los modelos con imágenes de satélite aplicados a lo largo de todo el país.

Por esta razón se propuso la instalación de una red solarimétrica de referencia con el suficiente número de parámetros para evaluar modelos satelitales de radiación solar en superficie. Dichos

modelos contribuirán en la correcta planeación y diseño de políticas energéticas, así como la instalación de plantas de generación de energía a partir de la radiación solar.

La creación de una red solarimétrica de referencia requiere del análisis de las condiciones geoclimáticas de México para determinar los sitios idóneos para la instalación de las estaciones. El planteamiento de conformación de la red solarimétrica incluye un estudio de regionalización en función de diferentes componentes del medio físico (clima, precipitación, temperatura, etc.), que nos permita identificar zonas del territorio nacional donde la conjugación de los elementos y factores del clima tengan un comportamiento semejante.

El estudio de regionalización, sirvió para la determinación sitios en donde colocar cada una de las estaciones, procurando cubrir todas las zonas climáticas identificadas en el estudio. En cada sitio se consideró el cumplimiento de los requerimientos necesarios para la operación idónea de una estación solarimétrica tal y como se describe en las secciones correspondientes del presente documento.

2. Regionalización de la República Mexicana utilizando métodos cuantitativos

La delimitación de regiones naturales con diferentes propósitos, generalmente tiene el problema de definir bajo algún criterio los límites entre las mismas. Para efectos de proponer un número mínimo pero a la vez óptimo de estaciones para una red básica en superficie, es necesario definir regiones homogéneas para que los puntos seleccionados sean representativos de áreas extensas.

Una manera de eliminar los criterios subjetivos, en la delimitación de regiones, es por medio de métodos cuantitativos a partir de una serie de variables (físicas en este caso). El objetivo es encontrar, bajo un esquema de similitud o diferencias estadísticas, aquellas zonas que son homogéneas y diferenciarlas de las que no lo son. El método (Williams, 2008), puede generar un espectro amplio de regiones que a gran escala producen divisiones ambientales intuitivas (desiertos, bosques, selvas) mientras que regiones a escalas de detalle resaltarán condiciones locales (ecotonos, gradientes, etc.).

Método de regionalización

Se utilizó un método estadístico multivariado de análisis de CLUSTERS propuesto por William Hargrove (2004) en un ambiente de sistemas de información geográfica. El método hace uso del algoritmo ISODATA (“Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique”) que se orienta a definir clases comunes o similares presentes en un conjunto de datos (mapas raster en este caso) de diferentes características.

La entrada al modelo son una serie de mapas de los diferentes elementos y factores físico-geográficos. El método se basa en la correlación múltiple de los diferentes elementos a partir de los cuales se encuentran grupos estadísticamente similares que corresponderán a las diferentes regiones. Se incluyen variables climáticas tales como isotermas, isoyetas, evaporación y humedad (Figura 1).

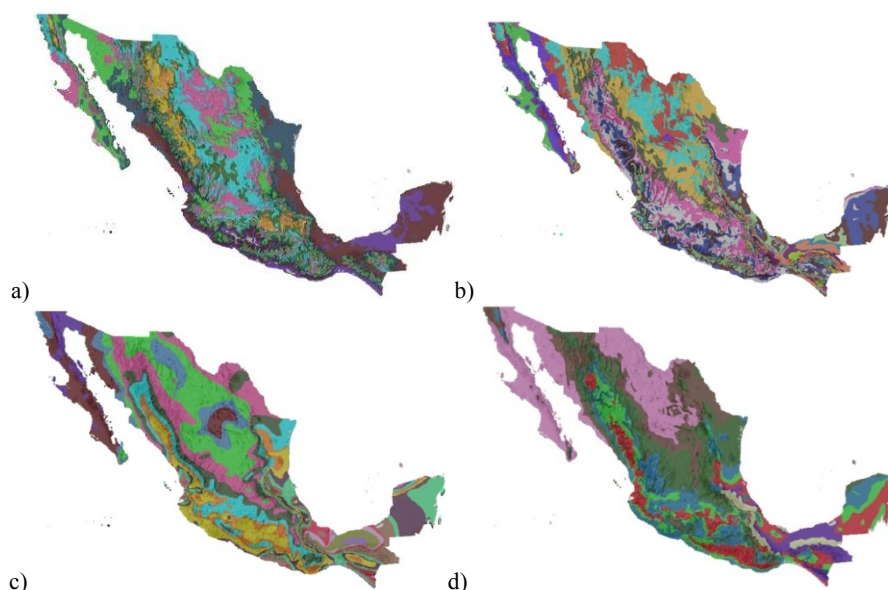


Figura 1 Mapas de: a) isotermas, b) isoyetas, c) evaporación y d) humedad, de la República Mexicana. Fuente: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Una de las ventajas que ofrece este método de clasificación es que no implica ningún conocimiento a priori del área de estudio por parte del usuario, por lo que la intervención humana es centrada en la interpretación más que en la adquisición de los resultados. (Salinero, 2002). En dicho método, se asume que los valores de cada variable formen una serie de agrupaciones, o conglomerados (“clusters”) en base al nivel de correlación o similitud entre ellos. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un comportamiento similar en una serie de clases temáticas.

El procedimiento para definir los agrupamientos temporales es muy similar a otras técnicas de clasificación automática de datos; se basa fundamentalmente en tres parámetros: a) variables que intervienen en el análisis; b) criterio para medir la similitud o distancia entre casos, y c) criterio para agrupar los casos similares. La delimitación de cada grupo se inicia señalando dos criterios: el primero que mida la similitud entre píxeles, y el segundo que marque las condiciones del proceso de agrupamiento (Salinero, 1996). En cuanto al algoritmo de agrupamiento y análisis estadístico de datos ISODATA, consiste de las siguientes fases:

1. Deben ser designados los parámetros que ha de seguir el algoritmo; como el número máximo de clases, la condición de reajuste y convergencia entre clases, condición de fusión y división entre clases, así como las condiciones de término del proceso.
2. Se definen aleatoriamente una serie de centros de clase, de acuerdo a los parámetros indicados por el usuario en la interfaz del programa.
3. Todos los píxeles de la imagen son asignados al centro de clase más próximo, utilizando el criterio de distancia.
4. Los valores de cada centro de clase son recalculados teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se hayan incorporado en la fase anterior.
5. Nuevamente son reordenados los centros de clase en función de los parámetros de control introducidos por el usuario (distancia mínima entre grupos, tamaño mínimo de grupo un grupo, varianza máxima de un grupo y lógicamente el número de grupos).
6. Iterativamente son asignados todos los píxeles de la imagen al centro más cercano, el cual ha sufrido un desplazamiento debido al paso 4; este centro no necesariamente tiene que coincidir con la asignación realizada en el paso 3.
7. Si el número de píxeles que han cambiado de categoría es inferior al señalado por el usuario el proceso termina; en caso contrario, el algoritmo retorna a la fase 4.

En cada iteración el algoritmo verifica que cada parámetro introducido por el usuario se cumpla cabalmente para poder en ese momento interrumpir o no el proceso, por lo cual, este algoritmo parece ser bastante adecuado para delimitar los grupos de valores homogéneos dentro de la imagen, desde un punto de vista estadístico (Tso et al., 2001; C.Salinero, 2002; J.B.Campbell, 2002; K.Arai et al., 2007).

Con la imagen clasificada se realiza un proceso de posclasificación con el propósito de obtener un mapa final que represente una regionalización de la República Mexicana basada criterios climáticos. El principio básico de dicho proceso es la unión de las clases en clases más definidas, tomando como base un criterio de decisión, ya sea a partir de las estadísticas de las imágenes clasificadas, en regiones de interés o basadas en clasificaciones anteriores, así mismo, las clases pueden ser reordenadas de acuerdo a los criterios antes mencionados.

Resultados

Se ejecutó el algoritmo en varias ocasiones cambiando el número final de clases. Dado que se trata de obtener grandes regiones se optó por 10 clases, que se agruparon en 6 clases finales (Figura 2). La clase 1 agrupa los desiertos de la península de Baja California exceptuando la sierra de San Pedro Mártir y la parte sur de la Península, se prolonga hacia la zona del desierto de Altar y la parte norte de la llanura costera de Sonora. Ésta clase se presenta también en algunas partes del desierto de Chihuahua en el Sur Oeste de Coahuila. La clase 2 corresponde a buena parte de los desiertos de la altiplanicie del norte y a la llanura costera de Sonora. La clase 3 se encuentra alrededor de la anterior con algunas prolongaciones hacia la planicie costera de Sinaloa

y la zona árida del sur de México (Tehuacán-Cuicatlán). La clase 4 corresponde fundamentalmente a las regiones montañosas del país y a buena parte de la península de Yucatán. La clase 5 ocupa la depresión del Balsas, la depresión central de Chiapas, una buena parte del centro del país, las costas de Tamaulipas la parte Noreste de la península de Yucatán y partes de las costas del pacífico al sur de Bahía de Banderas. La clase No. 6 se distribuye en las zonas más húmedas del país, donde confluyen varios fenómenos que determinan este comportamiento (ríos, lagunas y circulación atmosférica), ocasionando la presencia de grandes zonas de humedales (manglares, esteros, marismas).

Con fines de una propuesta para el establecimiento de estaciones de medición, se muestran los puntos en la figura 2. A pesar de que existen puntos en regiones que resultaron con condiciones similares, se sugiere el establecimiento de estaciones dada la distribución geográfica de las regiones.



Figura 2. Agrupación de seis regiones finales.

Como se puede observar en la figura No. 2, con 6 clases se obtiene una agrupación de áreas lo suficientemente definidas para considerar la regionalización como aceptable, pero una simple interpretación como esta, puede ocasionar serios errores en el uso de estos resultados. Por ejemplo, la clase No. 4 representada con el color verde, la podemos encontrar en la Sierra Madre Occidental, en el Eje Neo-Volcánico, la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, Sierra Madre de Chiapas y Península de Yucatán, aunque en el modelo numéricamente son regiones iguales, la génesis del resultado de cada una de estas zonas es diferente, por lo que es necesario considerarlas como tal (diferentes).

Algo semejante sucede con la clase No. 5 y en menor medida la No. 2, es importante destacar el comportamiento de la No. 1 y No. 6, las cuales están completamente definidas y solo se presentan en un solo sitio, facilitando considerablemente la ubicación del número de estaciones y la localización de las mismas.

3. Sitios propuestos y estaciones seleccionadas.

Se proponen al menos 10 estaciones para dar una cobertura mínima al país; para la elección del sitio, se deben de considerar el cumplimiento de ciertas condiciones:

- Estar en lo más céntrico de la región, tratar de evitar las zonas de transición entre regiones.
- Ubicar en universidades, centros de educación superior o centros de investigación. - Contar con servicios básicos como vigilancia, electricidad, internet e instalaciones fijas y seguras.
- Condiciones físicas ambientales adecuadas (horizontes despejados y no cerca de montañas), acordes a criterios internacionales definidos por la organización meteorológica mundial, como se describe en la sección de Instalación de estación y mantenimiento.
- Personal especializado para su cuidado y mantenimiento.

El siguiente paso fue el contactar a instituciones que estuvieran interesadas en participar en este proyecto, a nuestra convocatoria respondieron las siguientes instituciones y propusieron los siguientes sitios:

- Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
 - Estación Solarimétrica, Ciudad Juárez, Chihuahua.
 - Sitio en Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua.
 - Sitio en Guerrero Negro, Baja California.
 - Sitio en Monclova, Coahuila.
- Universidad de Sonora.
 - Campo de pruebas de helióstatos, Hermosillo, Sonora.
- Universidad Autónoma de Tamaulipas.
 - Sitio en Nuevo Laredo, Tamaulipas.
 - Sitio en Ciudad Camargo, Tamaulipas.
 - Sitio en la Posta, Tamaulipas.
- Universidad Juárez de Durango.
 - Sitio en Gómez Palacio, Durango.
- Universidad Autónoma de Zacatecas.
 - Estación solarimétrica, Zacatecas, Zacatecas.
- Universidad Autónoma de Nayarit.
 - Sitio en Ixtlán del Rio, Nayarit.
 - Sitio en Santiago Ixcuintla, Nayarit.
 - Sitio en Tepic, Nayarit.
- Universidad de Colima.
 - Sitio en Colima, Colima.
- Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital.
 - Estación solarimétrica en Ixmiquilpan, Hidalgo.
- Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Observatorio de Radiación Solar, Ciudad Universitaria, Ciudad de México.
- Estación Solarimétrica, Orizabita, Hidalgo.
- Sitio en Coeneo, Michoacan.
- Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.
 - Sitio en los Tuxtlas, Veracruz.
 - Sitio en Chamela, Jalisco.
- Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.
 - Estación Solarimétrica, Temixco, Morelos.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas.
 - Estación Solarimétrica, Cuernavaca, Morelos
- Universidad Autónoma de Yucatán.
 - Estación Solarimétrica en Mérida, Yucatán.
- Universidad Autónoma de Quintana Roo.
 - Sitio en Morelos, Quintana Roo.
 - Estación Solarimétrica en Chetumal, Quintana Roo.
- Instituto Tecnológica de Comitan.
 - Sitio en Comitán, Chiapas.

De acuerdo a los lineamientos mencionados anteriormente, no todos los sitios cumplieron con las condiciones básicas para poder ser elegida como un sitio adecuado para la instalación de una estación de la Red Solarimétrica Mexicana.

En la primera ronda se eliminaron los sitios que no cumplían con los requerimientos mínimos, sin la necesidad de llevar a cabo una visita al lugar. Durante la visita de sitio, se evaluaron los lineamientos descritos anteriormente y los lugares que cumplieron con los requerimientos, fueron los elegidos para la instalación de una estación (Tabla 1).

TABLA 1, Estaciones de la Red Solarimétrica Mexicana, ubicación y fecha de instalación

Nombre	Ubicación	Latitud	Longitud	Altitud msnm	Fecha de Instalación
UNAM_01	Ciudad Universitaria	19°19'33.69"N	99°10'33.53"O	2281	11/09/2015
COE_02	Coeneo, Mich	19°48'49.08"N	101°41'40.85"O	1989	28/10/2015
CDC_03	Cuauhtémoc, Chih	28°27'1.83"N	106°47'39.55"O	2113	22/10/2015
ZAC_04	Zacatecas, Zac.	22°46'20.88"N	102°38'37.13"O	2317	17/11/2015
CDJ_06	Cd. Juarez, Chih	31°44'36" N	106°25'54" O	1127	18/11/2015
VEN_06	Gómez Palacio, Dgo	23°57'24.65"N	104°34'13.40"O	1877	19/11/2015
IXM_07	Ixmiquilpan, Hgo.	20°29'43.49"N	99°10'51.39"O	1761	14/02/2016
TEP_08	Tepic, Nay	21°29'29.64"N	104°53'40.75"O	959	16/03/2016
GRN_09	Guerrero Negro, BCS.	28° 2'15.91"N	113°58'43.38"O	31	14/04/2016
NVL_11	Nuevo Laredo, Tam.	27°27'9.61"N	99°31'6.37"O	128	30/03/2016
MOR_12	Morelos, QRoo	19°45'42.07"N	88°42'30.74"O	17	11/01/2017
FRC_13	Selegua, Chis.	16° 9'46.48"N	92° 4'38.84"O	1562	12/11/2017
MER_14	Mérida	20°59'18.14"N	89°44'14.08"O	11	
HER_15	Hermosillo	29° 1'32.98"N	111° 8'58.93"O	410	27/06/2017

Por otra parte, en las diferentes universidades que participaron, algunas de ellas propusieron sus estaciones solarimétricas, las cuales al menos miden el parámetro de radiación solar global. El problema de algunas, es que su ubicación no es la mejor de acuerdo a la regionalización obtenida:

Pero si la información que generan es complementada con al menos 3 parámetros radiacionales (radiación solar global, radiación solar difusa y radiación solar directa), son sitios auxiliares de gran importancia, por lo que se decidió que el equipo que no entregado a estaciones que ya lo tuvieran (Por ejemplo Zacatecas y Mérida), sirvieran para complementar estas estaciones con el equipo mínimo para formar parte de la red. De esta manera quedaron definidas 6 estaciones auxiliares a las 13 previamente identificadas, y 2 más en proceso:

- Ciudad Juárez, Chi.
- Temixco, Mor.
- La Primavera, Jalisco.
- Los Humeros, Puebla.
- La Venta, Oaxaca.
- Chetumal, Quintana Roo.
- Colima, Colima (en proceso).
- Tehuacán, Puebla (en proceso).

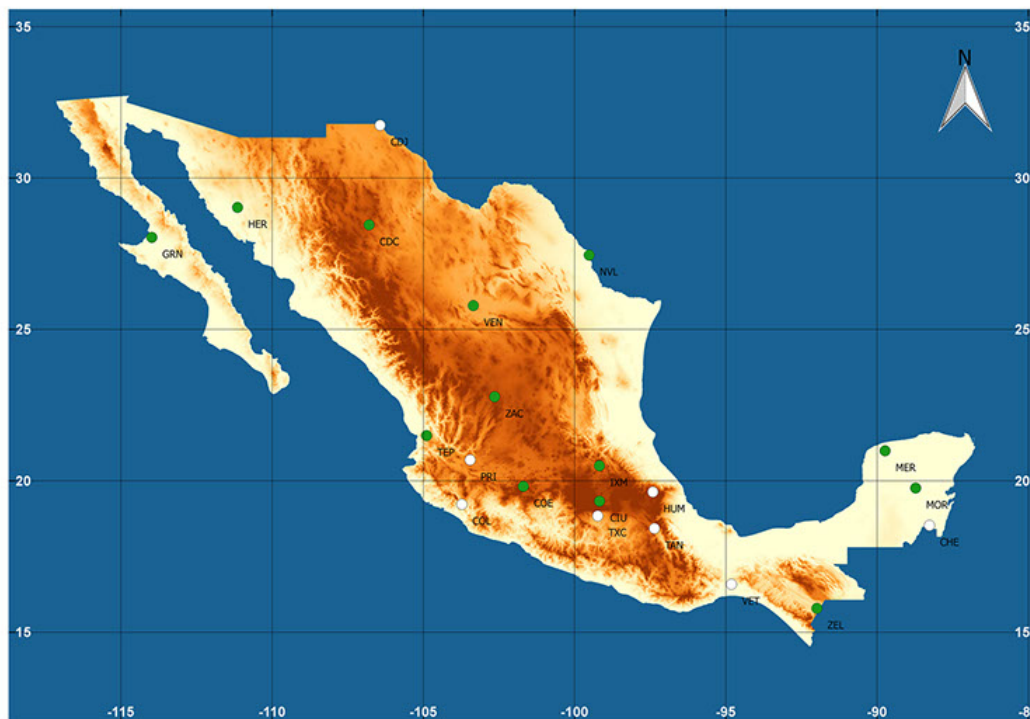


Figura No. 3 Estaciones de la red solarimétrica Mexicana (puntos verdes) y estaciones auxiliares (puntos blancos)

4. Instalación de estaciones y mantenimiento

Instalación

El manual de procedimientos de medición de la Organización Meteorológica Mundial [WMO, 2008] establece las características que los sitios para instalación de sensores de radiación solar deben cumplir:

- El sitio seleccionado debe estar libre de cualquier obstrucción por encima del plano horizontal del elemento sensor de los radiómetros. En caso de que esto no sea posible, el sitio debe seleccionarse en un lugar tan libre de obstrucciones como sea posible.
- Las obstrucciones dentro del rango de ángulo acimutal del alba y el ocaso no deben exceder los 5° de elevación. Para otro tipo de obstrucciones el ángulo sólido que sustentan no deben exceder el valor de 0.5 sr
- Los sensores no deben colocarse cercanos a muros de colores claros o brillantes ni cercanos a ningún objeto que pueda reflejar la radiación solar sobre el sensor.
- En las bases de instalación debe cuidarse la accesibilidad a los instrumentos para que puedan ser inspeccionados diariamente preferentemente tantas veces como sea posible.

En base a los criterios anteriores, se verificó que cada sitio de instalación cumpliera con dichas características. Los sitios se ubicaron preferentemente en instituciones académicas que tuvieran no solamente la infraestructura y personal calificado, para el mantenimiento de la estación, se consideró el interés potencial, de utilizar la información generada, por el personal académico de la institución receptora. Para la instalación de los sensores, se diseñó una plataforma de instrumentación de 5x1 metros, orientada en la dirección norte-sur, en cuya superficie se colocaron los sensores (figura 4a) y se consideró un espacio para el seguidor solar automático con los sensores de radiación directa y difusa. En la colocación de los sensores se cuidó la no obstrucción de los diferentes radiómetros entre ellos (figura 4b).



(a)



(b)

Figura No. 4 Plataforma de instalación de los radiómetros solares (a) Estación de Coeneo. (b) Estación de Zacatecas

Los parámetros solares y el equipamiento utilizado, en prácticamente todas las estaciones, se resumen en la tabla 2

TABLA 2, Parámetros solares medidos en estaciones de la Red Solrimétrica Mexicana

Parámetros	Instrumento	Modelo y Marca
Irradiancia Global	Piranómetro	CMP11 Kipp&Zone
Irradiancia Difusa**	Piranómetro	CMP11 Kipp&Zone
Irradiancia Global reflejada*	Piranómetro	CMP11 Kipp&Zone
Irradiancia global inclinada latitud	Piranómetro	CMP11 Kipp&Zone
Irradiancia Normal Directa**	Pirheliómetro	CHP1 Kipp&Zone
Onda larga descendente**	Pirgeómetro	CGR4 Kipp&Zone
Onda larga ascendente*	Pirgeómetro	CGR4 Kipp&Zone
Radiación fotosintéticamente activa	Quantum sensor	PQS1 Licor
Iluminancia global	Fotómetro	LI-210 Licor
Iluminancia Difusa**	Fotómetro	LI-210 Licor
Radiación UVB	Biómetro	501A Solar Light

* Estos parámetros solo se miden en las estaciones de Selegua, Gómez Palacio, Guerrero Negro y Coeneo

** Sensores montados en un seguidor solar automático Solys2 de Kipp&Zone

El programa de adquisición esta implementado en un adquisidor Campbell® CR3000 junto con un multiplexor AM16/32B. El programa realiza un muestreo de sus canales cada 3 segundos y registra el promedio de estos minuto a minuto. El programa realiza un chequeo y corrección de parámetros en tiempo real, al calcular la corrección por temperatura de la irradiancia global mediante los valores medidos del pirgeómetro y también calcula la irradiancia global a partir de la irradiancia difusa y la normal directa, como una primera validación de la congruencia de estos tres parámetros.

Los datos meteorológicos de viento, temperatura, humedad, presión y precipitación son también registrados en promedio minuto a minuto. El resumen de los sensores se reporta en la tabla 3.

TABLA 3. Parámetros meteorológicos medidos en cada estación

Equipo	Parámetro	Marca	Modelo
estación meteorológica	Velocidad y dirección de viento	Gill Instruments	Ultrasinic Wind
	Humedad, temperatura ambiente	---	HC2S3
	Presión barométrica		Setra 278
	Pluviómetro		TE525MM

5. Mapas de distribución de Irradiancia Solar

La estimación del recurso solar en superficie, a lo largo de todo el territorio nacional, requiere de una alta densidad de puntos de medición solarimétricos para la correcta evaluación en cualquier punto de interés. La posibilidad de contar con una red de estaciones solarimétricas de superficie para cubrir el país, como se ha explicado anteriormente, es inviable. Por esta razón la conformación del Inventario Nacional de Energías renovables requiere del uso de modelos que permitan obtener, con la mejor precisión posible, la distribución de irradiación solar en todo el país. En particular los modelos basados en imágenes satelitales permiten una estimación espacial y temporal en todo el territorio. Existen diversos modelos aplicados con éxito hasta la fecha (Maxwell et al, 1998), (Perez et al, 2002) (Rigollier et al, 2004) con resultados que han podido ser contrastados con medidas en superficie en diferentes partes del mundo (Njomo and Wald, 2007) (Eissa et al, 2012). En particular el modelo Heliosat 2 (Rigollier, et al, 2004) es un modelo físico bien documentado, con programas accesibles para descarga y adecuado para su implementación en México. Este modelo está basado en la obtención de índices de nubosidad a partir de imágenes de satélite. El modelo Heliosat 2, parte de un modelo físico que permite calcular el índice de nubosidad a partir de los datos de radiancia del satélite obtenidas del canal visible de GOES. El índice de nubosidad representa el porcentaje de cobertura nubosa de cada pixel de la imagen. El valor cero representa un cielo sin nubes, mientras que un valor de 1 representa un cielo totalmente cubierto de nubes (Figura 5).

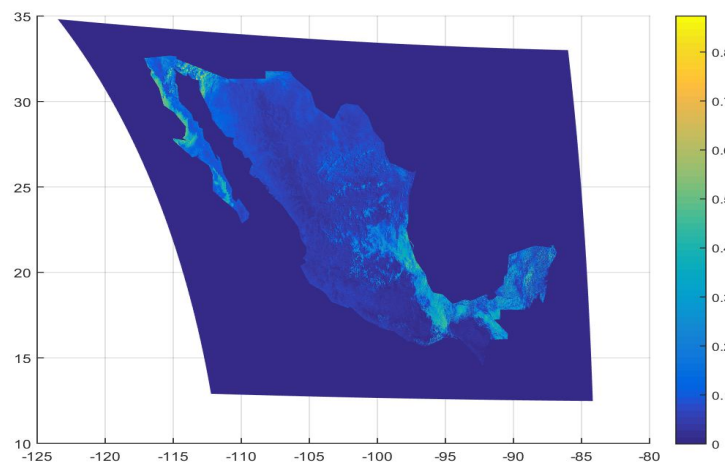


Figura 5. Ejemplo de valores del índice de nubosidad, a partir del modelo Heliosat 2, obtenidos de un corte de la imagen del satélite GOES

El modelo Heliosat 2 utiliza un modelo de cielo claro para evitar el ajuste empírico de parámetros a partir de mediciones en superficie. Se utilizó el modelo de ESRA (Rigollier et al, 2000). Este modelo utiliza una expresión general para el cálculo de extinción de la radiación solar que depende de la posición y altitud geográfica y del índice de turbidez de Linke para una masa de aire relativa igual a 2. Este último parámetro engloba todos los mecanismos de extinción de la radiación solar en la atmósfera.

A partir de los valores de índices de nubosidad de cada pixel, en una imagen específica, puede realizarse el cálculo del índice de cielo claro, que representa la porción de radiación solar que alcanza la superficie respecto a un cielo despejado. La irradiancia de cada pixel es proporcional al índice de cielo claro y a la irradiancia de cielo sin nubes (Figura 6).

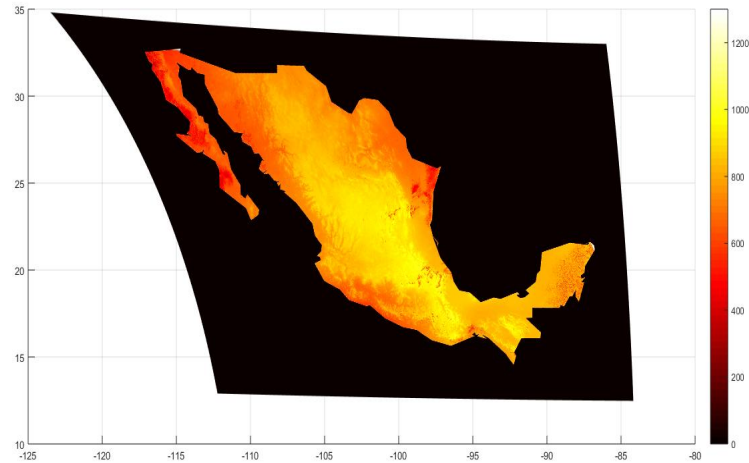


Figura 6. Ejemplo de valores de la irradiancia en W/m^2 , a partir del modelo Heliosat 2, obtenidos de un corte de la imagen del satélite GOES

Las rutinas del programa Heliosat 2 fueron implementadas en MATLAB. Los valores de turbidez atmosférica para todo el país se obtuvieron de la base de datos de SODA (<http://www.soda-pro.com/>). El diagrama de flujo de las rutinas implementadas se muestra en la figura 7.

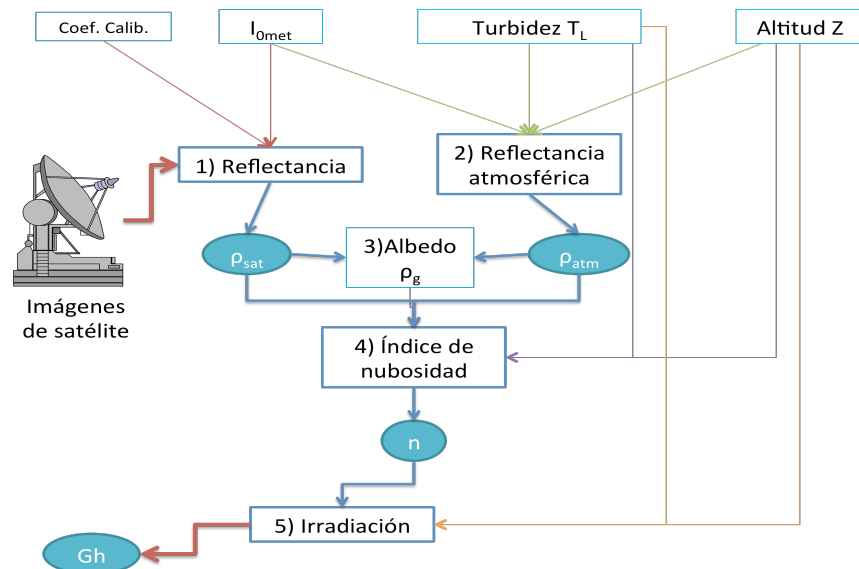


Figura 7. Diagrama de flujo del modelo Heliosat 2 implementado para determinar la Irradiación en superficie de la republica mexicana.

Los Resultados del modelo Heliosat 2, así como los obtenidos por los modelos de cielo claro utilizados, son motivo de investigación actual para su evaluación y desarrollos posteriores, así como para su comparación para otros modelos implementados en la republica mexicana.

6. Referencias

Arai K.y Xian Q.B., 28-4-2007. ISODATA Clustering With Parameter (Threshold for Merge and Split) Estimation Based on GA: Genetic Algorithm. Reports of the Faculty of Science and Engineering. Volumen36. Pags.17-23.

Campbell J.B., 1-1-2002. Introduction to Remote Sensing. Volumen3th.

Gueymard, C., 2004. High performance model for clear sky irradiance and illuminance. ASES Conference.

Hargrove, William W, and Forrest M Hoffman. 2004. "Potential of multivariate quantitative methods for delineation and visualization of ecoregions." *Environmental management* 34 Suppl 1 (January): S39-60. doi:10.1007/s00267-003-1084-0.

Ineichen, P., Perez, R., 2002. A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy* 73 (3), 151–157.

E. L. Maxwell, R.L. George, S.M. Wilcox. A climatological solar radiation model. Proceedings of th 1998 American Solar Energy Society Annual Conference. Albuquerque, NM, June 14-17, 1998

D. Njomo, L. Wald. Solar irradiation retrieval in Cameroon from Meteosat satellite imagery using the Heliosat-2 method. *ISESCO Science and Technology Vision*, 2007, 2 (1), pp.19-24.

Richard Perez, Pierre Ineichen, Kathy Moore, Marek Kmiecik, Cyril Chain, Ray George and Frank Vignola. A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy* Vol. 73, No. 5, pp. 307–317, 2002

C. Rigollier, M. Lefèvre, L. Wald. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy* 77 (2004) 159–169

Riveros-Rosas D., Arancibia-Bulnes C.A., Bonifaz R., Medina M.A., Peón R., Valdés M. Analysis of a solarimetric database for Mexico and comparison with the CSR Model, *Renewable Energy* 75, (2015) 21-29

Salinero C. 1-5-2002. Teledetección Ambiental, La Observación De La Tierra Desde El Espacio. Volumen1th.

Tso B.y Paul M.M., 1-1-2001. Classification Methods for Remotely Sensed Data. Volumen1th. Pags.1-332.

M. Valdés-Barrón, D. Riveros-Rosas, C.A. Arancibia-Bulnes, R. Bonifaz, "The Solar Resource Assessment in Mexico: State of Art", *Energy Procedia* 57, (2014) 1299-1308.

Williams, C, W Hargrove, M Liebman, and D James. 2008. "Agro-ecoregionalization of Iowa using multivariate geographical clustering." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 123 (1-3) (January): 161-174. doi:10.1016/j.agee.2007.06.006.

World Meteorological Organization, "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation" WMO-No. 8, WMO, Seventh edition, 2008. ISBN 978-92-63-10008-5

Yehia Eissa, Matteo Chiesa, Hosni Ghedira. Assessment and recalibration of the Heliosat-2 method in global horizontal irradiance modeling over the desert environment of the UAE. *Solar Energy*, Volume 86, Issue 6, June 2012, Pages 1816-1825