



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**“ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR A PARTIR DE IMÁGENES
DE SATÉLITE USANDO EL MÉTODO HELIOSAT 2”**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

MARÍA ELENA SÁNCHEZ DÍAZ

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. VÍCTOR MANUEL VELASCO HERRERA
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx, junio 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mi madre: Gracias por ser la mejor en todo, por apoyarme en cada decisión aún por más loca que pueda parecer, por siempre estar en todos los momentos, por hacer de mí la persona que soy, por siempre guiarme, gracias por todo.

A mi padre: Gracias por ser el mejor maestro de vida, por enseñarme desde leer hasta derivar e integrar, por estar al pendiente de mí cada día.

A mis hermanos Héctor y Eduardo: Gracias por ser los mejores compañeros de vida que alguien puede tener, por las mejores pláticas y risas, por estar conmigo en el camino.

Esto como cada paso que de siempre será por y para ustedes.

Agradecimientos

Al Dr. Víctor Manuel Velasco, por darme la oportunidad de trabajar con él y guiarme día con día en mi trabajo.

Al Dr. Mauro Valdez, Dr. David Riveros, Dr. Roberto Bonifaz por cada uno de sus consejos y observaciones.

Al instituto de Geofísica de la UNAM por dejarme ser parte de la mejor universidad de este país.

Índice

Índice de figuras	V
Índice de ecuaciones	VI
Índice de mapas	VII
Índice de tablas	IX
Índice de Gráficas	X
Planteamiento del problema	1
Justificación	1
Hipótesis	2
Objetivos	3
1 Antecedentes	3
1.1.1 Constante solar	4
1.1.2 Variación de la radiación extraterrestre	5
1.1.3 Declinación solar	7
1.1.4 Tiempo solar	8
1.2 Otras definiciones	9
1.2.1 Irradiancia	9
1.2.2 Irradiación	9
1.2.3 Insolación	9
1.2.4 Masa de aire	9
1.3 Determinación de la radiación solar diaria	10
1.4 Resolución de los datos	10
1.4.1 Tipos de sensores	10
1.4.2 Satélite geoestacionario	11
1.4.2 Satélites GOES	12
1.5 Estaciones Meteorológicas Automáticas	13
1.5.1 Sensores que integran la estación	14
2 Materiales y métodos	14
2.1 Calibración de imágenes	15
2.2 Descripción del método	17

2.2.1	Componente directa	19
2.2.2	Componente difusa	20
2.2.3	.Albedo del suelo	21
2.2.4	Albedo de las nubes	22
2.2.5	Modelo de cielo claro de ESRA	23
2.2.6	Índice de nubes	23
2.2.7	Cálculo de irradiación diaria	24
2.2.8	Relación entre el índice de nubes e irradiación global superficial	25
2.2.9	Heliosat 1	26
2.2.10	Diferencias entre Heliosat 1 y Heliosat 2	27
3	Resultados	28
3.1	Calibración de imágenes	28
3.2	Determinación del albedo del suelo	29
3.3	Índice de nubes	30
3.4	Constante solar	32
3.5	Irradiación solar	33
4	Análisis	39
4.1	Comparación Heliosat 1 y Heliosat 2	51
5	Conclusión	53
	Simbología	55
	Bibliografía	57
	Anexo 1: gráficas de regresión lineal	60

Índice de figuras

Fig. 1 Relación entre la tierra y el sol (Duffie J., Beckman W., 2013) -----	4
Fig. 2 Curva de irradiancia espectral con una distancia media de la tierra y el sol, según el Centro de Radiación Mundial (WRC, por sus siglas en inglés) (Duffie J., Beckman W., 2013) -----	5
Fig. 3 Variación de la radiación solar extraterrestre en un año (Duffie J., Beckman W., 2013) -----	6
Fig. 4 Esfera celestial que muestra el camino aparente del sol y al ángulo de declinación del sol (Iqbal M., 1980) -----	7
Fig. 5 Variación anual de la radiación solar en un año (Iqbal M., 1983) -----	9
Fig. 6 Cobertura y posición de diferentes satélites geoestacionarios (Tiempo.com, 2013).-----	12
Fig.7 Muestra cómo se vería el satélite con respecto a la tierra (portal de internet “características de los satélites geoestacionarios y otras cosas)-----	13
Fig. 8 Esquema de una de las EMAS (https://smn.cna.gob.mx/es/emas)-----	14
Fig. 9 Esquema del modelo Heliosat 2 (Lefèvre M., Albuisson L., 2002).-----	17
Fig.10 Relación entre el índice de cielo claro y el índice de nubes (Lefèvre M., 2014)-	25
Fig. 11 Esquema de la metodología de Heliosat 1 (Diabaté, L. G. (1989) -----	26

Índice de ecuaciones

Ecuación 1	6
Ecuación 2	6
Ecuación 3	8
Ecuación 4	10
Ecuación 5	15
Ecuación 6	16
Ecuación 7	17
Ecuación 8	19
Ecuación 9	20
Ecuación 10	20
Ecuación 11	21
Ecuación 12	22
Ecuación 13	22
Ecuación 14	22
Ecuación 15	22
Ecuación 16	23
Ecuación 17	23
Ecuación 18	23
Ecuación 19	24
Ecuación 20	25

Índice de mapas

Mapa 1. Imagen satelital que muestra la parte del territorio de México para el día 98, hora 14:15. -----	28
Mapa 2. Mapa de México con calibración basada en el modelo Heliosat 2, para el día 98, hora 14:15 -----	28
Mapa 3. Imagen satelital que muestra la parte del territorio de México para el día 98, hora 14:15. -----	28
Mapa 4. Mapa de México con calibración basada en el modelo Heliosat 2, para el día 111, hora 14:15 -----	28
Mapa 5. Mapa de México para el día 350 del año 2013, nos muestra los valores en W/m^2 del primer mínimo del albedo terrestre -----	29
Mapa 6. Mapa de México para el día 350 del año 2013, nos muestra los valores en W/m^2 del segundo mínimo del albedo terrestre -----	30
Mapa 7. Mapa que nos muestra el índice de nubes para el territorio de México en el día 98 hora 10:15 -----	30
Mapa 8. Mapa que nos muestra el índice de nubes para el territorio de México en el día 110 hora 10:15 -----	30
Mapa 9. Mapa que nos muestra el índice de nubes para el territorio de México en el día 111 hora 10:15 -----	30
Mapa 10. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para enero 2013 -----	34
Mapa 11. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para febrero 2013 -----	34
Mapa 12. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para marzo 2013-----	35
Mapa 13. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para abril 2013 -----	35
Mapa 14. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para mayo 2013-----	36

Mapa 15. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para julio 2013----- 36

Mapa 16. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para agosto 2013----- 37

Mapa 17. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para septiembre 2013----- 37

Mapa 18. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para octubre 2013----- 38

Mapa 19. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para noviembre 2013----- 38

Mapa 20. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para diciembre 2013----- 39

Mapa 21. El mapa nos muestra la ubicación de las EMAS usadas para la validación de datos----- 40

Índice de tablas

Tabla1 de coeficientes de calibración para el canal visible de GOES 13 tomado del portal http://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/calibration/goes-vis-ch-calibration_ -----	16
Tabla 2. La tabla nos muestra un ejemplo de la constante de radiación solar diaria usada.- -----	--33
Tabla 3. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de enero del año 2013. -----	41
Tabla 4. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de febrero del año 2013. -----	42
Tabla 5. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de marzo del año 2013. -----	43
Tabla 6. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de abril del año 2013. -----	44
Tabla 7. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de mayo del año 2013. -----	45
Tabla 8. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de julio del año 2013. -----	46
Tabla 9. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de agosto del año 2013.-----	47
Tabla 10. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de septiembre del año 2013.-----	48
Tabla 11. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de octubre del año 2013.-----	49
Tabla 12. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de noviembre del año 2013.-----	50
Tabla 13. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de diciembre del año 2013. -----	51
Tabla 14. Diferencia Heliosat 1 y Heliosat 2 para el mes de enero del año 2013-----	52
Tabla 15. Diferencia entre Heliosat 1 y Heliosat 2 para el mes de agosto de 2013. --	53

Índice de gráficas

Gráfica 1. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de enero del año 2013. -----	41
Gráfica 2. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de febrero del año 2013. -----	42
Gráfica 3. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de marzo del año 2013. 48 -----	43
Gráfica 4. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de abril del año 2013. -----	44
Gráfica 5. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de julio del año 2013. -----	45
Gráfica 6. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de agosto del año 2013.-----	46
Gráfica 7. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de septiembre del año 2013.-----	47
Gráfica 8. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de octubre del año 2013.-----	48
Gráfica 9. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de noviembre del año 2013.-----	49
Gráfica 10. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de diciembre del año 2013 -----	51
Gráfica 11. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y Heliosat 1 para el mes de enero del año 2013 -----	52
Gráfica 12. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y Heliosat 1 para el mes de agosto del año 2013-----	53

Planteamiento del problema:

En México se tienen instaladas 189 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) a cargo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en toda la república mexicana, las cuales miden la radiación solar entre otras variables generando un archivo de datos cada diez minutos y enviado la información cada 1 o 3 horas, dichas estaciones solo tienen en el mejor de los casos una confiabilidad de 5 km de radio exceptuando los terrenos montañosos. Lo anterior está publicado en el portal de internet del SMN hasta noviembre de 2018, sin embargo esta red no cumple con los estándares requeridos para la correcta medición de la radiación solar y al no tener mantenimiento adecuado el uso de estos datos es en la mayoría de los casos inviable (Riveros-Rosas et al, 2015). Tener suficientes estaciones que cubran todo el territorio, así como el constante mantenimiento de dichas estaciones resulta en un costo muy elevado, recurriendo así frecuentemente a métodos como interpolación y extrapolación.

Actualmente se cuenta con una red solarimétrica a cargo del Servicio Solarimétrico Mexicano del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la cual servirá como punto de comparación para trabajos futuros (González-Cabrera et al, 2018).

Por otro lado en el año 2016 se realizó una estimación previa de radiación con imágenes de satélite usando el modelo Heliosat 1 para el mes de mayo y agosto de 2013, con el cual se obtuvieron buenos resultados, pero al tener ciertas limitaciones de cantidad de imágenes satelitales y calidad de datos en las estaciones en superficie, se busca con esta nueva modificación del método tener una estimación más certera.

Justificación:

La energía solar es una fuente de energía primaria para todo el planeta, así como de gran importancia en las energías renovables ya que la encontramos de forma gratuita e ilimitada en todo México, aunque en diferentes cantidades. Para el mejor entendimiento de la cantidad de radiación solar, cómo es que esta llega al suelo en todo el territorio mexicano y así poder desarrollar el mejor método de uso, es necesario contar con mapas

de su distribución, hacerlo con imágenes satelitales resulta un método muy eficaz y económico.

La energía solar además de la energía renovable desempeña un papel muy importante en otras áreas como la oceanográfica, clima, producción de electricidad, agricultura, ecología y calidad del aire (Lefèvre M. *et al.*, 2014).

Por esta razón se busca obtener una estimación del recurso solar en la superficie nacional y para esto es necesario contar con nuevos algoritmos aplicados a imágenes satelitales.

Este trabajo utiliza el modelo Heliosat-2 para obtener mapas del promedio diario mensual de la radiación solar, que resulta ser un método de bajo costo en comparación con la implementación de estaciones de medición de la radiación solar en superficie.

Resumen

El método Heliosat-2 surge como la evolución del modelo Heliosat-1, este sigue la misma filosofía que su predecesor, aunque al ser un nuevo modelo introduce algunas mejoras que se agrupan del siguiente modo:

- Adopción de un modelo de cielo claro
- Uso de las radiancias medidas y de coeficientes de calibración del sensor del satélite.
- Propone una nueva formulación para el cálculo de los albedos.
- Modifica la relación entre irradiancia horizontal y el coeficiente de cobertura nubosa.

Tras el estudio de distintos modelos de cielo claro, el que es finalmente utilizado en el método Heliosat-2 es el propuesto en el 4th *European Solar Radiation Atlas* (ESRA). Este modelo introduce parámetros descriptivos de calidad atmosférica en cada píxel a través del factor de turbidez de Linke, (Olcoz A. Solano M. 2014).

Se procesaron 2142 imágenes satelitales para cubrir 306 días del año 2013 y se obtuvieron así 11 mapas de un promedio diario mensual de radiación solar, los cuales fueron comparados con algunas Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) para poder hacer válidos los datos obtenidos, en un promedio anual la diferencia de estimación de radiación solar se da en alrededor 80 Wh/m^2 teniendo una mejora como se puede

observar en comparación con los resultados del modelo Heliosat-1 que era de alrededor de $100 \text{Wh}/\text{m}^2$.

Hipótesis

Los valores estimados de la radiación solar en la superficie por medio de imágenes satelitales tendrán diferencias con los valores registrados en estaciones de la superficie, dichas diferencias son provocadas entre otras causas por los efectos atmosféricos, como la composición de la atmósfera, las nubes, los aerosoles etc., provocando así reflexión, refracción y difracción de la radiación solar que no se podrá estimar a partir del modelo. Otro factor importante es la topografía de la superficie, ya que influirá en la cantidad de radiación que llegará a cada punto por orientaciones diferentes.

Con el cálculo físico de los diferentes albedos y la metodología de Heliosat 2 se podrá obtener un valor de irradiancia muy cercano al que se podría medir con sensores de radiación solar en superficie (piranómetros).

El modelo Heliosat 2 es una metodología con buenos resultados por lo que los mapas tendrán calidad para ser usados en ámbitos de energías renovables y otros.

Objetivo:

Implementar los métodos del algoritmo Heliosat 2 para estimar la radiación solar en el año 2013 en los Estados Unidos Mexicanos, por medio de imágenes satelitales GOES-13.

1 Antecedentes

1.1.1 La constante solar

La excentricidad de la órbita de la Tierra es tal que la distancia entre el Sol y nuestro planeta, varía en un 1.7%. La distancia media del sol y la tierra es de $1.495 \times 10^{11} \text{ m}$ donde el sol subtende un ángulo de 32° . La radiación emitida por el sol y su relación espacial con la tierra da como resultado una intensidad casi fija de radiación solar fuera de la atmósfera terrestre (Duffie J., Beckman W., 2013).

La constante solar es la energía del sol recibida por unidad de tiempo en un área unitaria de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a una distancia media entre el sol y la tierra fuera de la atmósfera (Duffie J., Beckman W., 2013).

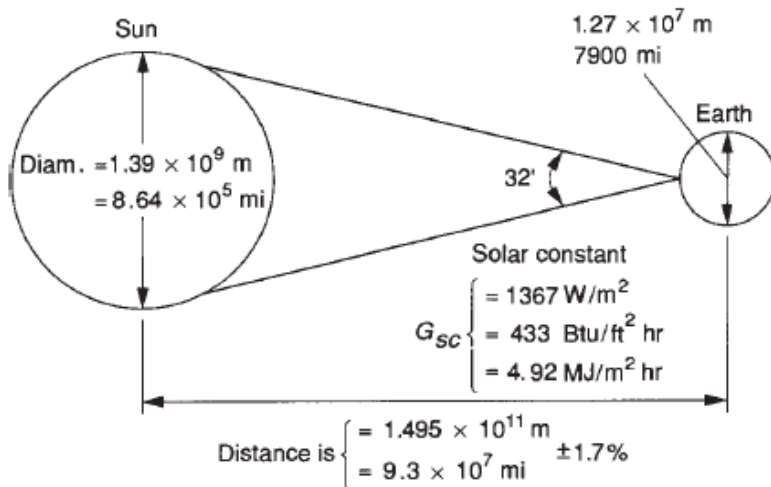


Fig. 1 Relación entre la tierra y el sol (Duffie J., Beckman W., 2013).

La constante solar se construye a partir de una serie de tiempo compuesta de irradiación solar total (TSI por sus siglas en inglés).

Las series de tiempo HF, ACRIM I, II, III y los radiómetros de VIRGO se utilizan para el compuesto de la irradiación solar total. Uno de estos compuestos de irradiación solar total es el llamado PMDO, que introduce correcciones de efectos no considerables en los datos originales del análisis.

El compuesto PMDO esta referenciado con el radiómetro VIRGO, y la última estimación que se tuvo es de 1359.66 +/- 2.47 que tiene una incertidumbre mucho menor a los valores mostrados anteriormente y hasta 2012 que fue publicado dicho valor (Claus Frohlich, 2012), aunque este valor promediado no afecta el cálculo de los valores de irradiancia mostrados en este trabajo ya que se usó el valor diario dado por PMDO.

Se compiló una curva de irradiancia espectral estándar, como se puede observar en la figura 2, basada en mediciones a gran altitud y espacio (Duffie J., Beckman W., 2013).

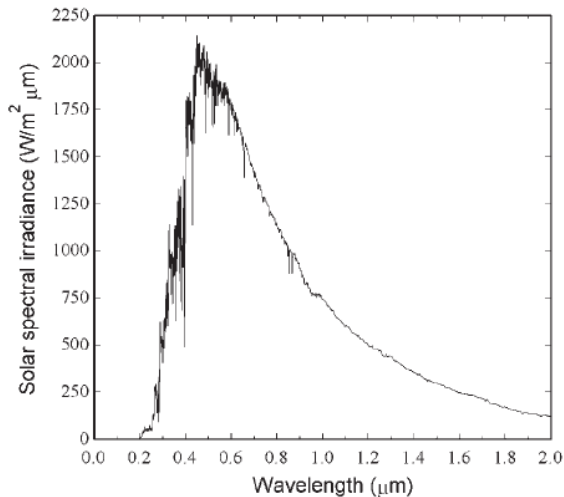


Fig. 2 Curva de irradiancia espectral con una distancia media de la tierra y el sol, según el Centro de Radiación Mundial (WRC, por sus siglas en inglés) (Duffie J., Beckman W., 2013).

1.1.2 Variación de la radiación extraterrestre.

Se deben de considerar dos fenómenos en la variación de la radiación extraterrestre. El primero es la variación emitida por el sol, existen informes contradictorios en la literatura sobre la radiación solar intrínseca, se han sugerido que hay variaciones de +/- 1.5% con diferentes periodicidades y aquellas relacionadas con las actividades de manchas solares. La variación de la distancia Tierra – Sol, sin embargo, conduce a una diferencia del flujo de radiación de +/- 3.3%. La dependencia de la radiación extraterrestre en la época del año se muestra en la figura siguiente (Duffie J., Beckman W., 2013).

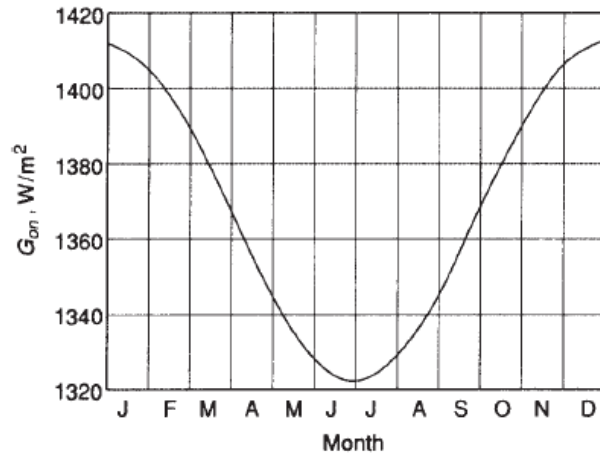


Fig. 3 Variación de la radiación solar extraterrestre en un año (Duffie J., Beckman W., 2013).

Una ecuación simple pero con precisión adecuada para la mayoría de los cálculos de ingeniería está dada por:

Ecuación 1

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right)$$

$$G_{on} = G_{sc} \left(1.000110 + 0.034221 \cos B + 0.001280 \sin B + 0.000719 \cos 2B + 0.000077 \sin 2B \right)$$

Donde G_{on} es la radiación extraterrestre incidente en un plano normal a la radiación de n días de un año, G_{sc} es la constante de radiación solar y B está dada por:

Ecuación 2

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

1.1.3 Declinación solar

El plano de revolución de la Tierra alrededor del Sol se llama eclíptica. El eje terrestre (eje polar) es la línea imaginaria alrededor de la cual gira el planeta Tierra, esta línea tiene una inclinación de 23.45° sobre la normal al plano de la eclíptica.

El ángulo entre una línea que une los centros del sol y la tierra con el plano ecuatorial cambia todos los días, de hecho cada instante, este ángulo se llama declinación solar y es cero en los equinoccios de primavera y otoño (literalmente, noches iguales) y tiene un valor aproximado de $+23.45^\circ$ en el solsticio de verano y -23.45° en el solsticio de invierno (Iqbal M., 1983).

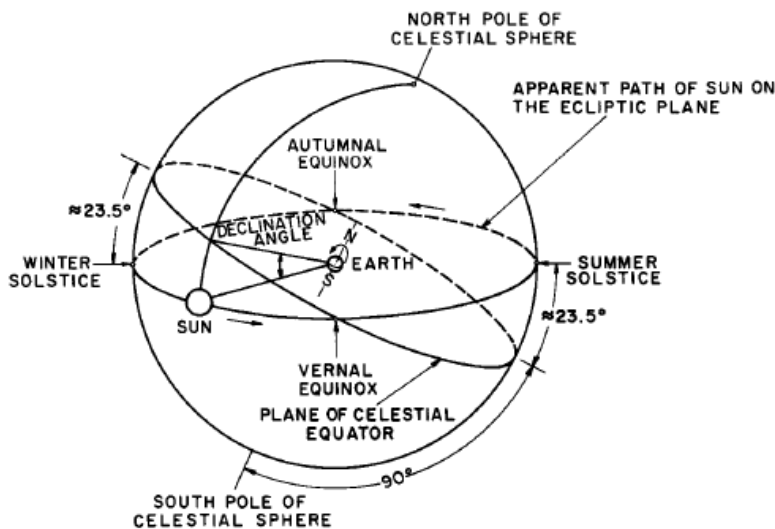


Fig. 4 Esfera celeste que muestra el camino aparente del sol y al ángulo de declinación del sol (Iqbal M., 1983).

Otro medio para describir la declinación es dibujando una esfera celeste como se muestra en la figura 4, con el planeta Tierra en el centro y el sol girado alrededor de él.

1.1.4 Tiempo solar

El tiempo solar se basa en la rotación de la tierra alrededor de su eje polar y en su revolución alrededor del sol. Un día solar es el intervalo de tiempo (no necesariamente 24 horas) cuando el sol parece completar un ciclo sobre un observador estacionario en la tierra. El día solar varía en longitud durante el año, los factores principales para esta variación son los siguientes:

- 1- La tierra barre áreas desiguales en el plano de la eclíptica mientras gira alrededor del Sol.
- 2- El eje de la Tierra está inclinado con respecto al plano de la eclíptica.

En términos simples esto significa que si un observador frente al ecuador establece hoy un reloj (funcionando a una velocidad uniforme) a las 12 del mediodía, cuando el sol está directamente sobre el meridiano local, luego de un mes aproximadamente a las 12 del mediodía el sol no puede aparecer exactamente sobre el meridiano local. Es posible una discrepancia de 16 minutos, esta discrepancia se denomina ecuación de tiempo (Iqbal M., 1983).

Ecuación 3

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B)$$

Donde $B: 2\pi \frac{n-1}{365.24}$

Y n =día del año

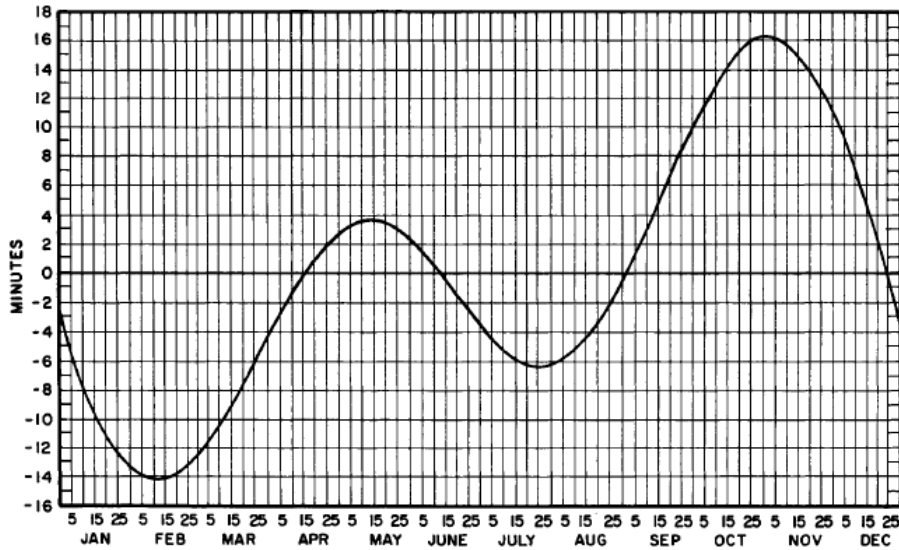


Fig. 5 Variación anual de la radiación solar (Iqbal M., 1983).

1.2 Otras definiciones

A continuación se describen brevemente algunas definiciones que son de gran importancia para el buen entendimiento de este trabajo.

Irradiancia: $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ Es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre superficie, por unidad de área. Su suele usar el símbolo G para irradiancia solar y subíndices apropiados para radiación directa y difusa.

Irradiación: $\left(\frac{Wh}{m^2}\right)$ La energía incidente por unidad de área en una superficie, encontrada por la integración de la irradiancia de un tiempo en específico, generalmente una hora o un día.

Insolación: Es un término que se aplica específicamente a la irradiación de la energía solar.

Masa de aire: La relación de la masa de la atmósfera a través de la cual la radiación directa para a la masa que atravesaría si el sol estuviera en el cenit (Duffie J., Beckman W., 2013).

1.3 Determinación de la radiación solar diaria

Para la determinación de la cantidad de radiación diaria se procede a calcular el área bajo la curva por el método del trapecio empleando la siguiente ecuación:

Ecuación 4

$$H_d = \sum_1^{n-1} \frac{(R_d + R_{n+1})x(t_{n+1} - t_n)}{2}$$

Como la radiación está medida en watts sobre metro cuadrado (W/m^2) y el tiempo está en horas (h) el resultado está en Watt-hora sobre metro cuadrado (Wh/m^2) (Maldonado I., et al, 2010).

1.4 Resolución de los datos

Los datos satelitales se describen principalmente en cuatro diferentes resoluciones: resolución espacial, espectral, temporal y radiométrica.

- La resolución espacial es una medida de la finura de los detalles de una imagen, para las imágenes digitales esto se refiere al área del suelo capturado por un solo pixel, debido a que los pixeles son típicamente cuadrados la resolución se expresa como la longitud lateral de un pixel.
- La resolución espectral es representada por el ancho de longitud de la onda y/o el número de canales (o bandas), espectrales capturadas por un sensor. Define el almacenamiento de energía electromagnética registrada y la capacidad del sensor para detectar diferencias de longitud de onda entre objetos o áreas de interés.
- La resolución temporal es la cantidad de tiempo que le toma a un sensor volver a visitar una zona geográfica.
- La resolución radiométrica es la sensibilidad de un sensor a los valores de brillo (es decir las diferencias de intensidad más pequeñas que puedan detectarse).

Esta métrica generalmente se articula en términos de bits binarios, que se refiere a la cantidad de niveles de escala de grises en lo que un sensor en particular registra los datos (Khorram S., et al., 2012).

1.4.1 Tipos de sensores

Una forma de clasificar los sensores es de la siguiente manera:

- Sensores pasivos: Son aquellos que registran la energía radiada por una fuente.
- Sensores activos: Estos sensores emiten su propio haz de energía y registran la señal reflejada en un medio (cuerpo, etc.) (Chuvienco E., 1995).

En la figura 6 se observa la cobertura de algunos satélites geoestacionarios.

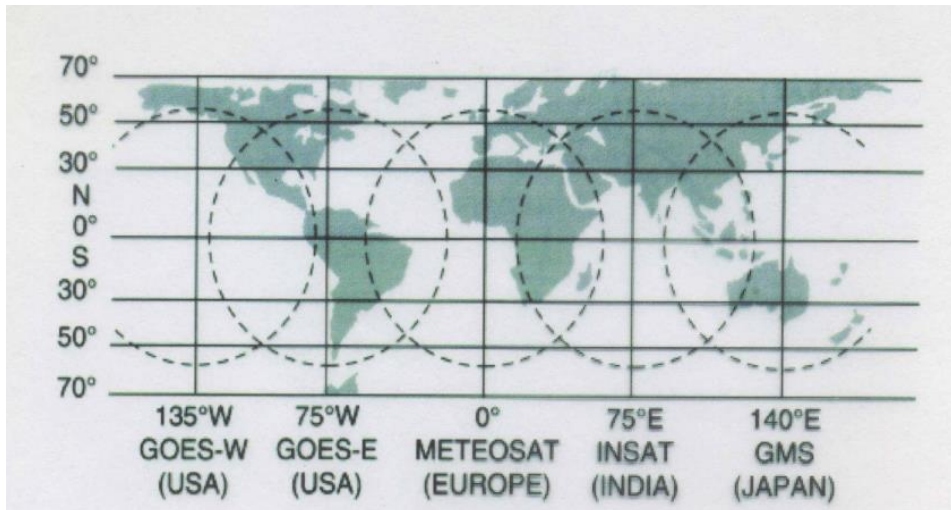


Fig. 6 Cobertura y posición de diferentes satélites geoestacionarios (Tiempo.com, 2013).

1.4.2 Satélites geoestacionarios

Son satélites diseñados para observar permanentemente la misma proporción de la superficie terrestre. Este propósito se consigue gracias a situarse en una órbita de gran altitud (36000km), que le permite sincronizarse con el movimiento terrestre. Los satélites geoestacionarios sirven a la observación meteorológica, formando una red que cubre el globo terrestre (Chuvienco E., 1995).

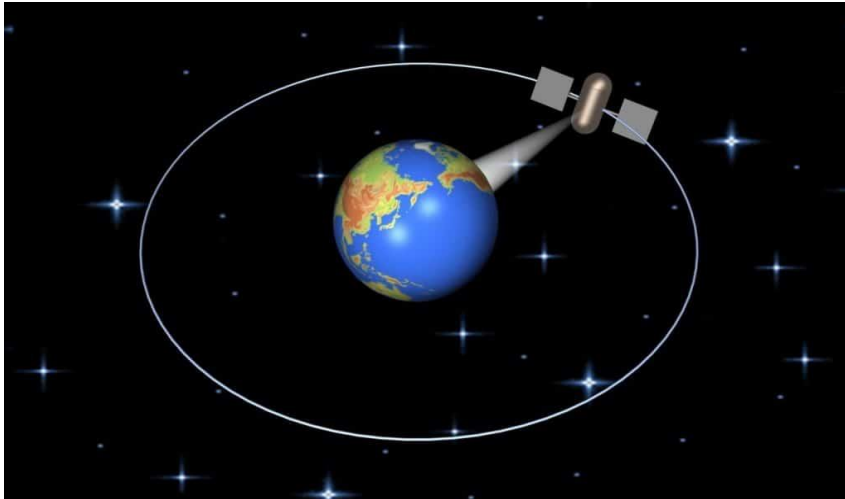


Fig7. Muestra cómo se vería el satélite con respecto a la tierra (portal de internet “características de los satélites geoestacionarios y otras cosas).

1.4.3 Satélites GOES

Como lo dice en el portal de La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés) el satélite ambiental geoestacionario operativo conocido como GOES-13 se convirtió en el satélite oficial GOES-EAST el 14 de abril de 2010. El GOES-13 fue trasladado del almacenamiento en órbita al servicio activo. Está colocado a 22,300 millas sobre el Ecuador para detectar el clima potencialmente mortal, así como las tormentas tropicales del Océano Atlántico.

El proyecto GOES, ubicado en el *Goddard Space Flight Center* de la NASA en Greenbelt, Maryland, adquiere y gestiona el desarrollo y lanzamiento de la serie de satélites GOES para La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés). La NOAA administra el programa de satélites ambientales operacionales y establece requisitos, proporciona todos los fondos y distribuye datos de satélites ambientales para los Estados Unidos, así como para todos aquellos países que cuenten con un sistema de recepción de imágenes. En México el Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra, es el encargado de distribuir esta información a los diferentes usuarios (www.lanot.unam.mx).

Hay dos satélites GOES ubicados sobre el este y el oeste del continente americano y que obviamente cubren toda la porción de territorio Mexicano, el satélite en la posición GOES EAST cubre en el lado este de los EE. UU., Incluyendo el Océano Atlántico y el Golfo de México. La posición GOES WEST tiene cobertura hacia el Océano Pacífico oriental.

Desde el lanzamiento del primer GOES en 1974, estos satélites han suministrado los datos críticos para pronósticos y advertencias meteorológicas rápidas y precisas.

A continuación se muestran algunas de las características principales de las imágenes GOES 13 usadas en esta tesis.

Format:	classic
Global Attributes:	
Conventions	= 'CF-1.4'
Source	= 'McIDAS Area File'
Satellite Sensor	= 'G-13 IMG '
Dimensions:	
xc	= 3200
yc	= 2400

1.5 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)

En el portal de internet <http://smn1.conagua.gob.mx/emas>, el SMN informa que una Estación Meteorológica Automática, está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas variables Meteorológicas, para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación.

El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, esto no aplica en terreno montañoso.

1.5.1 Sensores que integran la Estación:

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura y Humedad relativa
- Radiación solar
- Precipitación

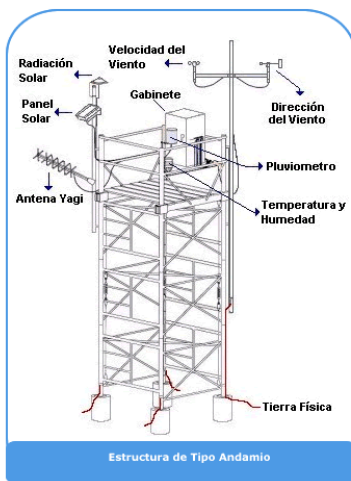


Fig. 8 Esquema de una de las EMAS (<https://smn.cna.gob.mx/es/emas>).

2 Materiales y métodos:

Para este proyecto se utilizaron imágenes del satélite GOES 13, disponibles cada 30 minutos, para las fechas del 8 de enero al 24 de diciembre del año 2013, las cuales fueron adquiridas por el Servicio Solarimétrico Mexicano.

A continuación se describe el método Heliosat 2 que se realizó en cada una de las imágenes para así obtener los resultados finales.

2.1 Calibración de imágenes

El modelo Heliosat 2 fue desarrollado originalmente para su uso con imágenes del satélite METEOSAT, es una serie de satélites geoestacionarios controlados por EUMETSAT (Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos, por sus siglas en inglés), con una resolución de la imagen de 2500x2500 píxeles, con un tamaño de píxel de 5km y para una baja resolución de 416x416 con un píxel de tamaño 30km (Albarelo T., et al., 2015).

Los datos provenientes de otros satélites meteorológicos geoestacionarios pueden ser usados en el método Heliosat 2, siempre y cuando estos puedan ser calibrados a valores de radiancias. El proceso de calibración es diferente de un satélite a otro (Albarelo T., et al., 2015).

En el caso de nuestros datos, éstos fueron obtenidos del satélite meteorológico geoestacionario GOES 13 y para su correcta calibración se lleva a cabo el siguiente procedimiento tomado del portal en internet de la NOAA.

Aunque el canal visible no es calibrado en órbita, los coeficientes de calibración medidos antes del lanzamiento son transmitidos a los usuarios. Un factor de conversión de radiancia a un factor de reflectancia o albedo efectivo está incluido.

La ecuación de calibración es:

Ecuación 5

$$R = mX + b$$

Donde

X = Salida del instrumento

m, b = Coeficientes de calibración medidos antes del lanzamiento

El factor de reflectancia es obtenido de la radiancia como

$$A = k R$$

Donde

$$k = \frac{p_i}{H}$$

H es la irradiancia espectral solar promediada de la función de respuesta espectral del detector del canal visible.

$$H = \frac{\int H(\lambda)\phi(\lambda)d\lambda}{\int \phi(\lambda)d\lambda}$$

Los valores de H calculados por tablas de irradiancia solar y longitudes de onda dadas por Rossow, y cuyos valores están basados en mediciones de Neckel y Labs.

Detector number (in physical array)	m (reference detector) (W/(m ² -sr-μm-count))	X ₀	b (W/(m ² -sr-μm))	k (m ² -sr-μm)/W)
1	6.120196 × 10 ⁻¹	29	-17.749	1.89544 × 10 ⁻³
2	6.118504 × 10 ⁻¹		-17.744	
3	6.096360 × 10 ⁻¹		-17.769	
4	6.087055 × 10 ⁻¹		-17.653	
5	6.132860 × 10 ⁻¹		-17.785	
6	6.118208 × 10 ⁻¹		-17.743	
7	6.122307 × 10 ⁻¹		-17.755	
8	6.066968 × 10 ⁻¹		-17.594	

Tabla1 de coeficientes de calibración para el canal visible de GOES 13 tomado del portal <http://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/calibration/goes-vis-ch-calibration>

2.2 Descripción del método

Se presenta un esquema de los pasos que conforman el modelo Heliosat 2 seguido de una descripción detallada de cada uno de ellos.

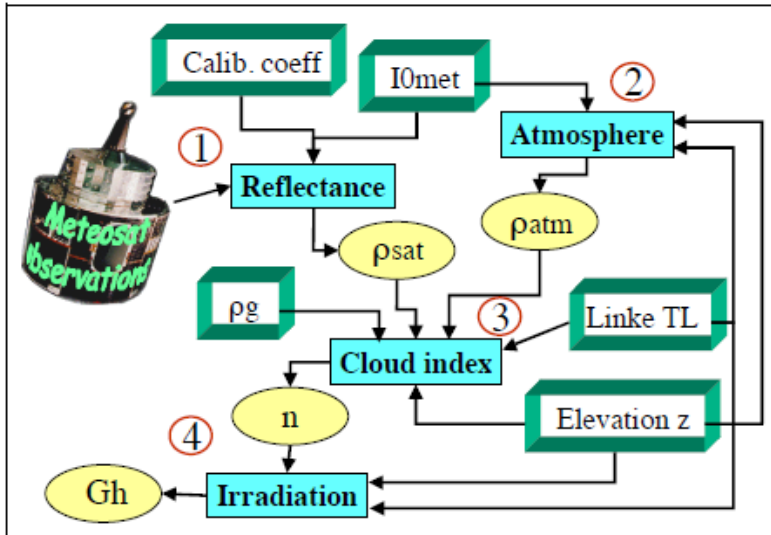


Fig. 9 Esquema del modelo Heliosat 2 (Lefèvre M., Albuissou L., 2002).

El método Heliosat 2 tiene como parámetro principal un índice de nubes n , el cual resulta de comparar lo que es observado por el satélite y lo que debería de observar si este estuviera en condición de cielo claro, basándose en el modelo de cielo claro del *European Solar Radiation Atlas* (ESRA, por sus siglas en inglés). El índice de nubosidad puede ser descrito de la siguiente manera:

Ecuación 7

$$n(i, j) = (\rho(i, j) - \rho_g(i, j)) / (\rho_{cloud} - \rho_g(i, j))$$

Donde:

$n(i, j)$ = índice de nubosidad

$\rho(i, j)$ = albedo aparente

ρ_{cloud} = albedo aparente de las nubes

$\rho_g(i, j)$ = albedo aparente de la superficie de la tierra bajo un cielo claro

Si el cielo es claro el albedo aparente $\rho(i, j)$ es muy cercano al albedo del suelo y el índice de nubosidad es muy cercano a 0 (posiblemente negativo), pero si el cielo está nublado el índice de nubosidad es cercano a 1 o posiblemente más grande. Así el índice de nubosidad puede ser considerado como una descripción de la atenuación de la atmósfera (Rigollier C., et al., 2000).

El índice de nubes no debe de ser confundido con la cobertura de nubes, ya que el primero considera un perfil vertical de las nubes y el segundo visualiza las nubes de forma horizontal.

Los albedos utilizados en esta ecuación pueden ser calculados a partir de una serie de tiempo de las imágenes satelitales (Rigollier C., et al., 2000).

La implementación del método Heliosat 2 está compuesta por 4 principales componentes:

- Cálculo de:
 - o la reflectancia
 - o la reflectancia atmosférica
 - o el índice de nubes
 - o la irradiación

El algoritmo Heliosat 2 se aplica en casos en que las imágenes estén calibradas, es decir, que los valores registrados por el sensor en cada pixel pueden ser traducidos a valores de radiancia (Taddei F., et al 2014).

En los satélites GOES 13 o sucesivos, la calibración se realiza periódicamente y los coeficientes de calibración son informados en el sitio web del satélite <http://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/calibration/goes-vis-ch-calibration.html>

El modelo de cielo claro permite calcular la radiancia atmosférica para cada pixel $\tau_{atm}(i, j)$. Para ello se necesita información de la elevación del sitio z , y del factor de turbidez TL2. Posteriormente los coeficientes de calibración del satélite permiten transformar el valor de radiancia al albedo atmosférico (Rigollier C., et al 2000).

La influencia de la elevación en la precisión del cálculo es menor a la que tiene el factor de turbidez linke TL2, actualmente existen mapas globales con valores medios mensuales de TL2 dados por el proyecto SODA <http://www.soda-pro.com> (Lefèvre M., Albuissou L., 2002).

Dichos mapas fueron realizados con el modelo de cielo claro de ESRA por lo cual son de gran utilidad en éste proyecto.

La medida de la radiación solar al suelo se puede medir de tres formas diferentes: radiación difusa, radiación directa y radiación global, las cuales se describen a continuación.

2.2.1 Componente directa B_c :

A la radiación solar recibida desde el sol sin tener dispersión por la atmósfera se le llama componente directa (Duffie J., Beckman W., 2013).

Para evaluar la atenuación de la radiación directa en su camino hacia el suelo y desde allí hacia el satélite, se debe de considerar el camino óptico que siguen los rayos, dependiendo de parámetros como la latitud del sitio, elevación a nivel del mar y la declinación del sol para el día observado, así como el ángulo solar del instante T (Taddei F., et al 2000), dando como resultado

Ecuación 8

$$\beta_c = \iota_o \cdot \varepsilon \cdot \sin(\gamma_s) \cdot \exp(-0.8662 \cdot TL2 \cdot m \cdot \delta_R(m))$$

El factor $\iota_o \cdot \varepsilon \cdot \sin(\gamma_s)$ representa la irradiancia a tope de la atmósfera y $\exp(-0.8662 \cdot TL2 \cdot m \cdot \delta_R(m))$ la transmitancia atmosférica para la radiación directa en condiciones del cielo claro.

La masa óptica relativa del aire m expresa el cociente entre la longitud del camino óptico del rayo solar a través de una atmósfera estándar a nivel del mar y con el sol en el cenit. A medida que disminuye la altura solar, la longitud del camino óptico relativo aumenta (Taddei F., et al 2014).

La masa óptica relativa no tiene unidades, el γ_s^{true} está en grados

Ecuación 9

$$m(\gamma_s^{true}) = \frac{\left(\frac{p}{p_0}\right)}{\sin \gamma_s^{true} + 0.50572(\gamma_s^{true} + 6.07995)^{-1.6364}}$$

Con la corrección por estación

$$\frac{p}{p_0} = \exp\left(-\frac{z}{z_h}\right)$$

Donde z es el sitio de elevación y z_h es la escala de altura de la atmósfera de Rayleigh cerca de la superficie de la tierra igual a 8934.5 m (Kasten F., Young A., 1989).

Al ángulo de altitud solar usado en la ecuación anterior es corregido por refracción (Kasten F., Young A., 1989).

Ecuación 10

$$\gamma_s^{true} = \gamma_s + \Delta\gamma_{refr}$$

2.2.2 Componente difusa D_c :

A la radiación solar que llega desde el sol después de haber obtenido la dispersión debido a la atmósfera se le llama componente difusa (Kasten F., Young A., 1989).

La irradiación difusa de cielo claro sobre una superficie horizontal también depende del factor de turbidez linke, TL2, para cualquier altura del sol (Taddei F., et al 2014).

Así la irradiancia difusa horizontal queda como:

Ecuación 11

$$D_c = I_0 \cdot \varepsilon \cdot T_{rd}(TL2) \cdot F_d(\gamma_s, TL2)$$

En esta ecuación la irradiancia difusa se expresa como el producto de T_{rd} , la función de transmisión difusa en el cenit y F_d una función de distribución angular difusa.

En el caso de cielo claro la función T_{rd} toma valores muy pequeños, hay muy poca difusión, tan solo la ocasiona las moléculas de aire (dispersión de Rayleigh). A medida que se aumenta la turbidez, aumenta la transmisión difusa y decrece la directa. (Taddei F., et al 2000)

La suma de ambas componentes nos da como resultado la irradiación global horizontal. La irradiancia global disminuye al aumentar la turbidez y disminuir la elevación solar. No resulta igual a cero al atardecer o al amanecer debido a la componente difusa, que es apreciable aun con el sol bajo el horizonte. (Taddei F., et al 2000).

Para poder calcular alguna de las componentes anteriores es necesario conocer el albedo del suelo ρ_g y el de las nubes ρ_c ambos procedimientos se describen a continuación.

2.2.3 El albedo del suelo

Generalmente el albedo de las nubes es más grande que el del suelo, exceptuando en zonas de nieve y desiertos, usualmente hacemos de esto un hecho en la construcción de un mapa del albedo de referencia, asumiendo que en una serie de tiempo de imágenes satelitales las nubes son no estacionarias así el mínimo valor observado de cada pixel nos daría una referencia del mapa del albedo de referencia. (Cano D., et al 1986)

Dadas las radiancias $L^t(i, j)$ observadas por el satélite GOES 13 en el instante t para cada pixel, y I_{0met} el total de irradiancia en el canal visible para este sensor, la reflectancia o albedo aparente es

Ecuación 12

$$\rho^t = \frac{\pi L^t(i, j)}{I_{0met} \varepsilon(t) \cos \theta_s(t, i, j)}$$

Donde $\theta_s = \text{ángulo cenital del sol}$

Para calcular el albedo del suelo es importante primero calcular la reflectancia de la atmósfera para ello se supone que la dispersión de ésta es isotrópica, esto lo podemos concebir en el camino de la radiancia hasta llegar al sensor y a su vez en su llegada al suelo L_{atm} . Este camino que recorre puede ser definido usando la expresión de la radiación difusa bajo un cielo claro al nivel del suelo (Lefèvre M., Albuisson L., 2002).

$$L_{atm} = (D_c/\pi) (I_{0met}/I_0) (< \cos\theta_v >/\cos\theta_v)^{0.8}$$

Cuando ya conocemos el valor de radiancia L_{atm} necesitamos conocer el valor de elevación y el del factor de turbidez Linke, para así poder calcular un valor de reflectancia.

$$\rho_{atm}^t(\theta_s, \theta_v, \psi) = \frac{\pi L_{atm}^t(i, j)}{I_{0met} \varepsilon \cos \theta_s}$$

Otro valor importante que tenemos que conocer para poder construir nuestro mapa del albedo del suelo es la reflectancia observada por el sensor del satélite ρ_{sat} que bajo un cielo claro es una función de la reflectancia del suelo ρ_g , del ángulo cenital del sol θ_s , y del ángulo de la vista del satélite θ_v (Lefèvre M., Albuissou L., 2002).

De esta manera:

$$\rho_{sat}^t(i, j) = \rho_{atm}^t(\theta_s, \theta_v, \psi) + \rho_g(i, j) T^t(\theta_s) T^t(\theta_v)$$

Siendo ψ la diferencia entre los ángulos azimutales de satélite y del sol.

Finalmente, podemos calcular un valor para el albedo del suelo si el cielo fuera claro en un instante t

$$\rho^*(i, j) = \frac{[\rho_{sat}^t(i, j) - \rho_{atm}^t(i, j)]}{T^t(\theta_s) T^t(\theta_v)}$$

2.2.4 Albedo de las nubes

El albedo de las nubes está definido como el típico valor para la nube más brillante. Constanzo (1994) y Hammer (1997) calcularon el valor de brillantez del albedo en una serie de tiempo, los resultados dependieron de qué tan largas fueron estas series y de los límites seleccionados.

El albedo efectivo de las nubes depende del ángulo cenital del sol, en este trabajo seguimos el modelo que se propone en el manual de Heliosat 2, propuesto por Taylor (1984) (Lefèvre M., Albuissou L., 2002).

Ecuación 17

$$\rho_{eff}^t = 0.78 - 0.13(1 - \exp(-4\cos(\theta_s)^5))$$

Si seguimos la ecuación 18 podríamos aplicar el albedo efectivo en las nubes y así obtener el albedo aparente en ellas $\rho_{cloud}^t(i, j)$.

Ecuación 18

$$\rho_{cloud}^t(i, j) = (\rho_{eff}^t - \rho_{atm}^t(\theta_s, \theta_v, \psi)) / T^t(\theta_s)T^t(\theta_v)$$

Se agregan dos restricciones ganadas de la experiencia

$$\begin{aligned} \rho_{cloud}^t(i, j) > 0.2 \text{ de otra manera } \rho_{cloud}^t(i, j) = 0.2 \\ \rho_{cloud}^t(i, j) < 2.24\rho_{eff}^t \text{ de otra manera } \rho_{cloud}^t = 2.24 \rho_{eff}^t \end{aligned}$$

2.2.5 Modelo de cielo claro ESRA

El modelo de cielo claro usado en Heliosat 2 fue desarrollado en el marco del proyecto europeo ESRA, con correcciones por elevación propuestas por Remun y Page (2002). Desde un punto de vista operativo, la utilización del modelo ESRA implica el conocimiento en cada pixel de la imagen, del factor de turbidez Linke y de la elevación del terreno. (Taddei F., et al 2014).

El factor de turbidez Linke es un punto clave para el modelo de cielo claro, es una función de la dispersión de los aerosoles y absorción por gas, principalmente por vapor de agua. Cuando se combina con la dispersión de moléculas de la atmósfera resumen la dispersión de esta y por tanto, la atenuación del haz directo, así como la importancia de la fracción difusa (Rigollier C., et al 2000).

Entre más grande sea el factor de turbidez, mayor es la atenuación de la radiación para una atmósfera de cielo claro (Rigollier C., et al 2000).

2.2.6 Índice de nubes

Cuando el cielo está despejado, el albedo observado es cercano al del suelo y el índice de nubes es cercano a 0, incluso negativo. Si el cielo está muy cubierto, el índice de nubes es cercano a 1 y posiblemente mayor. El índice de nubes resulta un buen parámetro para analizar las imágenes satelitales, que no debe de ser confundido con la medida de la cobertura de las nubes. (Lefèvre M., Albuissou L., 2002)

En el caso de cielos despejados, el albedo observado por el sensor se considera el albedo del suelo $p_{suelo}^t(i, j)$ el ángulo cenital del sol θ_s y el ángulo de visión θ_v , suponiendo reflexión isotrópica o lambertiana, el albedo observado por el sensor resulta: (Lefèvre M., Albuissou L., 2002)

Ecuación 19

$$p^t(i, j) = \rho_{atm}^t(\theta_s, \theta_v) + p_{suelo}^t(i, j)T^t(\theta_s)T^t(\theta_v)$$

Donde $\rho_{atm}^t(\theta_s, \theta_v)$ es la reflectancia intrínseca de la atmósfera, causada por la dispersión de la radiación incidente y ascendente hacia el sensor, $T^t(\theta_s)T^t(\theta_v)$ son las transmitancias globales de la atmósfera para la radiación ascendente y descendente, respectivamente. La transmitancia global es la suma de las transmitancias para las componentes directa y difusa. El principio de reciprocidad implica que la misma formulación se aplica en ambas. Los términos $\rho_{atm}^t(\theta_s, \theta_v)$ y $T^t(\theta_s)T^t(\theta_v)$ se modelan y se obtiene una expresión para $p^t(i, j)$ como función de $\rho_{atm}^t(\theta_s, \theta_v)$ y $T^t(\theta_s)T^t(\theta_v)$. Inversamente, esta relación es utilizada para determinar $p_{suelo}^t(i, j)$ (Rigollier C., et al 2000).

2.2.7 Cálculo de la irradiación diaria

El cálculo de la irradiación diaria $G_d(i, j)$ está basado sobre N evaluaciones de la irradiación horaria hecha durante el día (Lefèvre M., Albuissou L., 2002). Así la ecuación es la siguiente:

$$G_d(i, j) = K_{cd}(i, j)G_a(i, j) = G_a(i, j) \sum_{h=1}^N w_h K_{cd}(i, j)$$

Donde:

$$w_h = \frac{G_d(i, j)}{\sum_{h=1}^N G_d(i, j)}$$

Se dice que la estimación es válida si se usa al menos N número de irradiación por hora en el cálculo. Para cada irradiación horaria, la elevación solar media debería ser mayor a 15°.

De acuerdo a cada variación por estación del año, N se establece igual a una función del ángulo cenital del sol observada a mediodía θ_s^{noon} (Lefèvre M., Albuissou L., 2002).

Sí $\theta_s^{noon} < 55^\circ$, N=2; de otra manera N=3 (datos disponibles cada 3 horas)

Sí $\theta_s^{noon} < 55^\circ$ N=5; de otra manera N=8 cuando los valores horarios están disponibles.

2.2.8 Relación entre el índice de nubes y la irradiación global superficial

Determinando el valor del índice de nubes n, la irradiación global horizontal a nivel del suelo G_h se calcula mediante el índice de cielo claro K_c , igual al cociente entre la irradiación mencionada y la del cielo claro G_{ch} . El valor de esta índice es función de n, según la relación determinada empíricamente y válida para todo sitio (Lefèvre M., Albuissou L., 2002), dada por:

$$K_c = \begin{cases} 1,2 & n < -0.2 \\ 1 - n & n \in (-0.2 ; 0.8) \\ 2.0667 - 3.667n + 1.6667n^2 & n \in (0.8 ; 1.1) \\ 0.05 & n > 1.1 \end{cases}$$

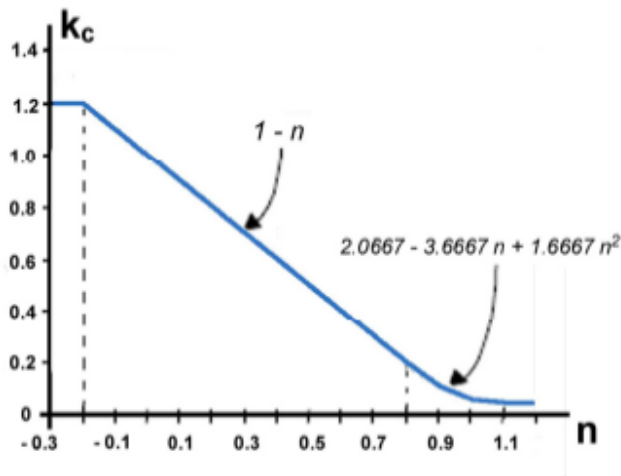


Fig. 10 Relación entre el índice de cielo claro y el índice de nubes (Lefèvre M., 2014).

2.2.9 Heliosat 1

El método Heliosat fue diseñado para definir una herramienta operacional rutinaria para la producción de mapas de radiación solar (Diabaté & Demarcq, 1987). Dada su gran cobertura territorial instantánea.

Las limitaciones más importantes de este modelo son:

- No detecta nubes de tamaño menor a un píxel.
- Supone un comportamiento lambertiano de las superficies.

La mayoría de las superficies continentales actúan aproximadamente como un reflector lambertiano. En el caso del agua o superficies cubiertas por nubes, esto no es así, aunque el valor proporcionado es cercano al albedo superficial (Mora, 2010).

La idea básica que rige el modelo Heliosat consiste en la modelación separada de ciertas variables atmosféricas y la nubosidad (Halcartegaray, 2011).

En la figura 10 se observa el procedimiento del método Heliosat en un diagrama de flujo.

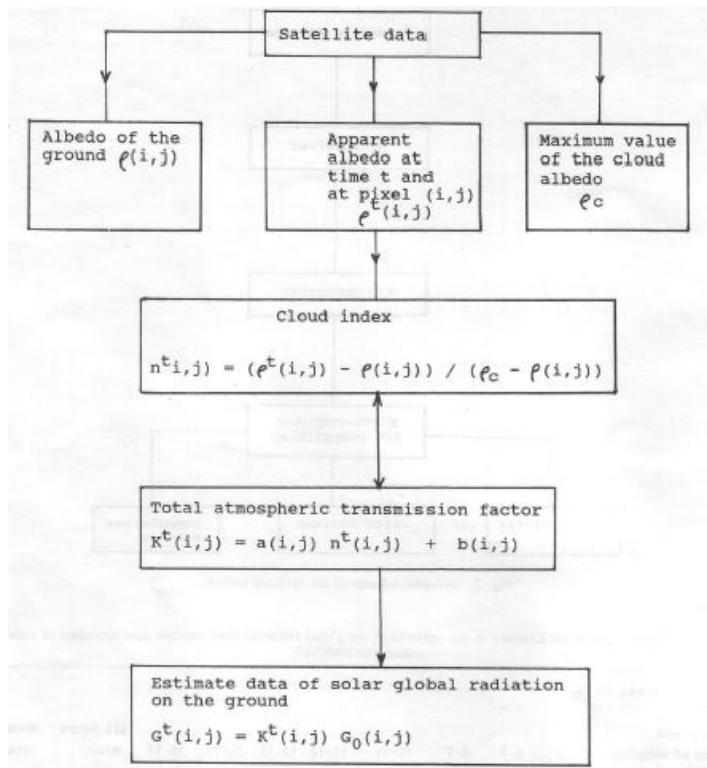


Fig. 11 Esquema de la metodología de Heliosat 1(Diabaté, L. G. (1989).

2.2.10 Diferencias entre Heliosat 2 y Heliosat 1

El método Heliosat-2 surge como la evolución del modelo Heliosat-1, este sigue la misma filosofía que su predecesor, aunque al ser un nuevo modelo introduce algunas mejoras que se agrupan del siguiente modo:

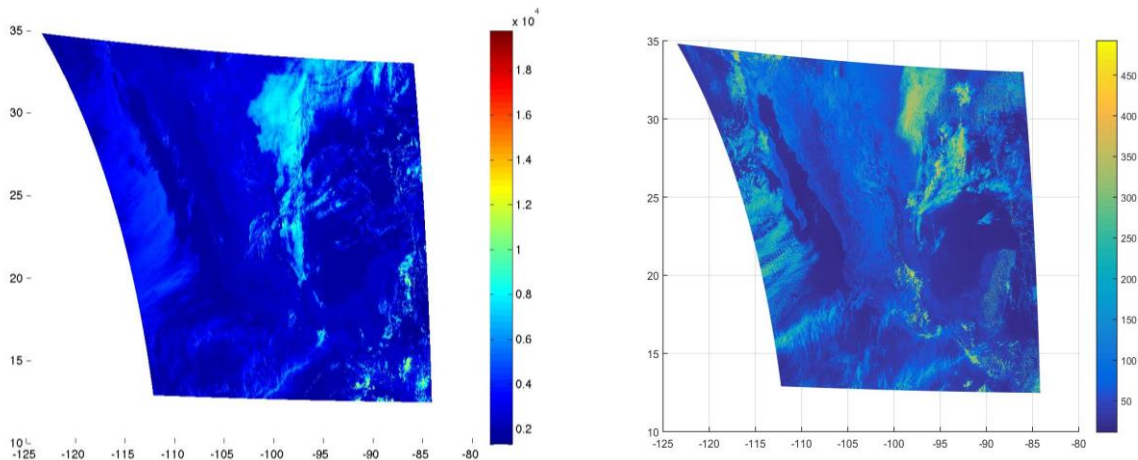
- Adopción de un nuevo modelo de cielo claro
- Utilización de coeficientes de calibración del sensor del satélite.
- Propone una nueva formulación para el cálculo de los albedos.
- Modifica la relación entre irradiancia horizontal y el coeficiente de cobertura nubosa.

(Olcoz A. Solano M. 2014).

3 Resultados

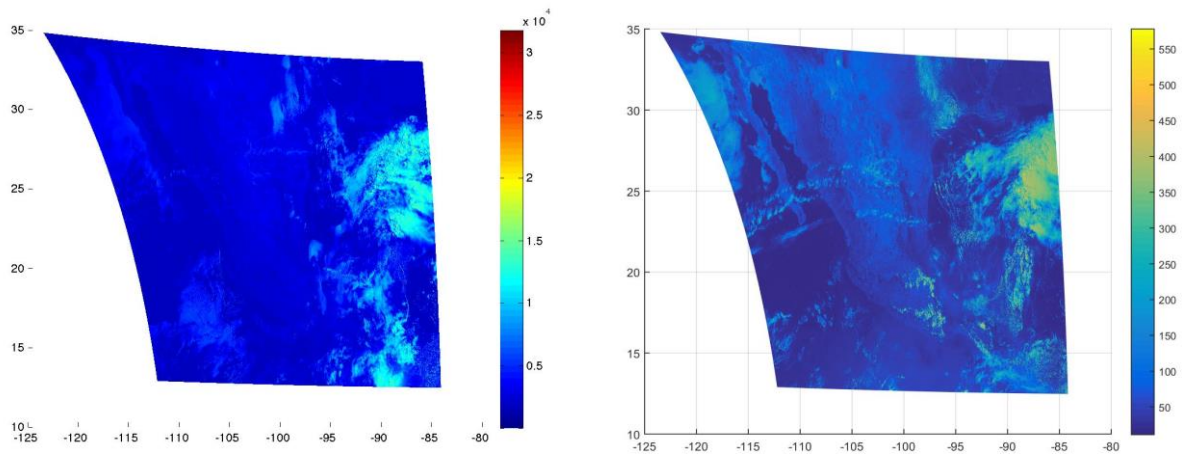
3.1 Calibración de imágenes

Como lo indica el modelo Heliosat 2 el primer paso es la calibración de las imágenes satelitales para así convertirlas en radiancias, a continuación se muestran ejemplos de las diferencias entre una imagen sin un procedimiento de calibración y otra que si lo tiene.



Mapa 1. Imagen satelital que muestra la parte del territorio de México para el día 98, hora 14:15.

Mapa 2. Mapa de México con calibración basada en el modelo Heliosat 2, para el día 98 hora 14:15.



Mapa 3. Imagen satelital que muestra la parte del territorio de México para el día 111, hora 14:15.

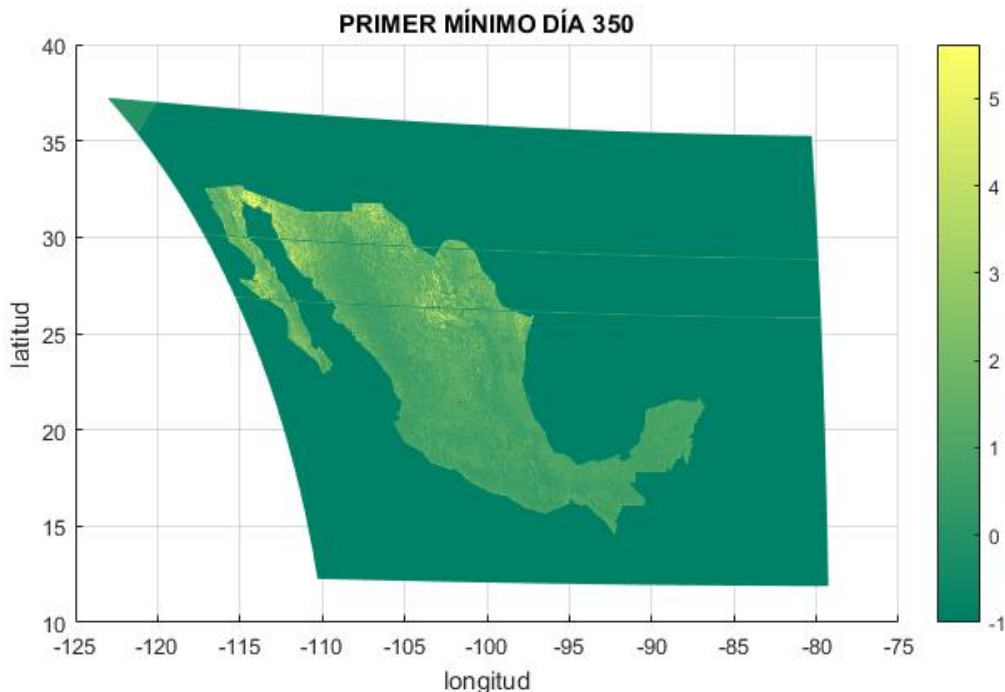
Mapa 4. Mapa de México con calibración basada en el modelo Heliosat 2, para el día 111 hora 14:15.

Se pude observar claramente que esta calibración hace que las imágenes sean notablemente más claras, además de que los valores de radiancia son más pequeños.

3.2 Determinación del albedo del suelo

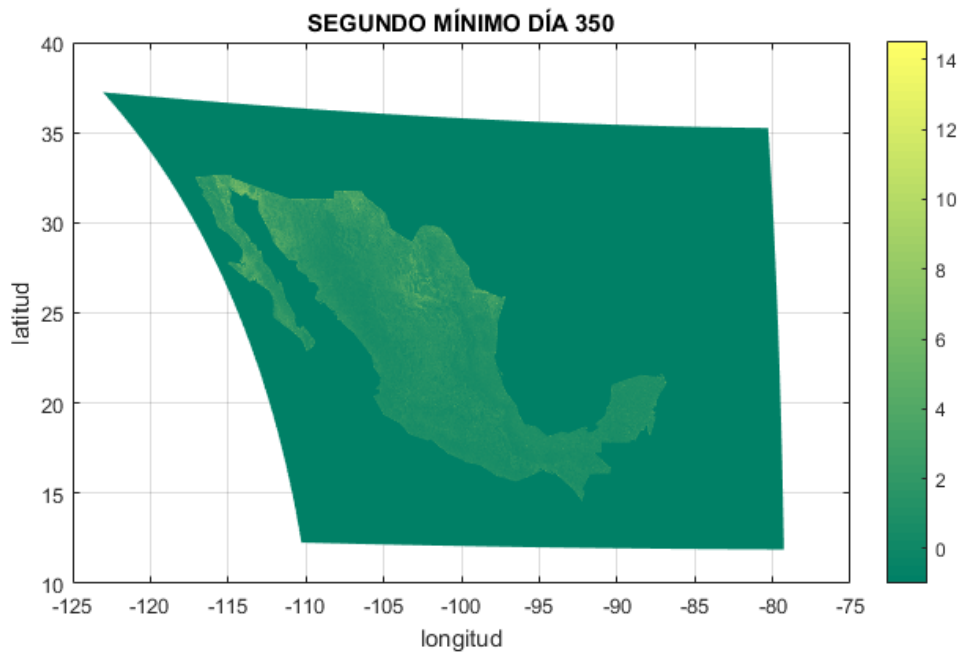
Como ya se describió en el capítulo anterior, este parámetro se estimó analizando una serie de tiempo de imágenes satelitales, para este caso se tomaron 7 días antes y 7 días después de la fecha a la cual se le determinó el albedo del suelo, esto es tomando por ejemplo del día 15 de mayo de 2013 se usaron las imágenes que comprenden del 128 al 142 recordando que se utiliza el formato de día juliano, y como dicho ejemplo fueron calculados los 351 días del año 2013. Esto dado que no se tomaron en cuenta los primeros ni los últimos 7 días, para no usar imágenes de otros años.

Se encontró el primero mínimo en esta serie temporal, pero se desecha ya que se considera que puede tener errores de adquisición de datos, el mapa 5 nos muestra un ejemplo del primer mínimo para el día 350.



Mapa 5. Mapa de México para el día 350 del año 2013, nos muestra los valores en W/m^2 del primer mínimo del albedo terrestre.

Enseguida se hace la estimación del segundo mínimo de esta serie temporal de imágenes, el mapa 6 nos muestra el segundo mínimo para el día 350.

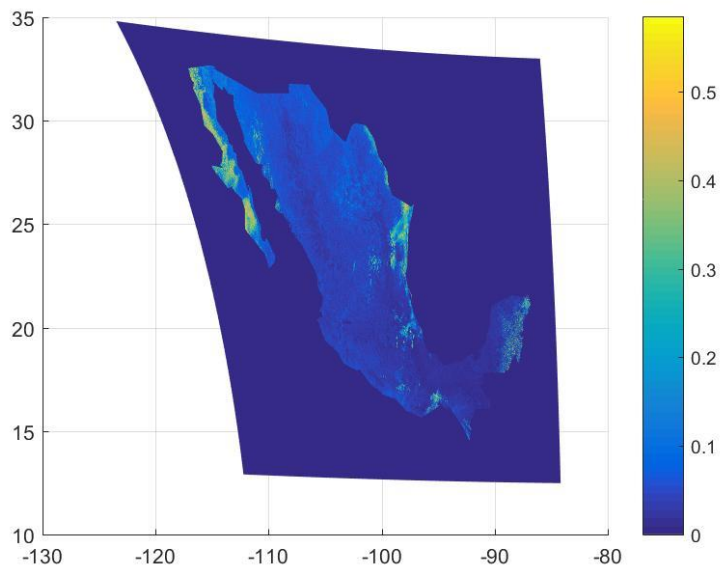


Mapa 6. Mapa de México para el día 350 del año 2013, nos muestra los valores en W/m^2 del segundo mínimo del albedo terrestre.

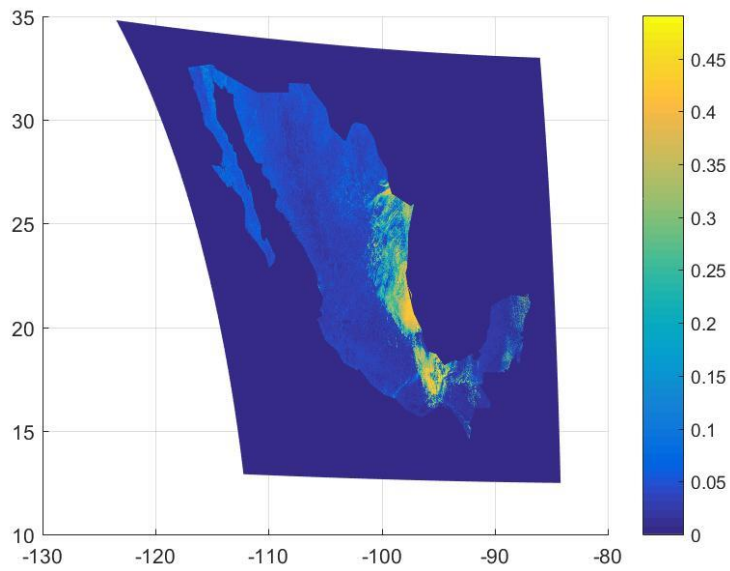
Este mapa de albedo del suelo estimado a partir del segundo mínimo de la serie temporal de imágenes es el que se usó para el cálculo de la radiación final.

3.3 Índice de nubes

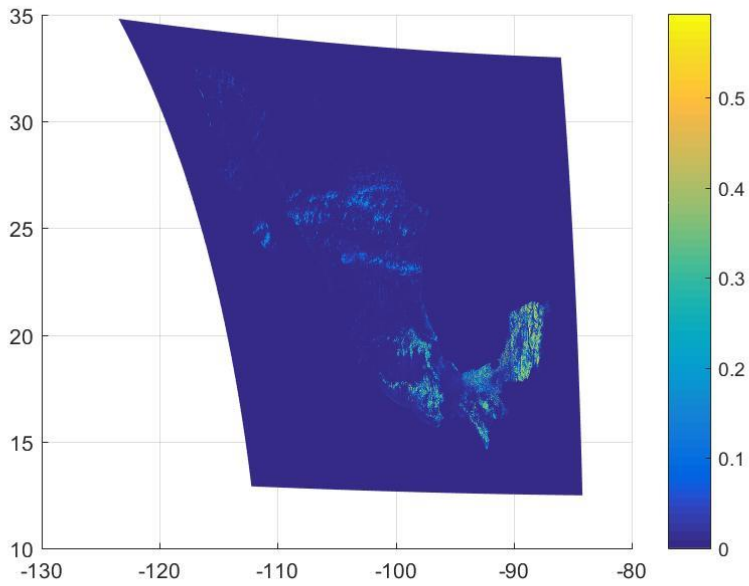
El parámetro fundamental de Heliosat 2 es el índice de nubes, el cual fue calculado para cada una de las imágenes procesadas, a continuación se muestran ejemplos de algunos de dichos índices.



Mapa 7. Mapa que nos muestra el índice de nubes para el territorio de México en el día 98 hora 10:15



Mapa 8. Mapa que nos muestra el índice de nubes para el territorio de México en el día 110 hora 10:15



Mapa 9. Mapa que nos muestra el índice de nubes para el territorio de México en el día 111 hora 14:45

3.4 Constante solar

Para este trabajo se usó el valor de la constante solar diaria, lo que se diferencia del modelo original que usa el valor promediado de $1359 \text{ W}/\text{m}^2$, para todo el año.

A continuación en la tabla 2 se muestra una parte de la base de datos de la constante solar diaria que se usó en la implementación de Heliosat 2.

Tabla: Promedio diario de la contante solar

Año	Mes	Día	irradiancia
13	1	1	1366,0155
13	1	2	1366,098
13	1	3	1366,0884
13	1	4	1366,1007
13	1	5	1366,2362
13	1	6	1366,2798
13	1	7	1366,3909
13	1	8	1366,2441
13	1	9	1366,1399
13	1	10	1365,9417
13	1	11	1365,6871
13	1	12	1365,5155
13	1	13	1365,4734
13	1	14	1365,6722
13	1	15	1365,8625

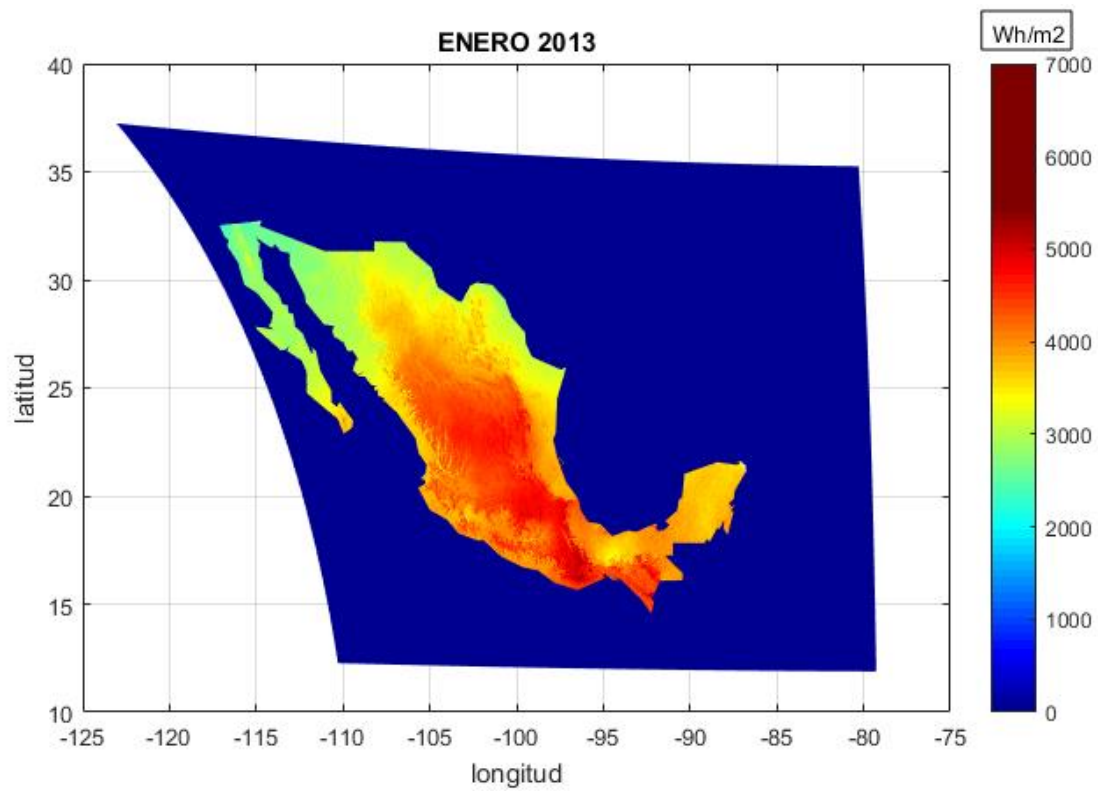
Tabla 2. La tabla nos muestra un ejemplo de la constante de radiación solar diaria usada.

3. 5 Irradiación solar

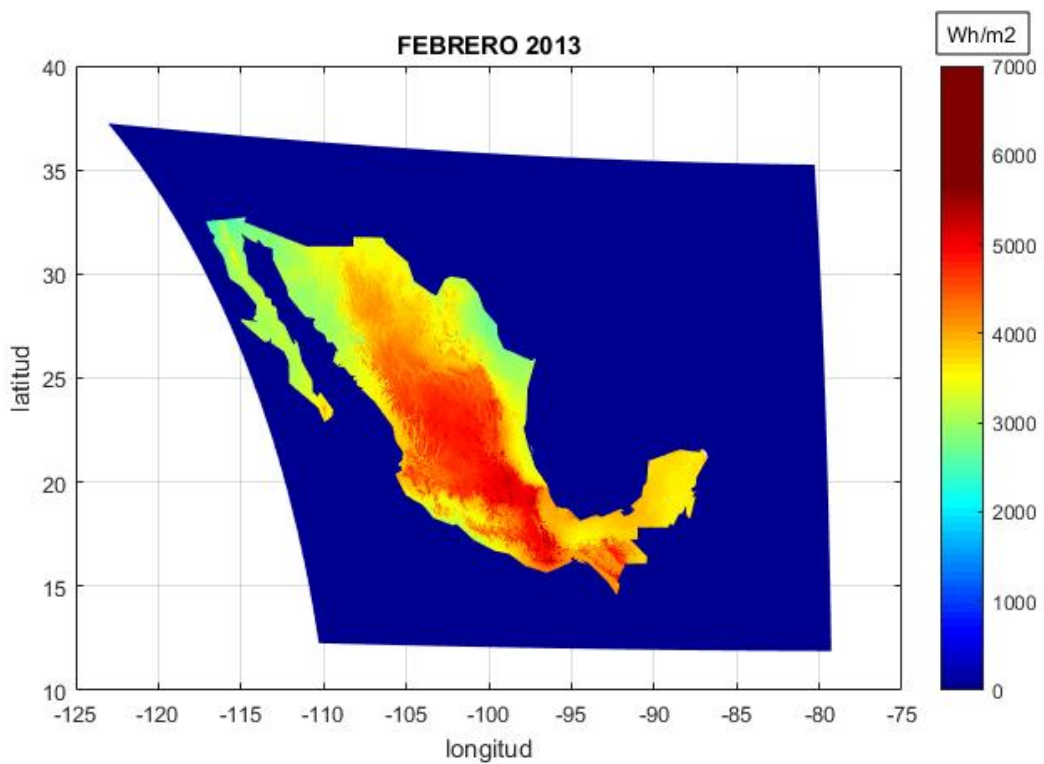
Después de implementar el método Heliosat 2 se llegó al resultado final de la obtención de 11 mapas de radiación solar para cada uno de los meses del año 2013 con excepción de junio como se muestran a continuación.

Según lo reportó el portal de NOAA, GOES 13 sufrió una anomalía durante la noche del 22 de mayo del 2013 por razones desconocidas. La anomalía empezó a las 3:40 UTC.

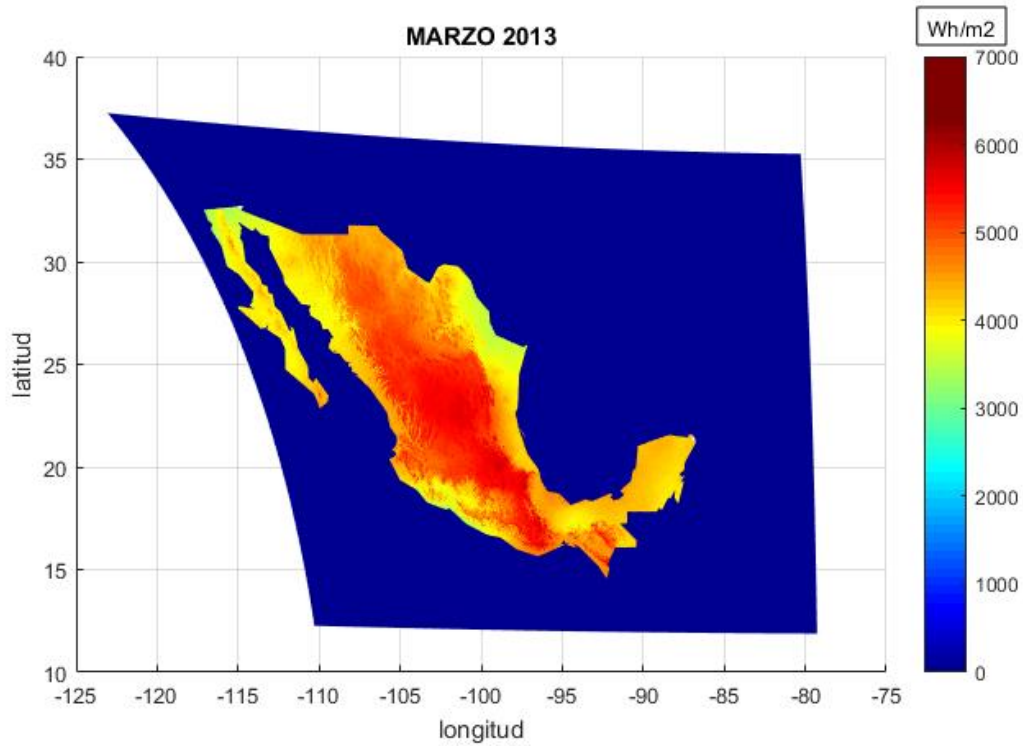
A partir del 23 de mayo de 2013 se transmitieron imágenes de GOES 14, pero para este trabajo no vamos a tomarlas en cuenta, por lo cual no se muestra el mapa de radiación solar para el mes de junio, y el mes de mayo está hecho solo con un promedio de 15 días; esto para tomar imágenes que no estén siendo afectadas por dicha anomalía.



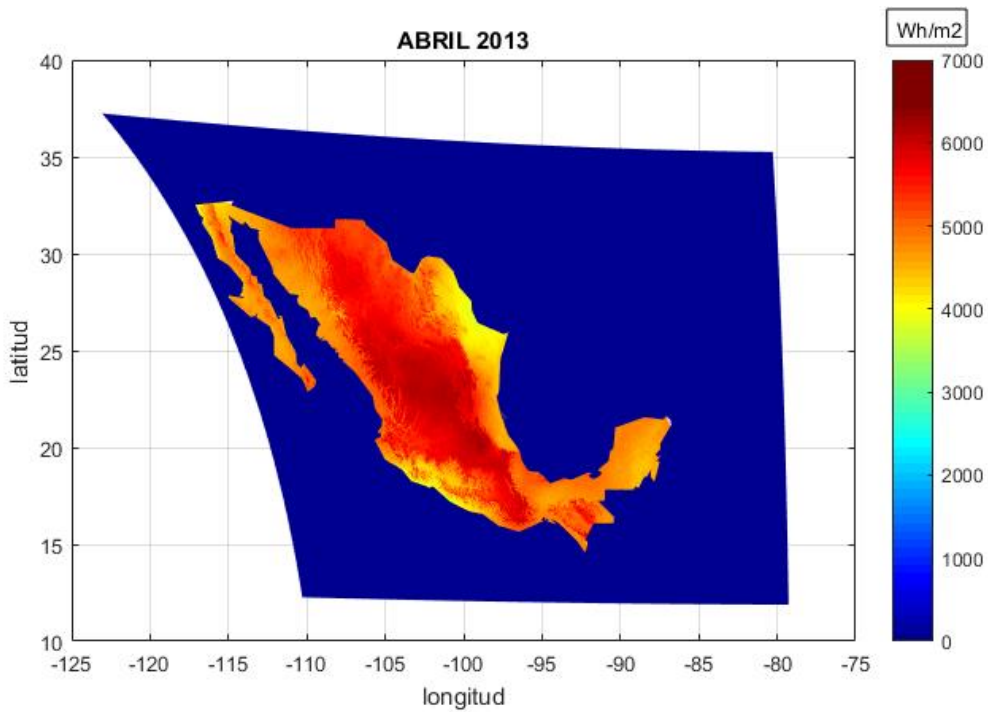
Mapa 10. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para enero de 2013.



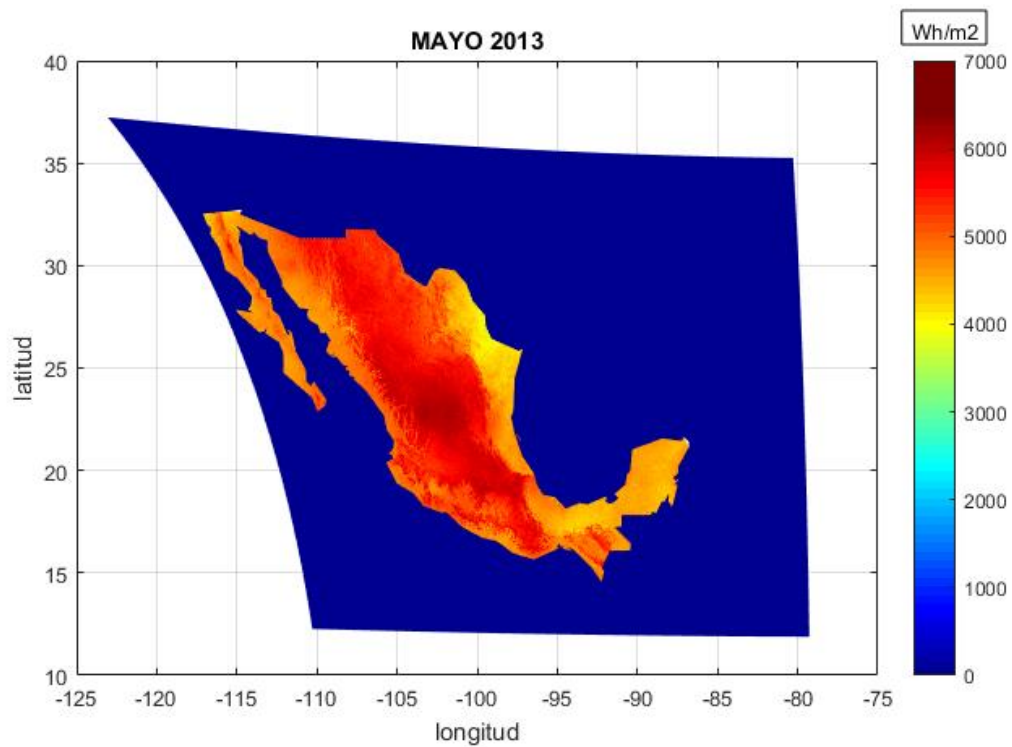
Mapa 11. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para febrero de 2013.



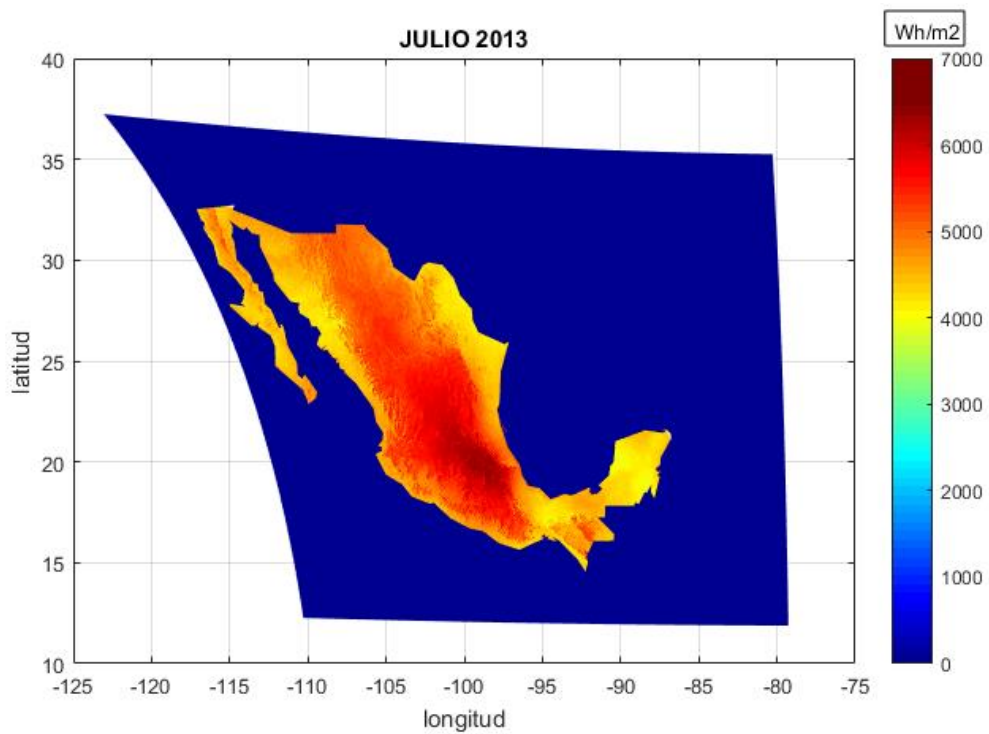
Mapa 12. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para marzo de 2013.



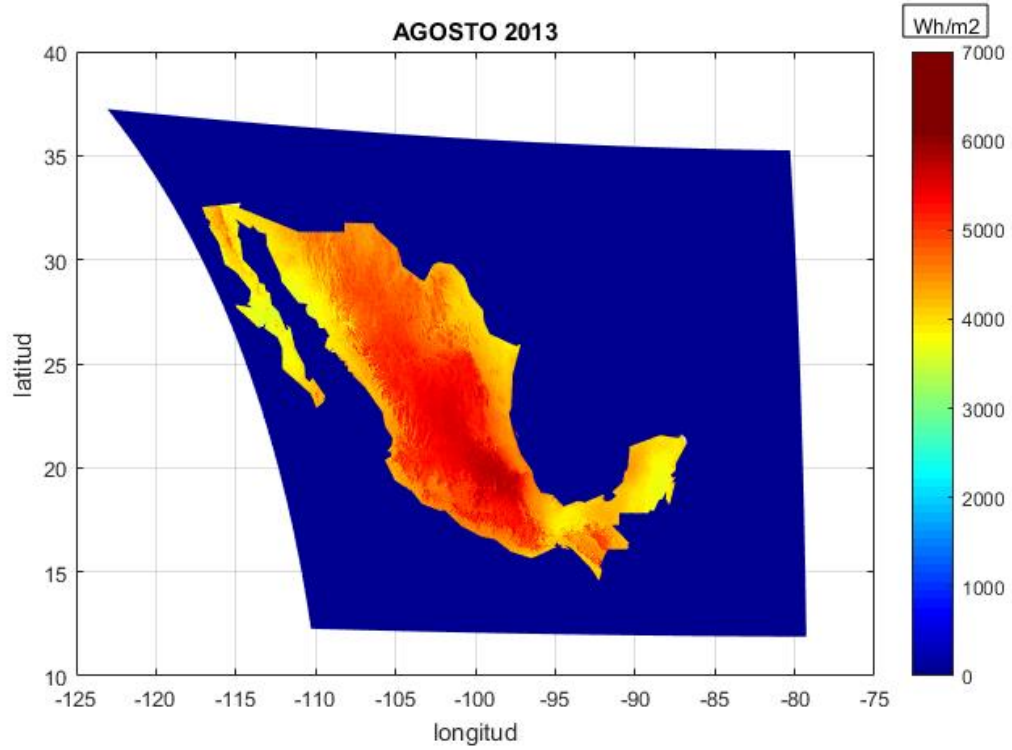
Mapa 13. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para abril de 2013.



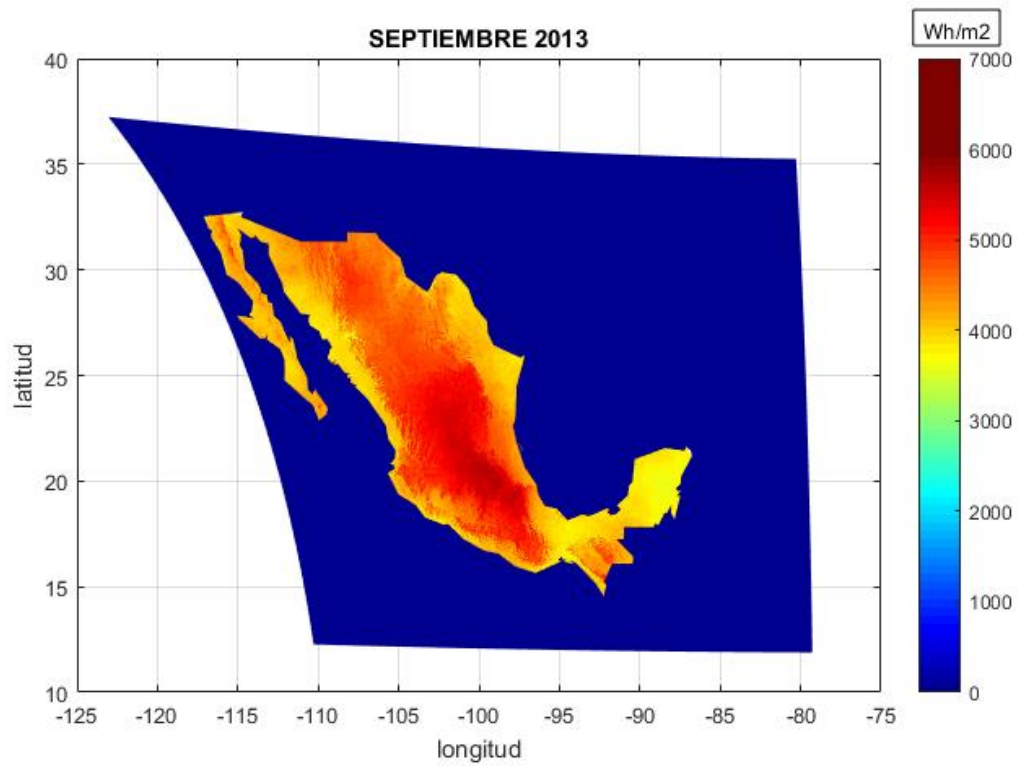
Mapa 14. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para mayo de 2013.



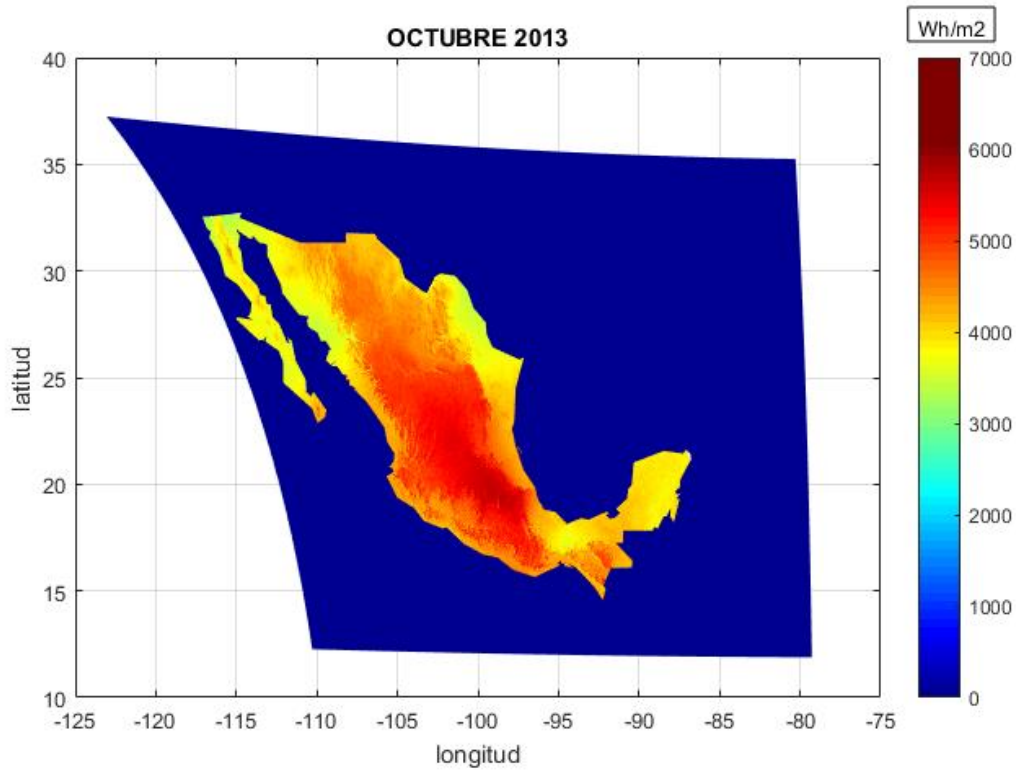
Mapa 15. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para julio de 2013.



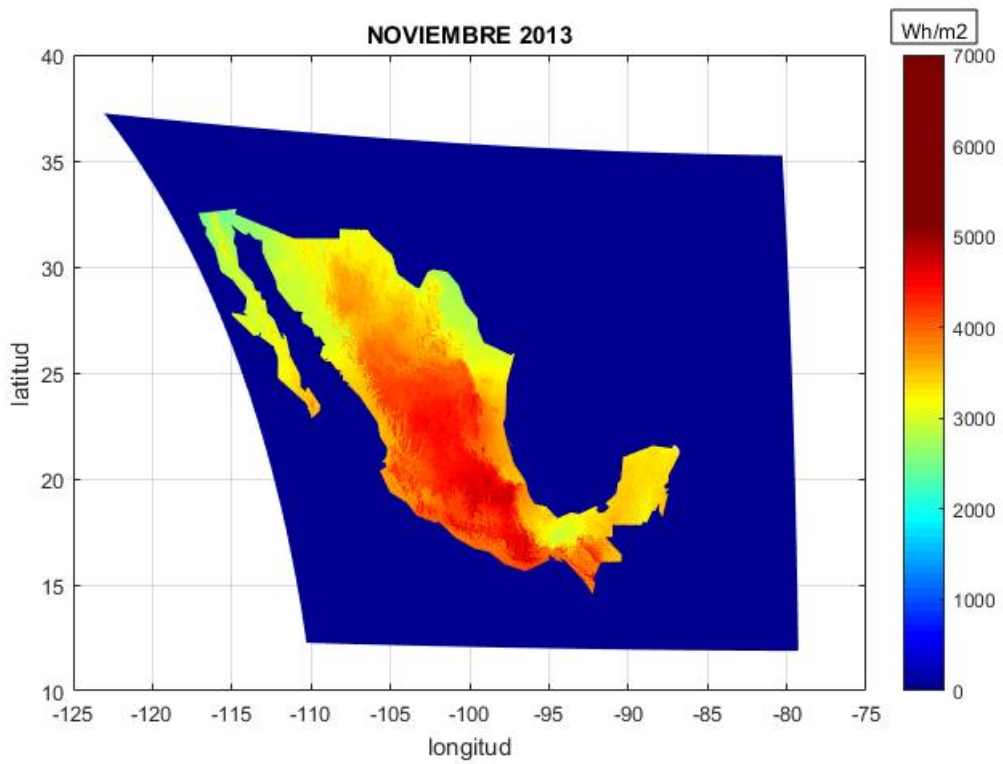
Mapa 16. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para agosto de 2013.



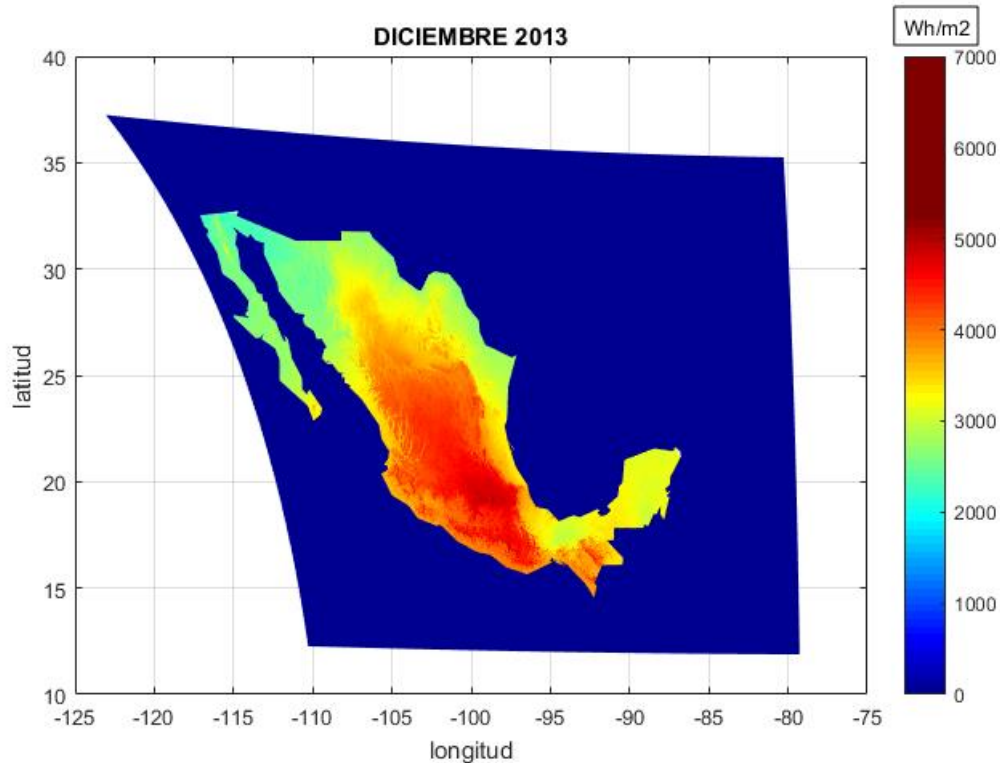
Mapa 17. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para septiembre de 2013.



Mapa 18. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para octubre de 2013.



Mapa 19. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para noviembre de 2013.



Mapa 20. Mapa de México que nos muestra la irradiación promedio mensual para diciembre de 2013.

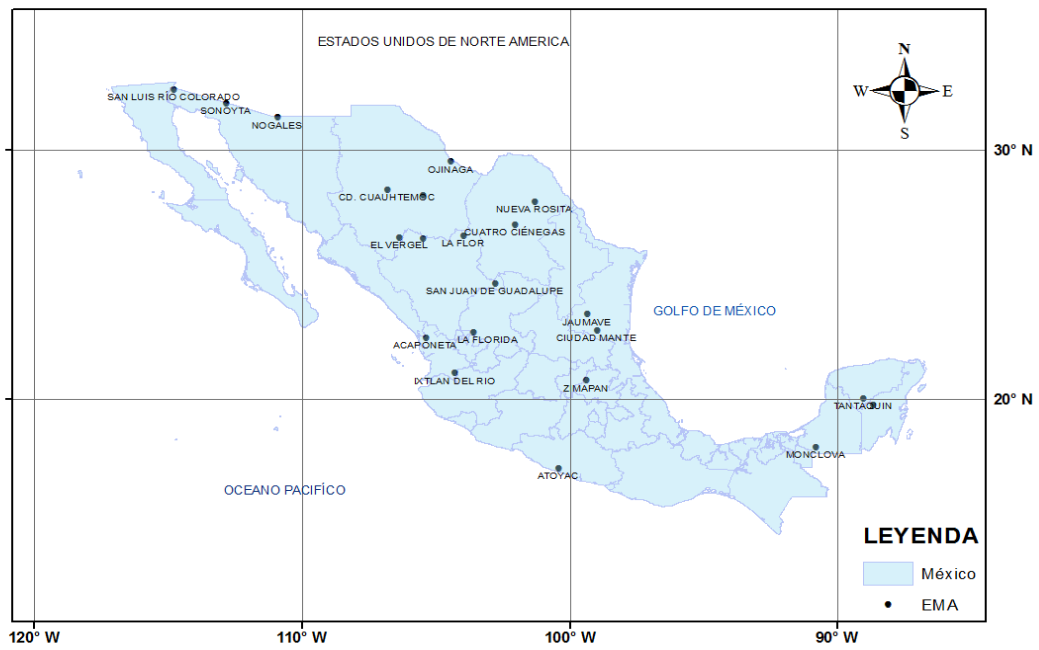
4 Análisis

Se presentan tablas de la relación entre los valores obtenidos de irradiación en promedios mensuales para las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) y los valores promediados por mes obtenidos de las imágenes satelitales (SAT) con el método Heliosat 2 así como un promedio de la diferencia entre ambos resultados.

En el marco del proyecto “Calibración de una red de sensores de radiación solar y su base de datos (recuperación, validación y calibración de 133 estaciones)” y con el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), el Servicio Solarimétrico Mexicano en el año 2013 inició la calibración y reubicación de los piranómetros de las estaciones EMA's, teniendo como objetivo contar con datos confiables de 133 puntos de país en un periodo de 4 a 5 años (Valdés M. et al 2013) Basándonos en este proyecto se seleccionaron estaciones que pudieran tener datos confiables para las fechas estimadas en este trabajo.

A continuación se muestra un mapa de México con la ubicación de las diferentes estaciones EMA's que se usaron para la validación de los datos.

ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS (EMAS)

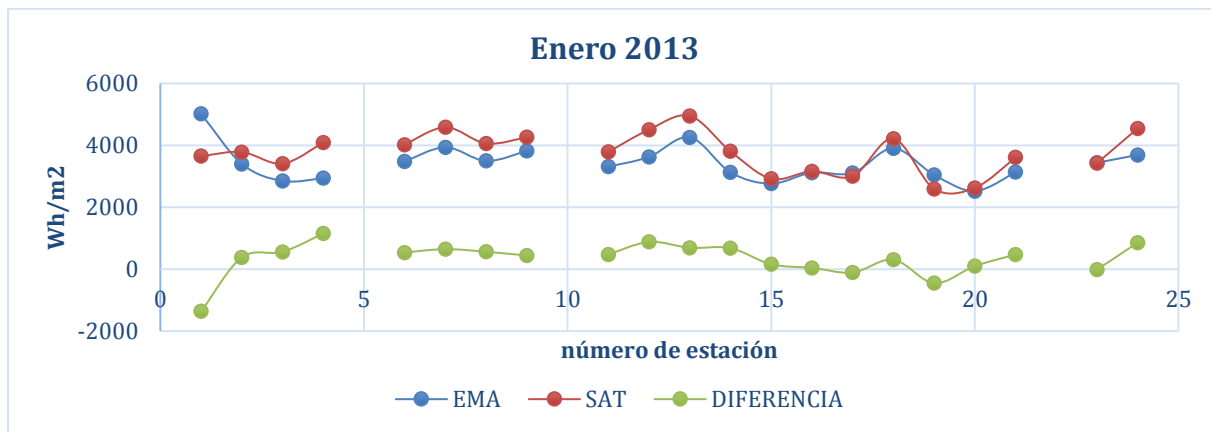


Mapa 21. El mapa nos muestra la ubicación de las EMAS usadas para la validación de datos.

- Enero 2013

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	72033,36
Acaponeta	1	5017,56	3656,66	-1360,9	suma SAT	79060,45
Cd Cuauhtémoc	2	3403,98	3785,09	381,11	promedio diferencia	334,62
Cd Delicias	3	2849,85	3409,75	559,9	error relativo	9,76
Cd Mante	4	2941,78	4096,56	1154,78	error absoluto	7027,09
Cuatro Ciénegas	5				RMSE	579,14
El vergel	6	3478,54	4018,26	539,72		
Huichapan	7	3939,44	4586,84	647,4		
Ixtlán del Río*	8	3497,4	4060,31	562,91		
Jaumave	9	3824,73	4266,87	442,14		
José María Morelos	10					
La flor	11	3315,78	3787,04	471,26		
La florida	12	3627,82	4509,59	881,77		
Miahuatlán	13	4262,01	4954,01	692		
Monclova	14	3128,01	3808,75	680,74		
Nogales	15	2764,27	2923,79	159,52		
Nueva Rosita	16	3121,2	3162,75	41,55		
Ojinaga	17	3108,72	3003,11	-105,61		
San Juan de Guadalupe	18	3908,03	4217,19	309,16		
San Luis Río Colorado	19	3045,95	2595,28	-450,67		
Sonoyita	20	2525,26	2626,52	101,26		
Tantaquín	21	3140,79	3612,76	471,97		
Tres Marías	22					
Villagrán	23	3439,8	3428,75	-11,05		
Zimapan	24	3692,44	4550,57	858,13		

Tabla 3. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de enero del año 2013.

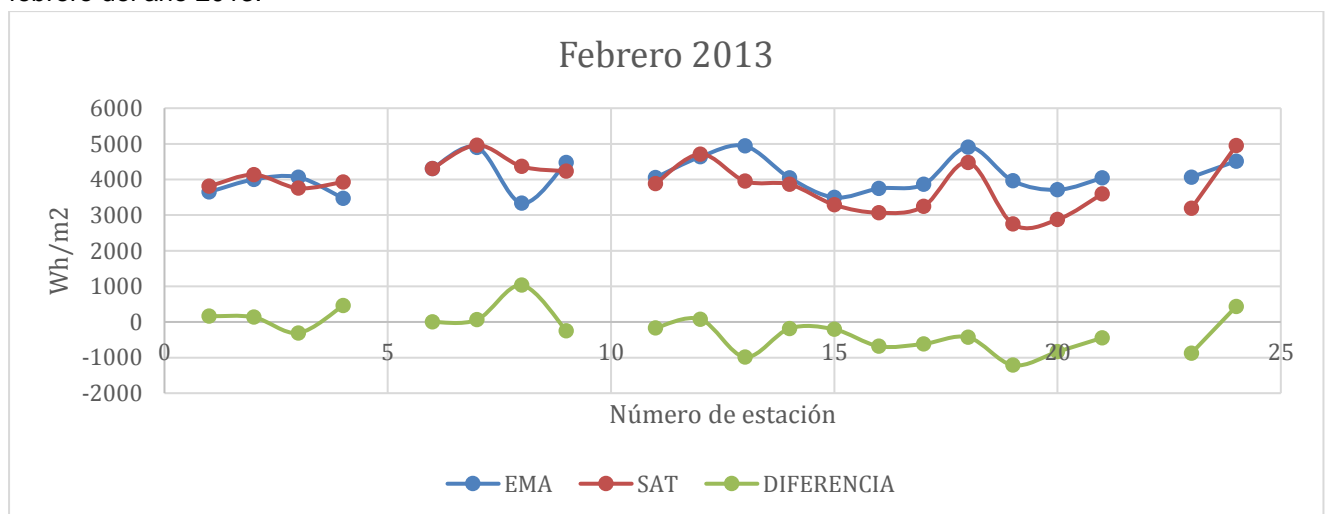


Gráfica 1. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de enero del año 2013.

• Febrero 2013

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	86167,95
Acaponeta	1	3648,88	3811,39	162,51	suma SAT	81334,41
Cd Cuauhtémoc	2	3998,54	4130,91	132,37	promedio diferencia	-230,17
Cd Delicias	3	4061,76	3753,28	-308,48	error relativo	-5,61
Cd Mante	4	3469,61	3930,63	461,02	error absoluto	-4833,54
Cuatro Ciénegas	5				RMSE	560,605
El vergel	6	4303,06	4303,5	0,44		
Huichapan	7	4900,73	4963,77	63,04		
Ixtlán del Río	8	3333,91	4365,25	1031,34		
Jaumave	9	4477,7	4231,68	-246,02		
José María Morelos	10					
La flor	11	4050,57	3882,41	-168,16		
La florida	12	4635,04	4712,91	77,87		
Miahuatlán	13	4938,49	3953,93	-984,56		
Monclova	14	4044,29	3861,25	-183,04		
Nogales	15	3495,38	3288,68	-206,7		
Nueva Rosita	16	3745,17	3064,07	-681,1		
Ojinaga	17	3860,94	3244,28	-616,66		
San Juan de Guadalupe	18	4910,96	4478,54	-432,42		
San Luis Río Colorado	19	3960,39	2747,63	-1212,76		
Sonoyita	20	3708,92	2872,54	-836,38		
Tantaquín	21	4042,09	3596,17	-445,92		
Tres Marías	22					
Villagrán	23	4065,76	3191,08	-874,68		
Zimapan	24	4515,76	4950,51	434,75		

Tabla 4. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de febrero del año 2013.

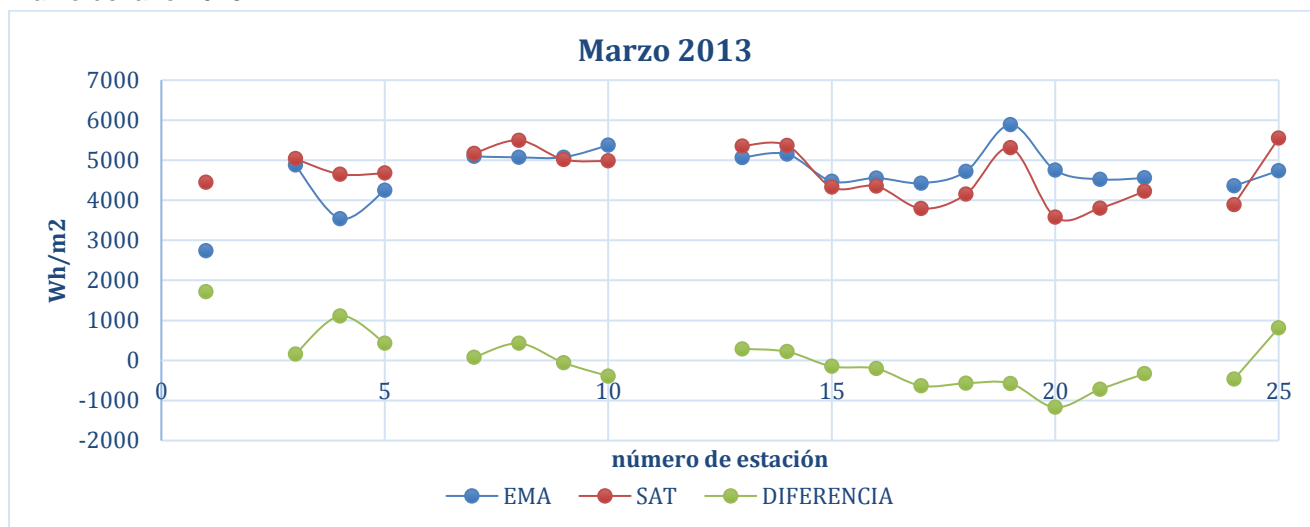


Gráfica 2. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de febrero del año 2013.

• Marzo 2013

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	93226,64
Acaponeta	1	2735,82	4450,67	1714,85	suma SAT	93193,21
Atoyac	2				promedio diferencia	-1,67
Cd Cuauhtén	3	4879,12	5036,46	157,34	error relativo	-0,04
Cd Delicias	4	3539,94	4651,34	1111,4	error absoluto	-33,43
Cd Mante	5	4247,06	4677,57	430,51	RMSE	649,83
Cuatro Ciéne	6					
El vergel	7	5095,02	5169,64	74,62		
Huichapan	8	5071,87	5498,67	426,8		
Ixtlán del Río	9	5076,11	5018,92	-57,19		
Jaumave	10	5374,25	4983,11	-391,14		
José María M	11					
La flor	12					
La florida	13	5064,45	5353,01	288,56		
Miahuatlán	14	5151,55	5370,39	218,84		
Monclova	15	4475,22	4327,63	-147,59		
Nogales	16	4555,48	4350,14	-205,34		
Nueva Rosita	17	4428,9	3796,24	-632,66		
Ojinaga	18	4720,69	4150,57	-570,12		
San Juan de C	19	5884,12	5308,83	-575,29		
San Luis Río C	20	4750,75	3579,28	-1171,47		
Sonoyita	21	4522,38	3801,95	-720,43		
Tantaquín	22	4557,11	4224,31	-332,8		
Tres Marías	23					
Villagrán	24	4359,72	3891,76	-467,96		
Zimapan	25	4737,08	5552,72	815,64		

Tabla 5. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de marzo del año 2013.

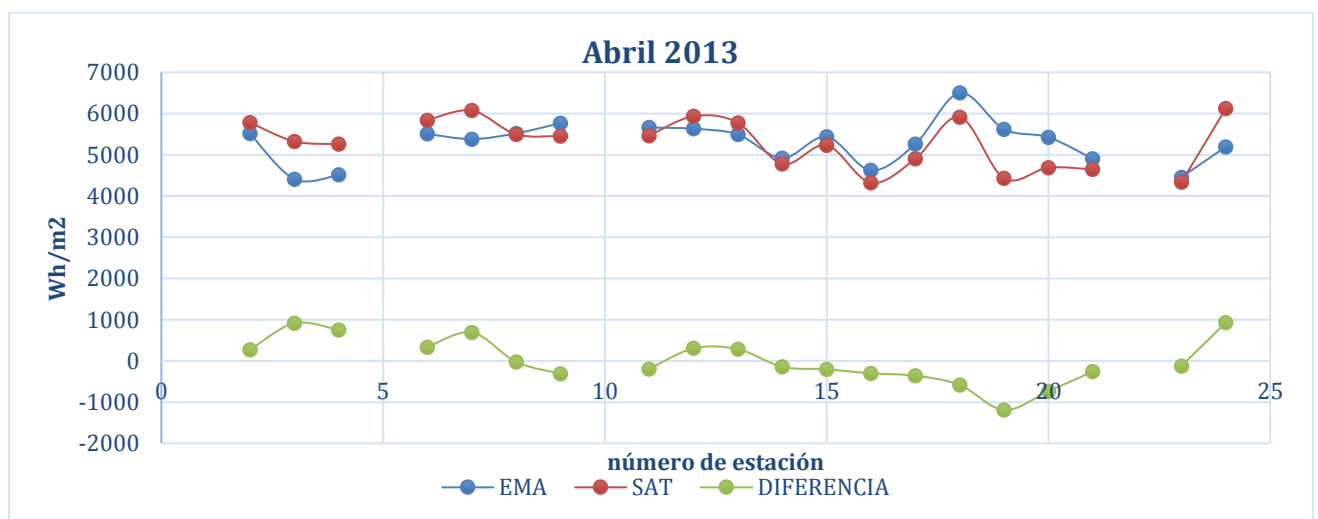


Gráfica 3. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de marzo del año 2013.

• Abril 2013

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	105730,74
Acaponeta	1				suma SAT	105767,8
Cd Cuauhtémoc	2	5514,39	5781,95	267,56	promedio diferencia	1,85
Cd Delicias	3	4408,81	5324,51	915,7	error relativo	0,04
Cd Mante	4	4511,79	5258,93	747,14	error absoluto	37,06
Cuatro Ciénegas	5				RMSE	529,79
El vergel	6	5507,03	5838,64	331,61		
Huichapan	7	5380,63	6072,92	692,29		
Ixtlán del Río	8	5520,03	5494,57	-25,46		
Jaumave	9	5766,73	5457,63	-309,1		
José María Morelos	10					
La flor	11	5661,29	5464,07	-197,22		
La florida	12	5631,65	5935,99	304,34		
Miahuatlán	13	5491,23	5774,79	283,56		
Monclova	14	4919,8	4777,63	-142,17		
Nogales	15	5435,69	5231,51	-204,18		
Nueva Rosita	16	4622,59	4319,78	-302,81		
Ojinaga	17	5260,89	4901,37	-359,52		
San Juan de Guadalupe	18	6499,94	5915,73	-584,21		
San Luis Río Colorado	19	5620,12	4429,22	-1190,9		
Sonoyita	20	5425,23	4688,62	-736,61		
Tantaquín	21	4902,62	4644,39	-258,23		
Tres Marías	22					
Villagrán	23	4457,06	4334,07	-122,99		
Zimapan	24	5193,22	6121,48	928,26		

Tabla 6. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de abril del año 2013.

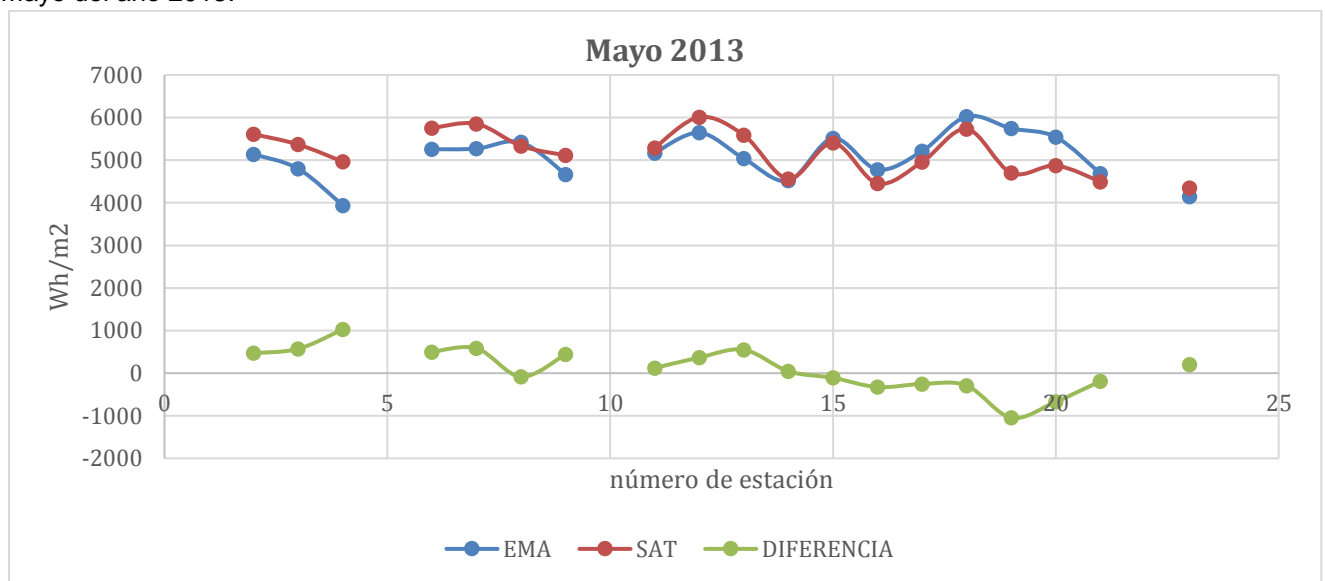


Gráfica 4. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de abril del año 2013.

• Mayo

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	96508,03
Acaponeta	1				suma SAT	98412,14
Cd Cuauhtém	2	5137,59	5608,36	470,77	promedio diferencia	100,22
Cd Delicias	3	4799,26	5369,19	569,93	error relativo	1,97
Cd Mante	4	3938,83	4964,94	1026,11	error absoluto	1904,11
Cuatro Ciéne	5				RMSE	486,45
El vergel	6	5257,09	5753,14	496,05		
Huichapan	7	5270,32	5854,41	584,09		
Ixtlán del Ric	8	5419,64	5334,82	-84,82		
Jaumave	9	4666,88	5112,22	445,34		
José María M	10					
La flor	11	5170,74	5289,24	118,5		
La florida	12	5644,74	6011,62	366,88		
Miahuatlán	13	5038,5	5587,12	548,62		
Monclova	14	4518,36	4562,48	44,12		
Nogales	15	5512,56	5404,08	-108,48		
Nueva Rosita	16	4780,28	4453,25	-327,03		
Ojinaga	17	5211,77	4958,57	-253,2		
San juan de C	18	6024	5731,49	-292,51		
San Luis Río C	19	5745,99	4700,13	-1045,86		
Sonoyita	20	5543,03	4872,61	-670,42		
Tantaquín	21	4683,18	4494,64	-188,54		
Tres Marías	22					
Villagrán	23	4145,27	4349,83	204,56		

Tabla 7. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de mayo del año 2013.

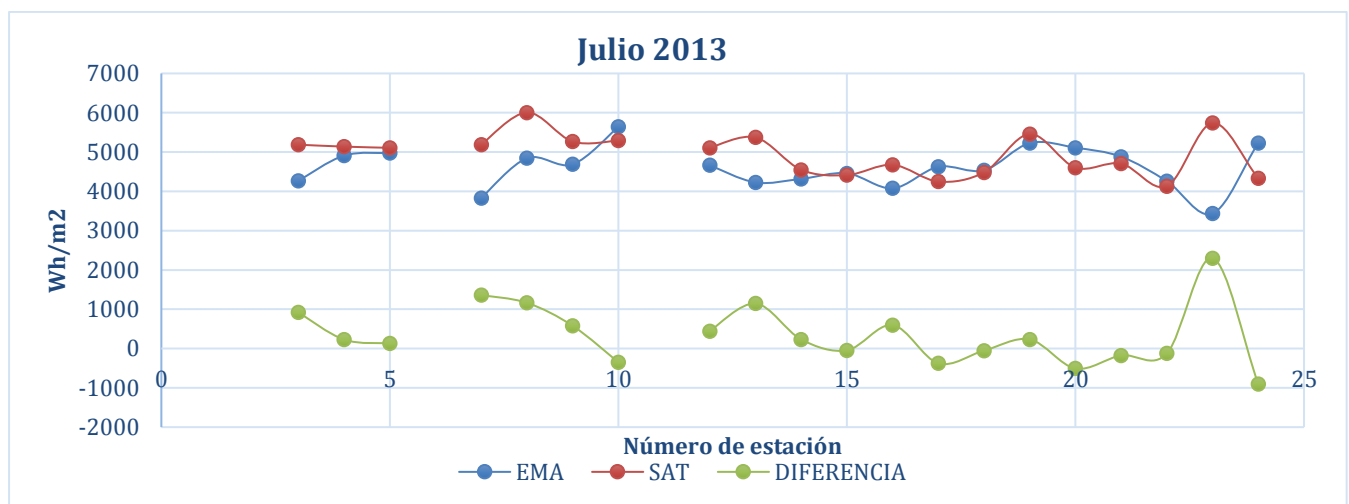


Gráfica 5. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de mayo del año 2013.ñ

- Julio 2013

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	92210,11
Acaponeta	1				suma SAT	99004,66
Atoyac	2				promedio diferencia	339,73
Cd Cuauhtémoc	3	4267,8	5187,22	919,42	error relativo	7,37
Cd Delicias	4	4911,06	5137,67	226,61	error absoluto	6794,55
Cd Mante	5	4972,99	5106,87	133,88	RMSE	789,96
Cuatro Ciénegas	6					
El vergel	7	3831,33	5189,59	1358,26		
Huichapan	8	4844,03	6006,52	1162,49		
Ixtlán del Río*	9	4687,7	5265,68	577,98		
Jaumave	10	5646,25	5294,72	-351,53		
José María Morelos	11					
La flor	12	4663,88	5109,06	445,18		
La florida	13	4225,9	5371,82	1145,92		
Miahuatlán	14	4316,95	4547,01	230,06		
Monclova	15	4458,85	4414,3	-44,55		
Nogales	16	4077,12	4674,08	596,96		
Nueva Rosita	17	4624,13	4248,64	-375,49		
Ojinaga	18	4536,46	4483,66	-52,8		
San Juan de Guadalupe	19	5227,2	5458,29	231,09		
San Luis Río Colorado	20	5110,13	4603,11	-507,02		
Sonoyita	21	4881,16	4704,65	-176,51		
Tantaquín	22	4257,15	4133,43	-123,72		
Tres Marías	23	3437,05	5738,6	2301,55		
Villagrán	24	5232,97	4329,74	-903,23		

Tabla 8. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de julio del año 2013.

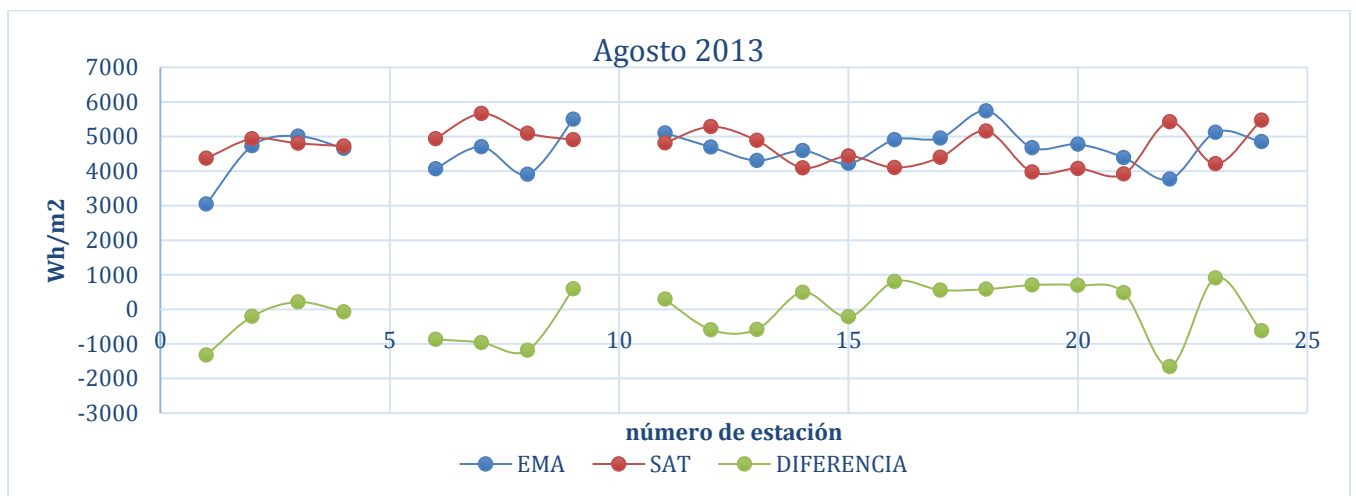


Gráfica 6. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de julio del año 2013.

• Agosto

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	101697,51
Acaponeta	1	3046,47	4370,74	-1324,27	suma SAT	103647,62
Cd Cuauhtén	2	4726,83	4932,44	-205,61	promedio diferencia	-88,64
Cd Delicias	3	5012,65	4800,61	212,04	error relativo	1,92
Cd Mante	4	4652,87	4725,1	-72,23	error absoluto	1950,11
Cuatro Ciéne	5				RMSE	763,51
El vergel	6	4062,49	4929,62	-867,13		
Huichapan	7	4700,76	5662,31	-961,55		
Ixtlán del Ric	8	3907,99	5095,03	-1187,04		
Jaumave	9	5499,92	4907,42	592,5		
José María M	10					
La flor	11	5102,53	4809,78	292,75		
La florida	12	4694,46	5281,74	-587,28		
Miahuatlán	13	4304,99	4885,19	-580,2		
Monclova	14	4589,9	4095,93	493,97		
Nogales	15	4218,53	4434,22	-215,69		
Nueva Rosita	16	4906,8	4101,06	805,74		
Ojinaga	17	4955,67	4395,27	560,4		
San juan de C	18	5741,33	5155,99	585,34		
San Luis Río C	19	4676,28	3973,26	703,02		
Sonoyita	20	4772,45	4076,44	696,01		
Tantaquín	21	4391,63	3912,38	479,25		
Tres Marías	22	3763,94	5422,55	-1658,61		
Villagrán	23	5119,2	4207,64	911,56		
Zimapan	24	4849,82	5472,9	-623,08		

Tabla 9. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de agosto del año 2013.

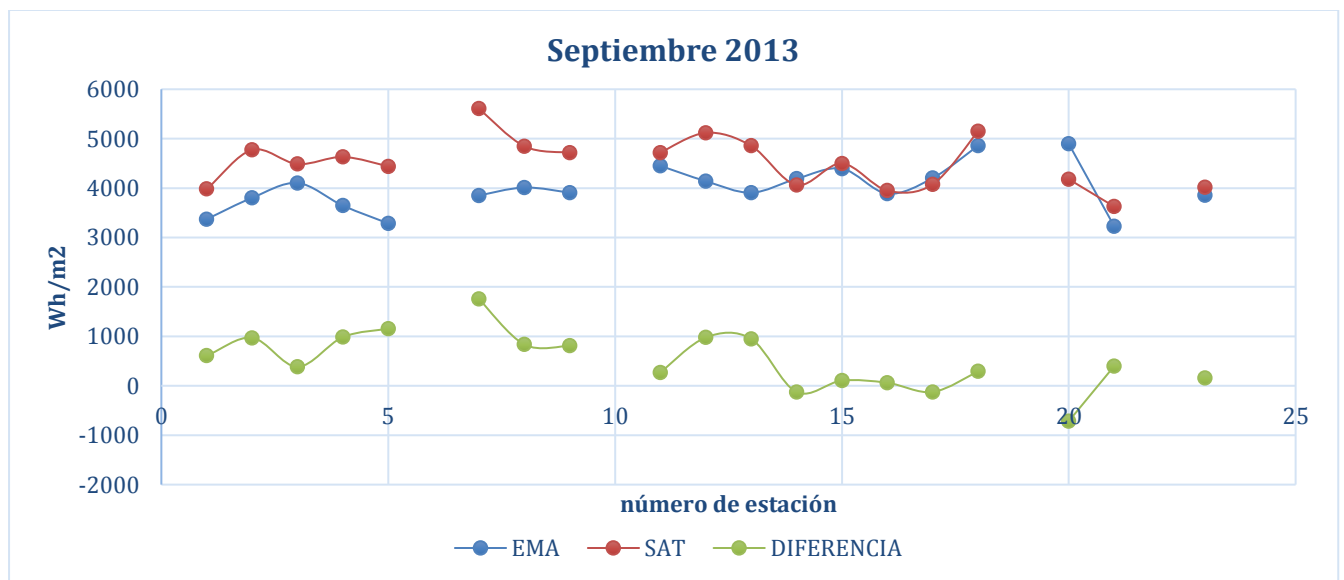


Gráfica 7. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de agosto del año 2013.

• Septiembre 2013

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	75996,08
Acaponeta	1	3371,64	3982,48	610,84	suma SAT	85744,06
Cd Cuauhtém	2	3802,97	4772,9	969,93	promedio diferencia	513,05
Cd Delicias	3	4102,76	4487	384,24	error relativo	12,83
Cd Mante	4	3646,19	4630,83	984,64	error absoluto	9747,98
Cuatro Ciéne	5	3286,84	4440	1153,16	RMSE	759,76
El vergel	6					
Huichapan	7	3850,26	5609,55	1759,29		
Ixtlán del Ric	8	4012,77	4847,11	834,34		
Jaumave	9	3906,64	4718,94	812,3		
José María M	10					
La flor	11	4450,47	4718,72	268,25		
La florida	12	4140,97	5119,24	978,27		
Miahuatlán	13	3907,74	4855,98	948,24		
Monclova	14	4189,09	4062,93	-126,16		
Nogales	15	4393,36	4497,78	104,42		
Nueva Rosita	16	3889,76	3950,09	60,33		
Ojinaga	17	4202,1	4076,87	-125,23		
San Juan de C	18	4858,73	5150,74	292,01		
San Luis Río C	19					
Sonoyita	20	4896,24	4179,89	-716,35		
Tantaquín	21	3229,61	3627,12	397,51		
Tres Marías	22					
Villagrán	23	3857,94	4015,89	157,95		

Tabla 10. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de septiembre del año 2013.

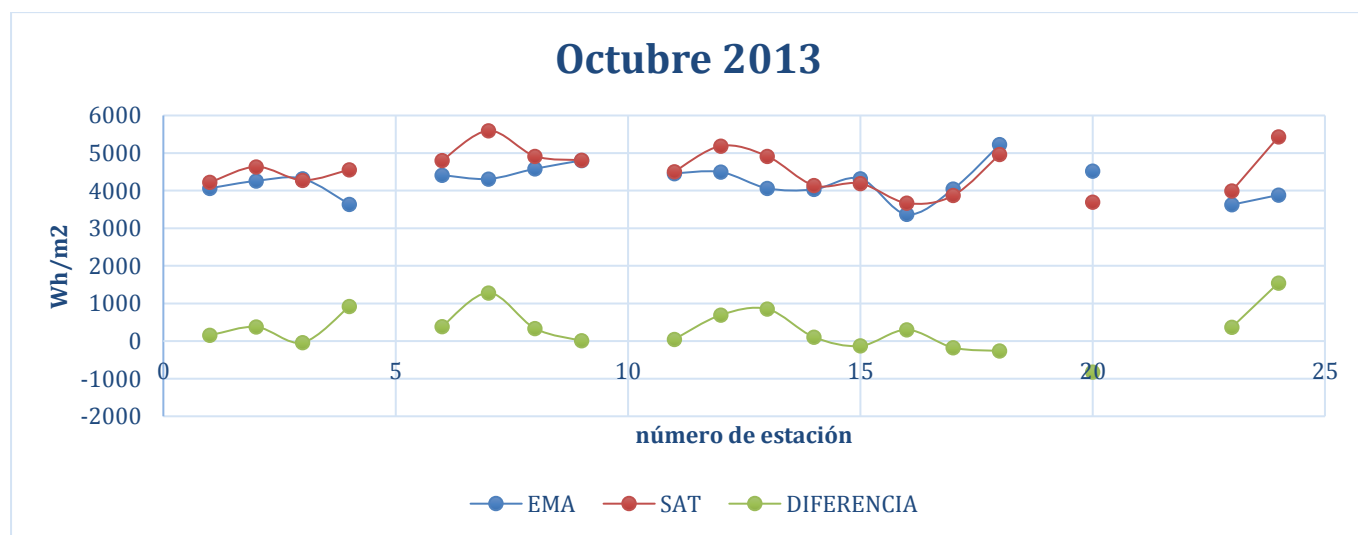


Gráfica 8. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de septiembre del año 2013.

• Octubre

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	80452,08
Acaponeta	1	4066,7	4224,45	157,75	suma SAT	86414,91
Cd Cuauhtémoc	2	4260,84	4635,57	374,73	promedio diferencia	313,83
Cd Delicias	3	4316,56	4278,83	-37,73	error relativo	7,41
Cd Mante	4	3639,88	4560,43	920,55	error absoluto	5962,83
Cuatro Ciénes	5				RMSE	630,68
El vergel	6	4416,11	4802,52	386,41		
Huichapan	7	4312,87	5596,41	1283,54		
Ixtlán del Río	8	4584,2	4918,15	333,95		
Jaumave	9	4803,46	4812,87	9,41		
José María Morelos	10					
La flor	11	4458,94	4506,74	47,8		
La florida	12	4495,3	5190,11	694,81		
Miahuatlán	13	4063,88	4915,36	851,48		
Monclova	14	4034,26	4142,2	107,94		
Nogales	15	4319,76	4191,38	-128,38		
Nueva Rosita	16	3370,09	3670,27	300,18		
Ojinaga	17	4046,24	3871,92	-174,32		
San Juan de los Ríos	18	5228,44	4967,78	-260,66		
San Luis Río Colorado	19					
Sonoyita	20	4521,32	3698,75	-822,57		
Tantaquín	21					
Tres Marías	22					
Villagrán	23	3628,1	3998,68	370,58		
Zimapan	24	3885,13	5432,49	1547,36		

Tabla 11. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de octubre del año 2013.

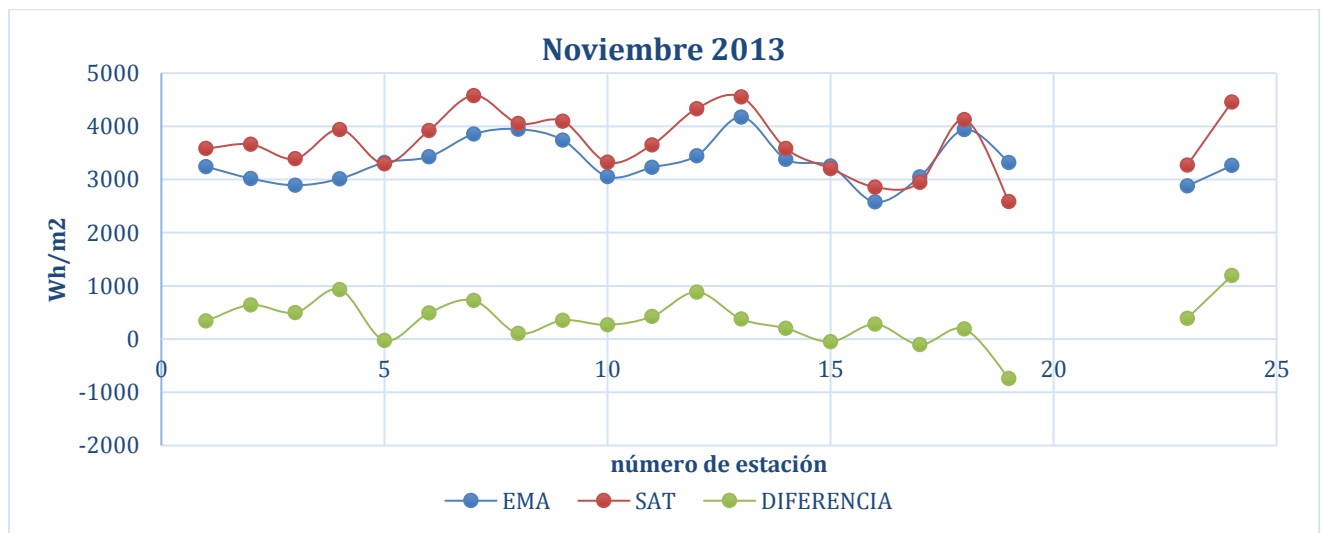


Gráfica 9. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de octubre del año 2013.

Noviembre

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	70014,69
Acaponeta	1	3241,54	3580,84	339,3	suma SAT	77401,42
Cd Cuauhtémoc	2	3019,88	3660,81	640,93	promedio diferencia	351,75
Cd Delicias	3	2890,73	3388,79	498,06	error relativo	10,55
Cd Mante	4	3011,7	3940,86	929,16	error absoluto	7386,73
Cuatro Ciéngas	5	3317,66	3293,5	-24,16	RMSE	535,44
El vergel	6	3427,54	3920,82	493,28		
Huichapan	7	3853,09	4578,65	725,56		
Ixtlán del Río	8	3946,84	4055,05	108,21		
Jaumave	9	3740,58	4095,04	354,46		
José María Morelos	10	3055,14	3322,34	267,2		
La flor	11	3226,28	3650,62	424,34		
La florida	12	3445,96	4331,78	885,82		
Miahuatlán	13	4174,81	4551,77	376,96		
Monclova	14	3381,21	3583,11	201,9		
Nogales	15	3254,43	3204,78	-49,65		
Nueva Rosita	16	2577,41	2856,83	279,42		
Ojinaga	17	3048,08	2945,06	-103,02		
San Juan de Guadalupe	18	3938,38	4127,11	188,73		
San Luis Río Colorado	19	3321,86	2583,52	-738,34		
Sonoyita	20					
Tantaquín	21					
Tres Marías	22					
Villagrán	23	2879,15	3271,67	392,52		
Zimapan	24	3262,42	4458,47	1196,05		

Tabla 12. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de noviembre del año 2013.

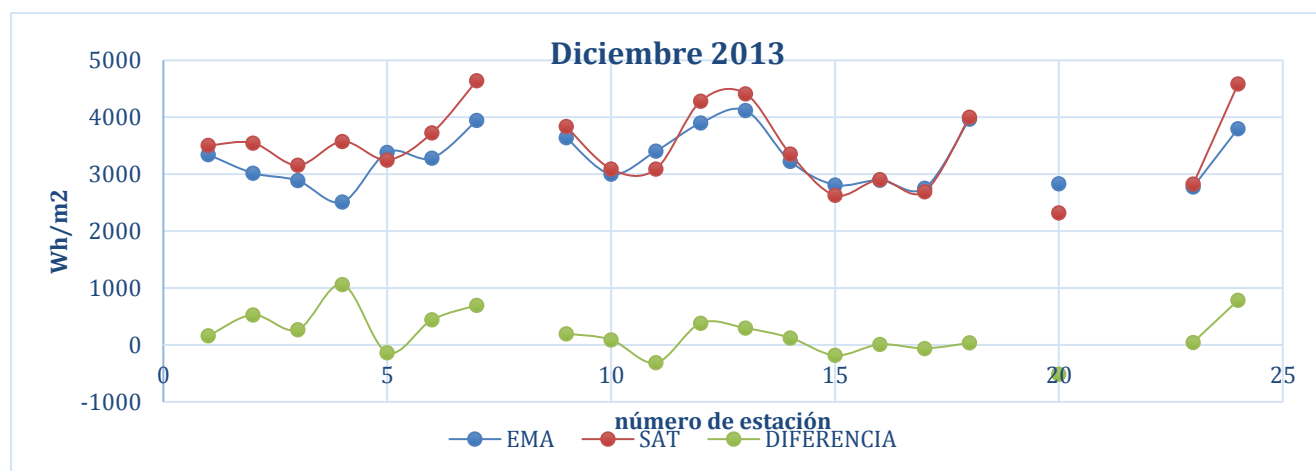


Gráfica 10. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de noviembre del año 2013.

• Diciembre 2013

		EMA	SAT	DIFERENCIA	suma EMA	65509,65
Acaponeta	1	3345,03	3505,41	160,38	suma SAT	69431,83
Cd Cuauhtémoc	2	3019,88	3547,41	527,53	promedio diferencia	196,11
Cd Delicias	3	2886,28	3156,17	269,89	error relativo	5,99
Cd Mante	4	2511,78	3574,23	1062,45	error absoluto	3922,18
Cuatro Ciénegas	5	3385,09	3251,02	-134,07	RMSE	419,47
El vergel	6	3282,41	3723,56	441,15		
Huichapan	7	3946,67	4644,18	697,51		
Ixtlán del Río*	8					
Jaumave	9	3641,76	3838,1	196,34		
José María Morelos	10	3000	3090,97	90,97		
La flor	11	3403,72	3090,97	-312,75		
La florida	12	3898,82	4282,16	383,34		
Miahuatlán	13	4119,88	4414,43	294,55		
Monclova	14	3228,32	3353,81	125,49		
Nogales	15	2812,67	2629,65	-183,02		
Nueva Rosita	16	2894,88	2903,73	8,85		
Ojinaga	17	2753,31	2693,12	-60,19		
San Juan de Guadalupe	18	3968,46	4004,14	35,68		
San Luis Río Colorado	19					
Sonoyita	20	2832,34	2318,83	-513,51		
Tantaquín	21					
Tres Marías	22					
Villagrán	23	2779	2825,82	46,82		
Zimapan	24	3799,35	4584,12	784,77		

Tabla 13. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de diciembre del año 2013.



Gráfica 11. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y las estaciones EMA para el mes de diciembre del año 2013.

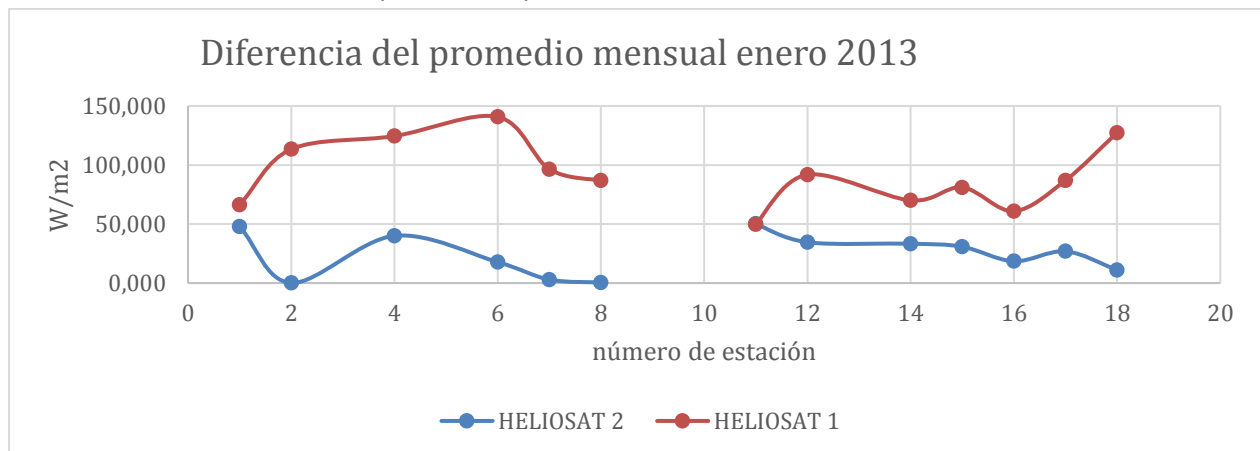
4.1 Comparación Heliosat 2 y Heliosat 1

Se hizo una comparación de los resultados de Heliosat 1 con los de Heliosat 2, usando las mismas estaciones de validación y valores en W/m^2 para hacerlos equivalentes, podemos darnos cuenta, como se muestra a continuación, que en ambos meses el error disminuyó en Heliosat 2.

En enero tenemos una diferencia promedio entre ambos métodos de $67 W/m^2$ y para el mes de agosto tenemos una diferencia de $31 W/m^2$.

		Diferencia	
		HELIOSAT 2	HELIOSAT 1
Bahía de los ángeles	1	47,864	66,33
Cd. Delicias	2	0,183	113,35
Constitución	4	40,032	124,5
Huamantla	6	17,740	140,79
Huichipan	7	2,991	96,5
Ixtlan del río	8	0,564	86,95
Los Petenes	9		
Mexicali	11	50,287	49,75
Miahuatlan	12	34,601	91,83
Nogales	14	33,343	70,05
Nueva Rosita	15	30,777	81,05
San Quintín	16	18,511	60,95
Tizimin	17	26,873	86,96
Yohaltum	18	11,118	127,35

Tabla 13. Diferencia Heliosat 1 y Heliosat 2 para el mes de enero del año 2013

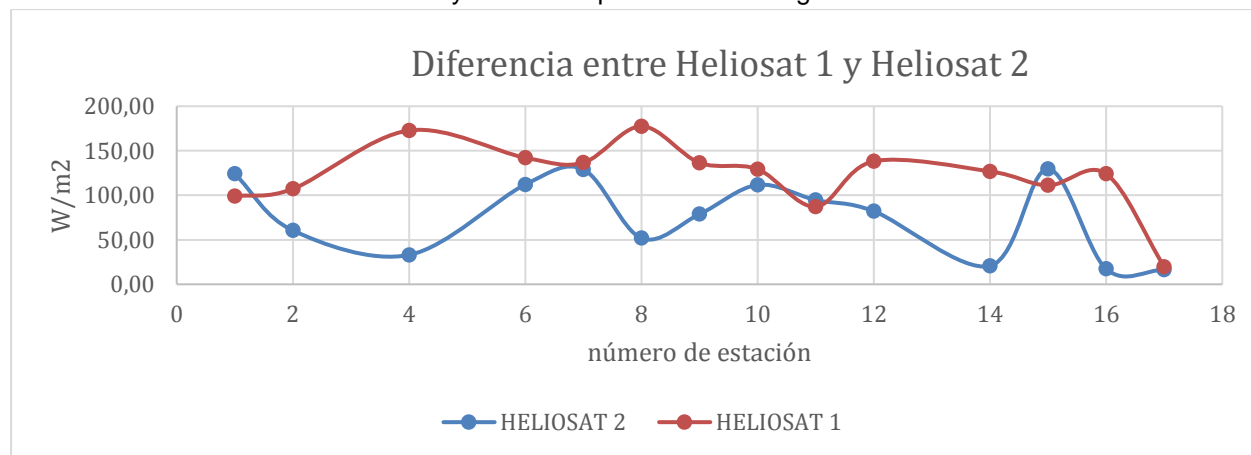


Gráfica 12. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y Heliosat 1 para el mes de enero del año 2013.

Heliosat 2 **24,222**
 Heliosat 1 **92,021**

		Diferencia	
		HELIOSAT 2	HELIOSAT 1
Bahía de los ángeles	1	124,09	98,91
Cd. Delicias	2	60,52	107,21
Constitución	4	33,02	172,8
Huamantla	6	112,11	142,14
Huichipan	7	129,02	136,74
Ixtlan del río	8	51,83	177,53
Los Petenes	9	78,78	136,52
Los Tuxtlas I	10	111,67	129,28
Mexicali	11	94,71	87,25
Miahuatlan	12	82,11	138,2
Nogales	14	20,72	126,86
Nueva Rosita	15	129,48	111,15
San Quintín	16	17,37	124,09
Tizimin	17	16,28	19,65
Yohaltum	18	275,47	99,1

Tabla 14. Diferencia entre Heliosat 1 y Heliosat 2 para el mes de agosto de 2013.



Gráfica 13. Comparación de valores entre los resultados de Heliosat 2 y Heliosat 1 para el mes de agosto del año 2013

Heliosat 1 **120,495**
 Heliosat 2 **89,144**

5 Conclusiones

Al hacer la validación de datos con la comparación de estaciones en superficie, se tiene un promedio de error relativo anual de 5.77% lo cual para modelos de estimación de la radiación solar es aceptable y es comparable con estaciones de débil calibración y mantenimiento.

El error que la aplicación muestra, es una suma del error propio del modelo, pero además tenemos que tener en consideración que a pesar de que se usaron las estaciones que podrían estar en mejores condiciones con base en estudios previos del laboratorio de radiación solar de la UNAM, estas estaciones en superficie tienen errores en los datos a causa del mal mantenimiento y posicionamiento, por lo que el error presentado en nuestros resultados es una suma de ambos.

El uso de una constante solar diaria y no una promedio, hace que no tengamos efectos debido a los cambios diarios de dicho valor.

El índice de nubosidad, como se mencionó a lo largo de este trabajo, es el parámetro clave del modelo así que relacionarlo con meses con mayor cantidad de días con lluvia es de vital importancia. En México se sabe que los meses de mayor lluvia son los de verano, así que al observar que los errores más grandes se encuentran en los meses de julio y septiembre se relacionó con los mapas de acumulación de agua debido a las precipitaciones, como lo informa el SMN en su página de internet <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>, como resultado tenemos que estos tres meses fueron los más lluviosos en ese año por lo que era de esperarse que el modelo tuviera errores más grandes.

Para poder tener estimaciones más cercanas a las reales es necesario tomar un factor de turbidez que no esté promediado mensualmente, así como tener más valores de este a lo largo de todo el país.

Podemos observar que la estimación de valores con Heliosat 2 nos da mejores valores de implementación que Heliosat 1.

Se recomienda que para estudios posteriores se usen años en que la Red Solarimétrica Mexicana tenga datos de estaciones calibradas, ya que es de vital importancia para la correcta validación de datos estimados con modelos, como lo es Heliosat 2.

Simbología

- O : valores extraterrestres
- g : valores a nivel del suelo
- c : valores de cielo claro
- b : valores de cielo nublado
- λ : valores espectrales
- L : radiancia ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}$)
- G : irradiancia global
- D : componente de irradiación difusa
- I : irradiancia directa normal o irradiación
- B : irradiación directa
- G_{on} Radiación extraterrestre incidente en un plano normal a la radiación de n días
- Valores de intervalos de tiempo de irradiación
- h : valores horarios
- d : valores diarios
- m : valores mensuales
- notas de irradiancia e irradiación:
 - $G_{0t}(i,j)$: irradiancia horizontal fuera de la atmosfera para el tiempo t y el pixel (i, j) . $G_{0t}(i,j) = I_0 \epsilon(t) \sin \gamma_S(t,i,j)$. Expresado en $W\ m^{-2}$.
 - $G_{0h}(i,j)$: irradiación horizontal fuera de la atmosfera para la hora h y el pixel (i, j) . Expresado en $W\ h\ m^{-2}$.
 - $G_{0d}(i,j)$: irradiación diaria fuera de la atmosfera para el día d y el pixel (i, j) . Expresado en $W\ h\ m^{-2}$.
- t : el tiempo.
- θ_S : ángulo cenital.
- γ_S : elevación del sol en el tiempo t , también llamada altitud solar. γ_S es 0° salida del sol y al atardecer. $\theta_S = \pi/2 - \gamma_S$
- α : ángulo azimutal del sol.
- I_0 : constante solar igual a $1367\ W.m^{-2}$.

- $I_0\lambda$: distribución espectral de la radiación solar fuera de la atmosfera
- ϵ : valor usado por la variación de distancia de la tierra y el sol.
- δ : declinación
Valores máximos y mínimos de declinación son $+23^\circ 27'$ and $-23^\circ 27'$.
- Dl : la duración del día. 24 horas o 86400 segundos.
- Ángulo horario del sol, ω ,

Bibliografía

- 1- Albarelo T., Marie-Joseph I., Primerose A., Seyler F., Wald L., Linguet L., 2015, *Optimizing the Heliosat 2 Method for Surface solar irradiation estimation with GOES images*, Canadian Journal of Remote Sensing, 41:2, 86-100.
- 2- Calibración de imágenes GOES 13
<http://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/calibration/goes-vis-ch-calibration>.
- 3- Cano D., Monget J., Albuissou M., Guillard H., Regas N., Wald L., 1986, *A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data*, Solar Energy Vol. 37, No. 1, pp 1986, Estados Unidos de Norte America.
- 4- Chuvieco E., 1995, Fundamentos de teledetección espacial, Ediciones Rialp, Madrid, España.
- 5- Claus Flohlich, 2012, *Solar constant and solar irradiance variations*, Nueva York, Estados Unidos de Norte América.
- 6- Cuahutle M., 2016, Estimación de la radiación solar global a partir de imágenes de satélite, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 7- Diabaté, L. G. (1989). *Description of an operational tool for determining global solar radiation at ground using geostationary satellite images*.
- 8- Duffie J., Beckman W., 2013, *Solar Engineering of the Thermal Processes*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 4 edición, Estados Unidos de Norte América.
- 9- Estaciones Meteorológicas Automáticas, Servicio Meteorológico Nacional.
<http://smn.cna.gob.mx/es/emas>
- 10- Mapas de lluvias para el año 2013 en México
<https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- 11- Descripción de la misión de los satélites GOES.
https://www.nasa.gov/mission_pages/goes-n/media/goes-east.html
- 12- Iqbal M., 1983 *An Introduction to solar radiation*, Department of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.

- 13-Jenkins J. *Observing the sun*, Springer, Astronomer's pocket field guide, Homer, IL USA.
- 14-Kasten F., Young A., 1989, *Revised optical air mass tables and approximation formula*, Appl. Opt. 28. 4735-4738.
- 15-Khorram S., Koch F., Van der Wiele C., Nelson S., 2012, *Remote Sensing*, Springer, University of Carolina, Estados Unidos de Norte América.
- 16-Lefèvre M., Albuisson L., 2002, *Description of the software Heliosat II for the conversion of the images acquired by meteosat satellites in the visible band into maps of solar radiation available of ground level*, Ecole des Mines de Paris, France.
- 17-Lefèvre M., Blanc P., Espinar B., Gschwind B., Ménard L., 2014 *The HelioClim-1 database of daily solar radiation at Earth Surface an example of the benefits of GEOSS Data-CORE*, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE, pp. 1745-1753.
- 18-Maldonado I., Ruiz R., Fuentes M., 2010, Manual de operaciones de estaciones meteorológicas automáticas, 15-18, Chillan, Chile.
- 19-Neckel H. Labs D., 1984, *The solar radiation between 3300 and 12500 A, solar physics* 90. 205.
- 20- Olcoz A. Solano M. 2014, Tesis de grado, Implementación del método Heliosat para la estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite, Universidad Pública de Navarra, Pamplona España.
- 21-Remund J., Domeisen D., 2010, *Aerosol optical depth and linke turbidity climatology*, *Solar Heating & Cooling Programme, International Energy Agency*.
- 22-Rigollier C., Bauer O., Wald L., O., 2000, *On the solar clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat Method*. *Solar Energy*, 68(1), 33-48.
- 23-Taddei F., Melendez S., Cuestas Y., Collel E., 2014, Resultados preliminares de la aplicación del algoritmo Heliosat II para la estimación de la irradiación solar global a partir de imágenes satelitales GOES 13 en la región de la Pampa Húmeda Argentina, Universidad Nacional de Lujan, Buenos Aires, Argentina.

- 24-Valdes M., Riveros D., Aranciba A., Bonifaz R., 2013, *The solar Resource Assessment in Mexico: state of the arte*, ISES Solar Word Congress, University of Florida USA.
- 25-Wald L., Monget J. M 1983^a, 2010, *Sea surface winds from glitter observations*. *Journal of Geophysical Research*, 88, C4, 2547-2555.

Anexo 1 Gráficas de regresión lineal

A continuación se muestran las gráficas de las regresiones lineales para cada uno de los 11 meses usados en este trabajo.

Enero

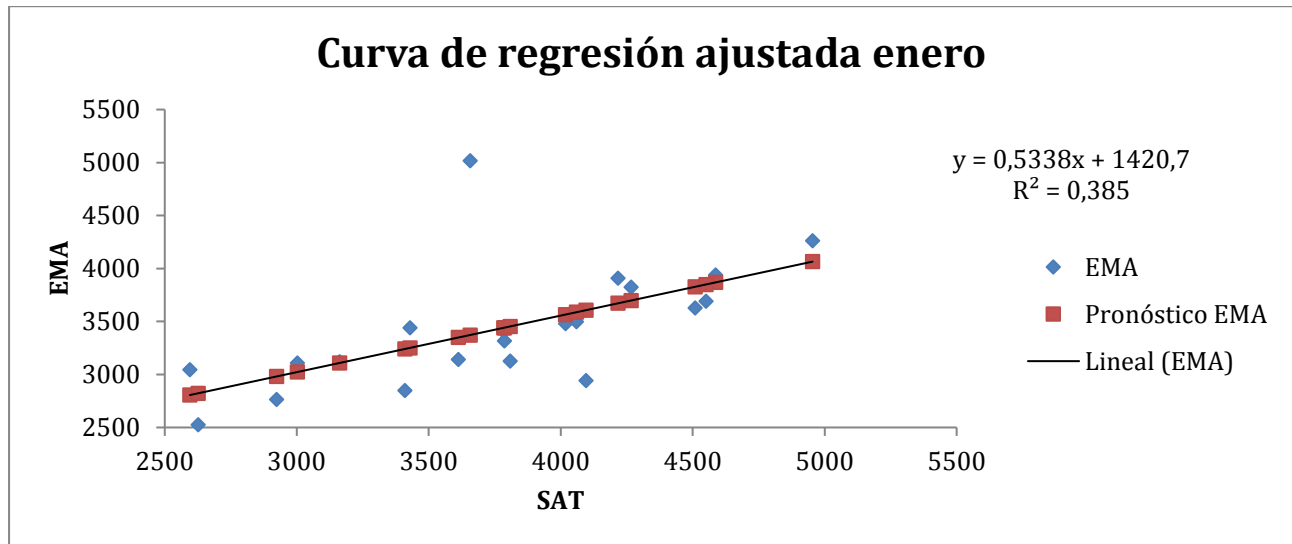


Ilustración 1: curva de regresión ajustada para el mes de enero del 2013.

Febrero

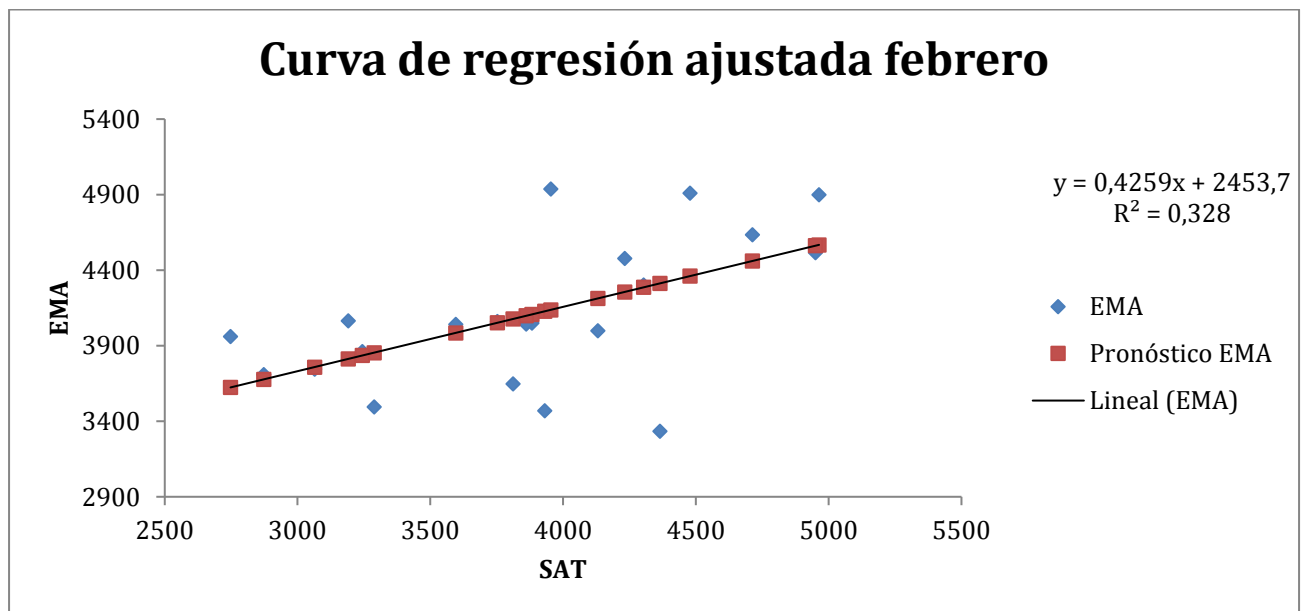


Ilustración 2: curva de regresión ajustada para el mes de febrero del 2013.

Marzo

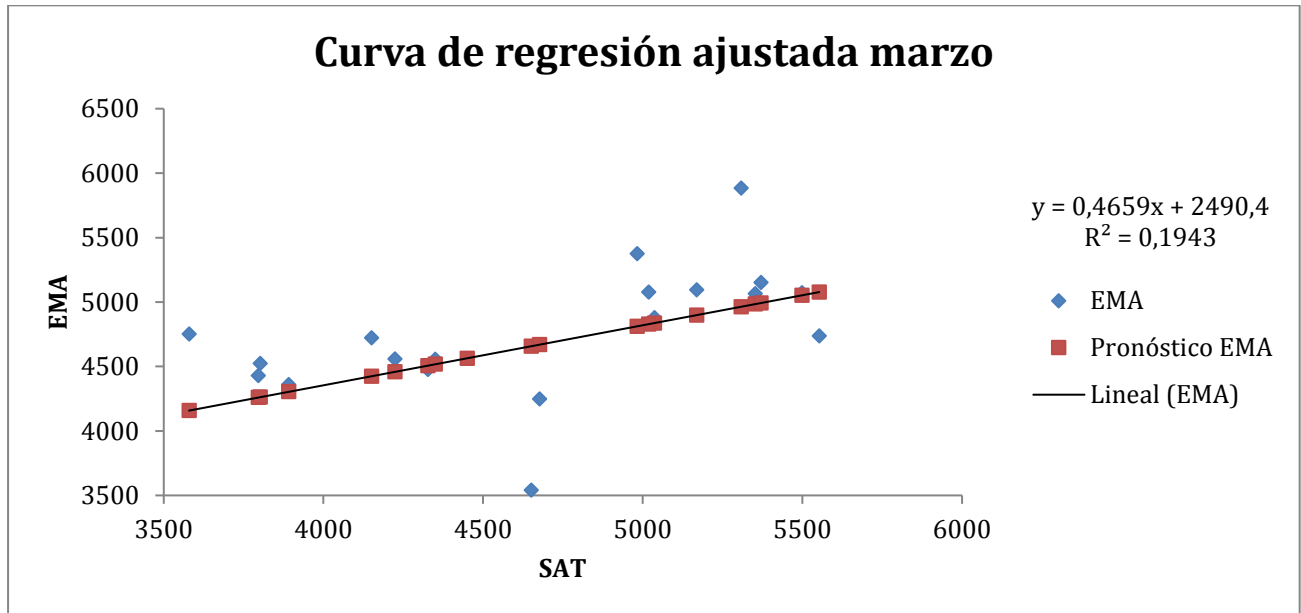


Ilustración 3: curva de regresión ajustada para el mes de marzo del 2013.

Abril

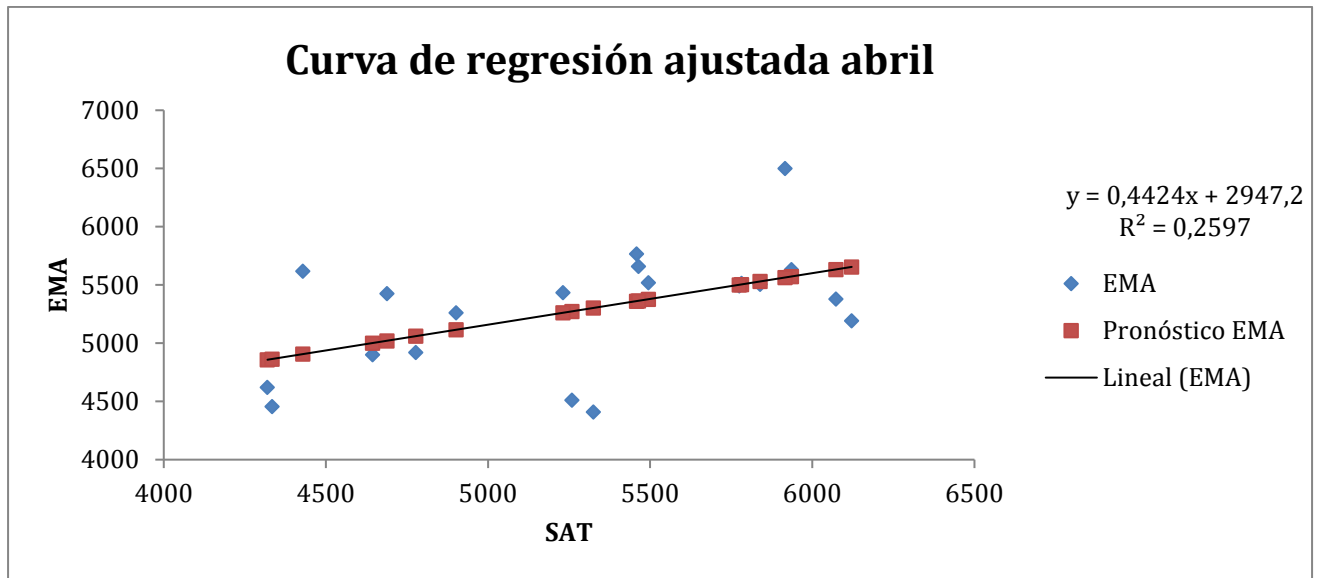


Ilustración 4: curva de regresión ajustada para el mes de abril del 2013.

Mayo

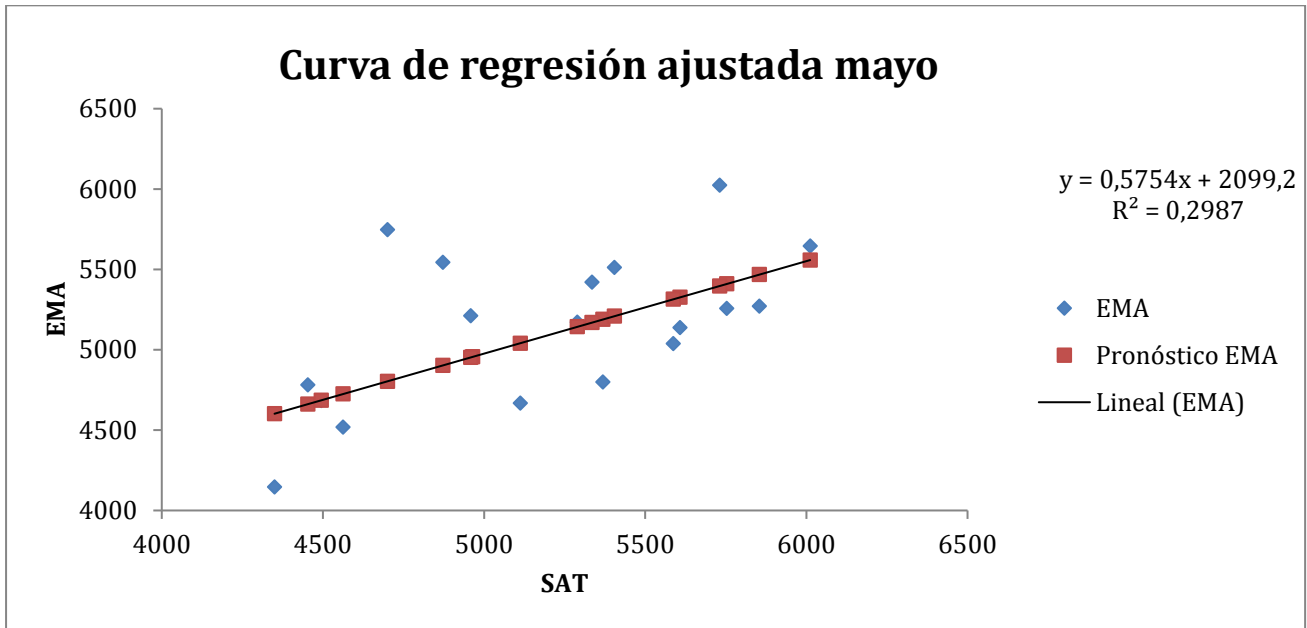


Ilustración 5: curva de regresión ajustada para el mes de mayo del 2013.

Julio

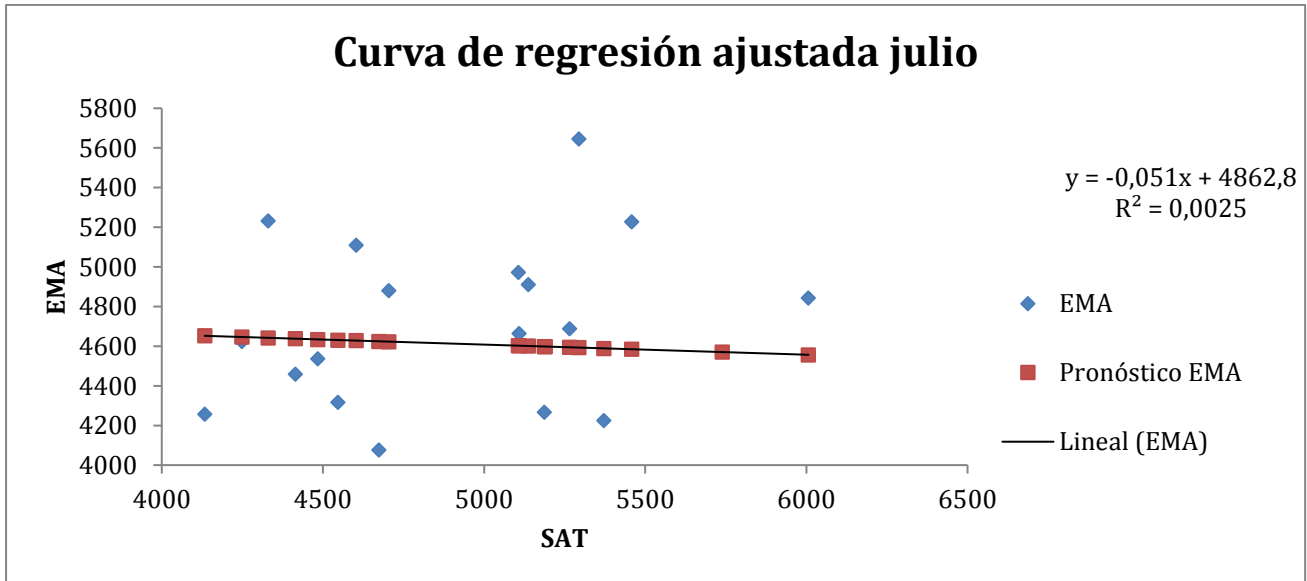


Ilustración 6: curva de regresión ajustada para el mes de julio del 2013.

Agosto

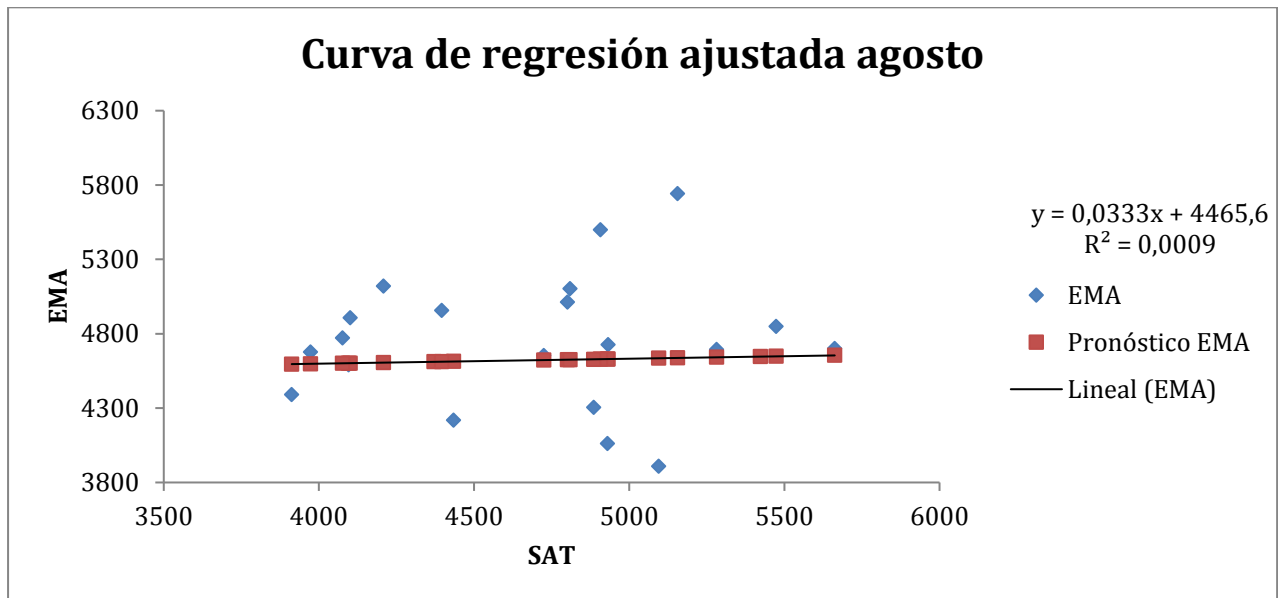


Ilustración 7: curva de regresión ajustada para el mes de agosto del 2013.

Septiembre

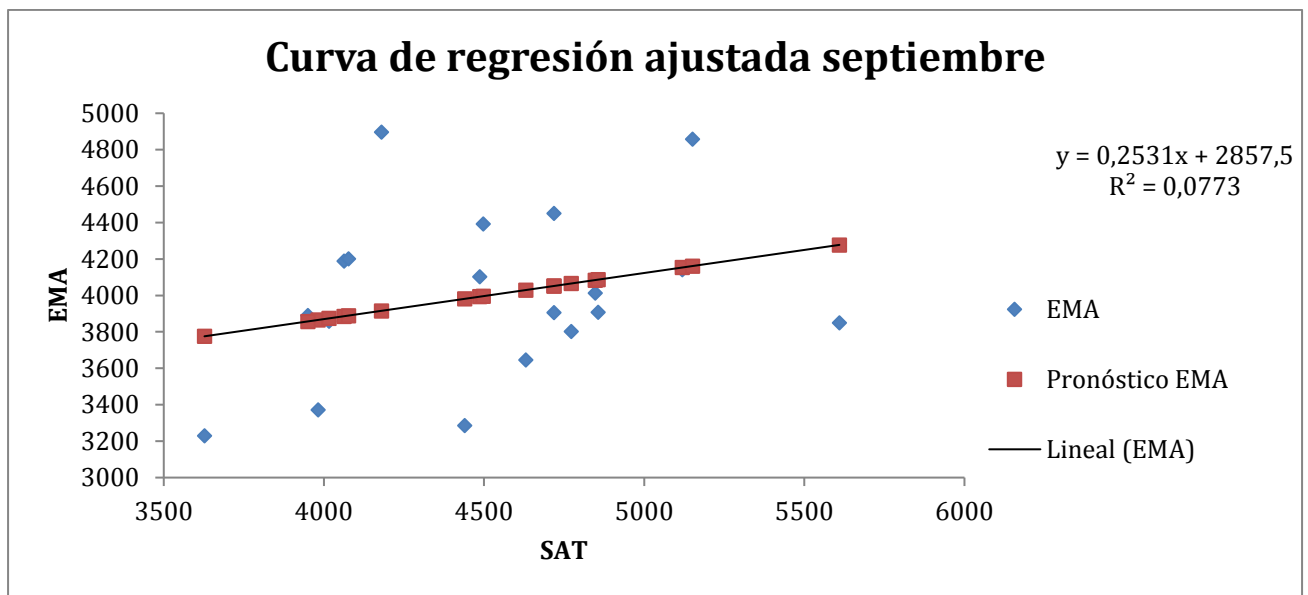


Ilustración 8: curva de regresión ajustada para el mes de septiembre del 2013.

Octubre

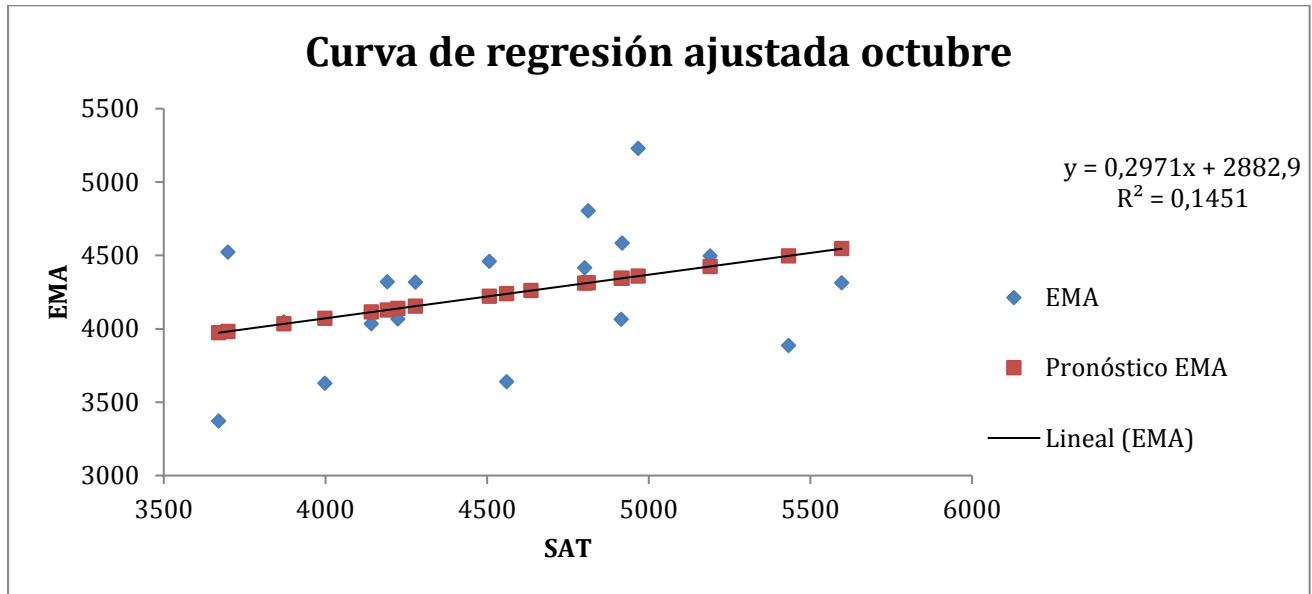


Ilustración 9: curva de regresión ajustada para el mes de octubre del 2013.

Noviembre

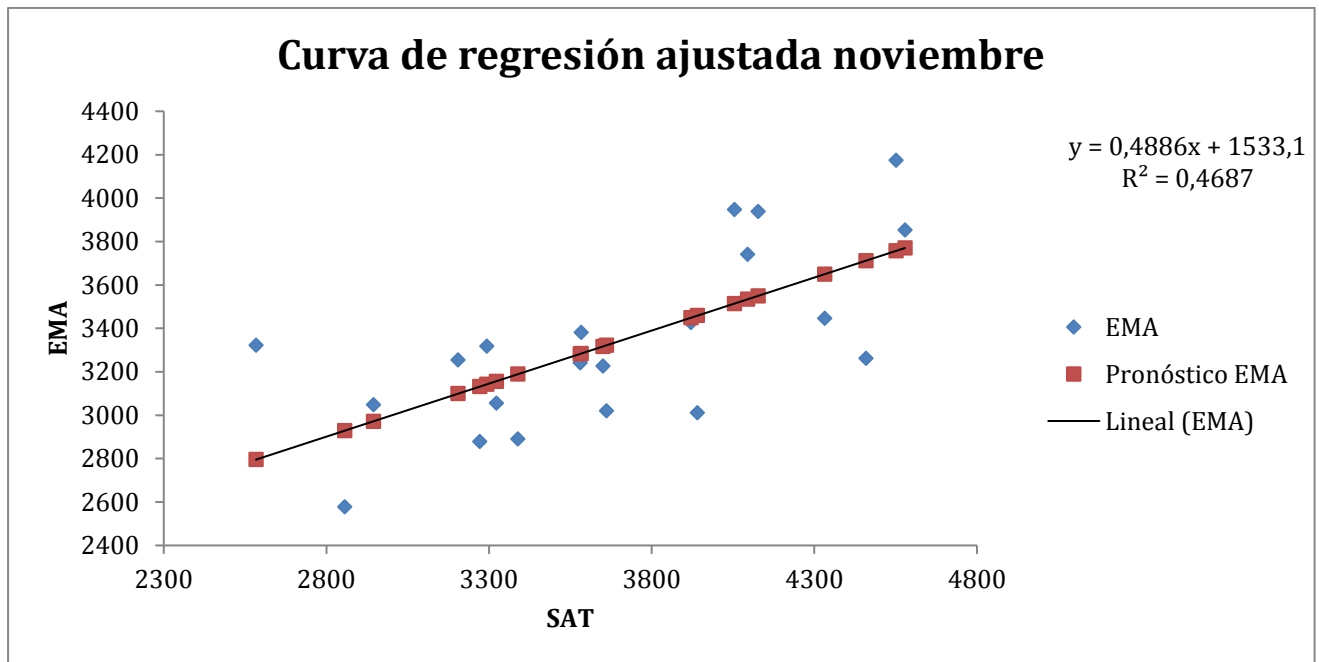


Ilustración 10: curva de regresión ajustada para el mes de noviembre del 2013.

Diciembre

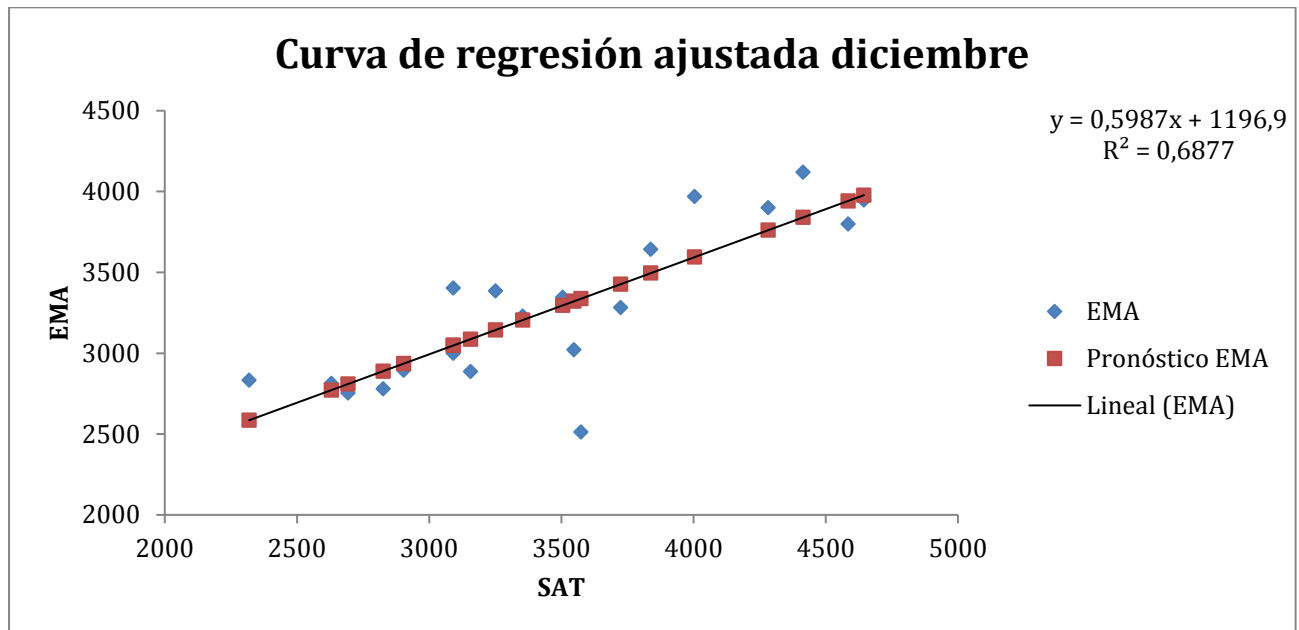


Ilustración 11: curva de regresión ajustada para el mes de diciembre del 2013.