



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

## TESIS

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR PARA  
EL APROVECHAMIENTO DE LA  
TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA EN EL  
ESTADO DE CHIAPAS A PARTIR DE  
IMÁGENES DE SATÉLITE**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN MATERIALES Y  
SISTEMAS ENERGÉTICOS  
RENOVABLES**

**PRESENTA**

**JULIÁN ACEITUNO MEDINA**

**DIRECTORES**

**DR. JOSÉ ARMANDO VELASCO HERRERA  
DR. RAMÓN SOLANO BARAJAS**

# AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por permitirme llegar hasta donde estoy, y por permitirme haber hecho muchas cosas de provecho y de mucha satisfacción durante la maestría.

Al Dr. Ramón Solano que con toda la amabilidad del mundo me tendió su mano para acompañarme y guiarme en este viaje largo pero increíble, toda una aventura, satisfacción y alegría trabajar con usted Doc.

A mi familia que nunca me han dejado solo y que siempre están ahí con su ayuda incondicional y sobre todo con mucho amor y cariño, los amo familia hermosa.

A mis cómplices en esto, Alex de la Cruz, Lupita, Alex Casas, Coco y Paquito, sin ustedes, definitivamente vivir en Colima hubiera sido difícil, mil gracias por todos los buenos momentos (risas, plática, llanto, canto, baile, caminar, ver estrellas, etc.) que me hicieron pasar, mil gracias por su ánimo, cariño y sobre todo por su valiosa amistad.

Al CONACYT, que gracias a su Programa Nacional de Posgrado de Calidad y a la beca otorgada fue posible todo gasto que este proyecto requirió, además que estoy seguro que estoy egresando de uno de los posgrados de más alto nivel académico a nivel nacional.

Al igual un agradecimiento enorme a la UNICACH, que me cobijó muchos años y a la Universidad de Colima, por haber abierto sus puertas a sus instalaciones y equipos, que sin ellos esto no hubiera sido posible.

Y mil gracias a todas esas personas que en estos dos años convivimos, réimos, sufrimos, anhelamos y soñamos juntos, gracias amigos, y a ustedes compañeros de clase y generación, mil gracias por hacer esto posible.

## Tabla de contenido

RESUMEN .....	4
ABSTRACT.....	5
I. INTRODUCCIÓN .....	6
II. MARCO TEÓRICO .....	10
2.1. Área de Estudio.....	10
2.1.1. Geografía. ....	11
2.1.1.1. Ubicación geográfica.....	11
2.1.1.2. Clima.....	12
2.1.1.3. Hidrografía.....	12
2.1.1.4. Flora y fauna.....	13
2.1.1.5. Ecosistemas. ....	13
2.1.2. Demografía.....	15
2.1.2.1. Población.....	15
2.2. Radiación solar. ....	17
2.2.1. Instrumentación y medida de la radiación solar. ....	18
2.2.2. Medida de la radiación directa. ....	18
2.2.3. Medida de la radiación global y difusa. ....	19
2.2.4. Medida de la radiación infrarroja. ....	20
2.3. Cálculo de la radiación solar en condiciones de cielo real. ....	21
2.4. Factores para el cálculo de la radiación solar en condiciones de cielo despejado.....	23
2.4.1. Modelo Digital de Elevación. ....	23
2.4.2. Albedo.....	24
2.4.3. Factor de turbiedad de Linke.....	25
2.4.4. Hora universal, hora civil y hora solar.....	25
2.5. Factores para el cálculo de la radiación en condiciones de cielo real.....	29
2.5.1. Radiación solar en condiciones de cielo despejado. ....	29
2.5.2. Imágenes de satélite. ....	30

2.6.	Sistemas de Información Geográfica .....	31
III.	ANTECEDENTES.....	33
IV.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	39
4.1.	Objetivo General.....	39
4.2.	Objetivos Específicos.....	39
4.3.	Hipótesis.....	39
V.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	40
VI.	JUSTIFICACIÓN.....	41
VII.	MÉTODOS.....	43
7.1.	Modelo Digital de Elevación.....	45
7.2.	Mapas de albedo superficial.....	50
7.3.	Mapas de turbiedad de Linke.....	59
7.4.	Mapas de radiación solar en condiciones de cielo despejado.....	67
7.5.	Imágenes de satélite.....	74
7.6.	Mapas de radiación solar en condiciones de cielo real.....	77
7.7.	Mapa de la radiación solar global.....	79
VIII.	RESULTADOS.....	82
IX.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
X.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	100
XI.	ANEXOS.....	106

11.1.	Tabla de figuras .....	107
11.2.	Tabla de tablas .....	108
11.3.	Tabla de gráficas.....	108
11.4.	Modelo para cálculo de la radiación solar en condiciones de cielo real <sup>4</sup> .....	111
11.5.	Definiciones básicas y glosario de términos.....	113
11.6.	Compendio de mapas de insolaciones mensuales .....	115
11.7.	Mapa de insolación promedio anual .....	116

## RESUMEN

Presentamos un nuevo producto que muestra la insolación mensual y promedio anual en el estado de Chiapas para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica basado en un proceso de modelado de la radiación solar en condiciones de cielo despejado, y en una modelación de los factores estocásticos usando un enfoque empírico. Los resultados contienen los cálculos de la radiación solar global disponible para el estado determinando los lugares con alto potencial, considerando parámetros atmosféricos (albedo y turbiedad de Linke), estocásticos (nubes) y topográficos (MDE), factor que influye tanto en la elevación propia de la región, así como en efectos de sombreado para modelado a alta resolución espacial. Los datos modelados de cielo despejado fueron comparados con datos reales medidos por estaciones meteorológicas y las diferencias encontradas, debidas a los factores estocásticos, fueron modeladas usando un método empírico (rule-based predictive models) a partir de datos multispectrales de satélites geostacionarios. El modelado se realizó a cada treinta minutos y la insolación diaria fue calculada como la integral de todas las mediciones puntuales. Por razones prácticas se modeló solamente un día por cada mes como aproximación referencial. La insolación anual fue calculada a partir de los datos mensuales descritos anteriormente. Estos valores representan valores esperados típicos mensuales, y en consecuencia, anuales. La precisión de los resultados fue del 12% de error en irradiancia instantánea e insolación diaria. Este trabajo fue validado por estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), estratégicamente localizados en todo el estado. Estos resultados fueron presentados en mapas para la mejor visualización y también servirán como datos para estudios analíticos del recurso solar, escenarios de implementación, evaluaciones económicas y toma de decisiones. Los resultados muestran que la mayor insolación se encuentra en la zonas: Istmo-Costa, Soconusco, Valles Zoque, Frailesca, Sierra Mariscal, De Los Llanos, Metropolitana, Maya, Selva Lacandona y Norte con valores iguales o mayores a 5 kWh/m<sup>2</sup>/día. Estos resultados son de carácter referencial por lo que se sugiere la reproducción de los mapas para todo un año, además de un estudio más profundo sobre el comportamiento de las nubes y su geometría con el sol.

Palabras clave: Radiación solar, imágenes de satélite, teledetección, energías renovables.

# ABSTRACT

We present a new product that shows the annual average and monthly sunshine in the state of Chiapas for the use of photovoltaic technology based on a process of modeling solar radiation in clear sky conditions, and in a modeling using stochastic factors on an empirical approach. The results contain estimates of the global solar radiation available for the state determining locations with high potential, considering parameters such as: atmospheric (albedo and Linke turbidity), stochastic (clouds) and topographic (MDE), a factor that influences both the own elevation of the region as well as for modeling shading effects at high spatial resolution. The modeled data clear sky were compared with actual data measured by meteorological stations and the differences found, due to stochastic factors, were modeled using an empirical method (rule-based predictive models) from multispectral data from geostationary satellites. Modeling was performed every thirty minutes and daily sunshine was calculated as the integral of all point measurements. For practical reasons it was modeled only one day per month as a referential approach. The annual insolation was calculated from monthly data described above. These values represent typical values expected monthly, and therefore annually. The precision of the results were 12% error in instantaneous irradiance and daily insolation. This work was validated by weather stations belonging to the National Weather Service (SMN), strategically located throughout the state. These results were presented in maps for better visualization and also serve as data for analytical studies of the solar resource, deployment scenarios, economic evaluations and decision making. The results show that most insolation is in the areas: Istmo-Costa, Soconusco, Valles Zoque, Frailesca, Sierra Mariscal, De Los Llanos, Metropolitan, Maya, Selva Lacandona and Norte and with equal or greater than  $5 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ . These results are referential so the reproduction of maps for a whole year is suggested, and a deeper study of the behavior of clouds and sun geometry.

Key Words: Solar radiation, satellite images, remote sensing, renewable energies.

# I. INTRODUCCIÓN

Vivimos en una era en la que se necesitan reducir las grandes emisiones de gases que producen alto peligro al planeta y por ende a la humanidad. Esta era es llamada “sustentable” en donde tenemos que producir energía a partir de recursos naturales o recursos en donde las consecuencias sean menos peligrosas a las que comúnmente se les llama energías convencionales.

Reducir los niveles de contaminación en el planeta tiene grandes beneficios pues evitamos muchos cambios drásticos en la temperatura del planeta, catástrofes, enfermedades y un sinnúmero de cosas que conllevan desde la primera parte de esto denominado contaminación. Los niveles de contaminación que día a día se producen en el planeta pueden ser menores si ponemos un poco de nuestra labor como humanos y tratamos de salvar al planeta que no está muy lejos de acabar, la era denominada sustentable deberá entonces tener propuestas para que esto no ocurra tan rápido.

La era sustentable trae consigo una rama de la ingeniería llamada “Energías Renovables” que se encarga de producir cantidades de energía que reducen las emisiones de gases en un ambiente sustentable, económica y ambientalmente aceptable, para mantener y mejorar nuestro estilo de vida a partir de nuevas tecnologías denominadas: eólica, geotérmica, biomasa y solar (WBGU, 2009; Pearce 2002; Metz et al. 2007).

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina. Esta tecnología es robusta, escalable, geográficamente dispersa y posee un enorme potencial para la producción de una fuente sustentable de energía (Pearce, 2002; Zekai, 2004).

La atmósfera terrestre actúa como una gran cúpula protectora que evita durante el día que incida sobre el suelo determinado rango de la radiación solar que perjudicaría a los seres vivos y, durante la noche, la pérdida excesiva de calor. La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra está

atenuada en su intensidad por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la atmósfera (H. Grossi Gallegos, 2005).

La atmósfera modifica las características de la radiación incidente: una parte de la misma, procedente del Sol y de la zona circunsolar ( $\approx 3^\circ$ ) mantiene la dirección y se conoce como radiación directa; la dispersada por el aire y las nubes pierde la dirección definida y llega al suelo desde todo el hemisferio superior, denominándose la radiación difusa. Si se agrega a esta última la dispersada por la superficie terrestre y la directa se obtiene el parámetro de interés energético que se mide sobre un plano: la radiación global (H. Grossi Gallegos, 2005).

La percepción remota (Fotos aéreas e Imágenes satelitales) se basa en la captación de la energía electromagnética emitida o reflejada por los objetos terrestres (vegetación, agua, suelo, caminos, etc.) captada por sensores remotos, registrada y enviada nuevamente a la tierra para su análisis<sup>1</sup>.

Nuestros ojos son los "primeros sensores remotos" cuando miramos un objeto alejado y podemos apreciar solamente un determinado tipo de energía: la del espectro visible. Sin embargo, los objetos emiten otras formas de energía electromagnética que no son directamente perceptibles por nosotros, como el infrarrojo cercano y medio y el térmico, que son medidos con instrumentos específicos y que amplían nuestras posibilidades de extraer información de ciertos elementos. De esta forma, podemos registrar aspectos imperceptibles al ojo humano. Además nuestro campo de visión, está limitado a nuestra propia estatura o a la del observatorio en que nos ubiquemos; que nos da una perspectiva oblicua y de pequeño radio de acción, por lo que resulta difícil observar y cuantificar y monitorear fenómenos extendidos. Para eliminar estas limitaciones y acceder a una perspectiva vertical y panorámica, se utilizan sensores montados sobre plataformas situadas a diferentes alturas como aviones y satélites<sup>1</sup>.

Para el estudio de los Recursos Naturales las imágenes utilizadas son captadas por los satélites. Las órbitas de los satélites tienen una altitud que oscilan aproximadamente en los 705 km, retorna a su punto inicial y repite el ciclo. Esto permite una cobertura global y periódica y una visión panorámica. Las cubiertas terrestres (masas de vegetación, suelos, agua, construcciones) reciben energía solar y la emiten de acuerdo a sus características físicas. El sensor recibe y capta la información de energía electromagnética.

Esta señal analógica es transformada en digital y transmitidas a estaciones receptoras, donde una vez procesada, se realiza un tratamiento visual y digital para su interpretación y transferencia a los diversos usuarios: productores, técnicos, planificadores<sup>1</sup>.

Es por esta razón que este proyecto está encausado a obtener datos de radiación solar por medio de la percepción remota, como insumo principal al proceso del modelado de la radiación solar por parámetros atmosféricos que más adelante se mencionarán. Estos datos obtenidos serán visualizados en mapas para la mejor comprensión del lector, y esto servirá para la toma de decisiones o implementación de dispositivos, así como el estudio continuo del comportamiento de la radiación solar en sus diferentes componentes, y además el conocimiento del mismo para su posterior uso en las energías renovables.

Dentro de las ventajas que forman parte de esta metodología es que los parámetros utilizados son exclusivamente de la región a la cual se le hará el estudio de la radiación, otras de las ventajas que presenta es que se implementó un modelo digital de elevaciones (MDE), que prácticamente considera el relieve y la topografía matemática de la región en estudio, de lo cual se podrá obtener los lugares con mayor concentración solar sin obstrucción por sombras debido a la topografía al igual que la obtención de lugares con menos potencial por la misma razón, y por último una de las ventajas que considera este nuevo modelo es que su producto final tiene una alta resolución (500m), esto permitirá al lector visualizar los mapas con un mayor detalle, además de ello, la topografía se aprecia más y es un trabajo que por la escala de la región es aceptable.

Es importante tomar en cuenta hoy en día el estudio del potencial solar pues las energías renovables no solamente son el futuro en cuestión energética del mundo, sino que también es el futuro a nuevos estudios en la investigación y con ello nuevo conocimiento, además que es en beneficio al medio ambiente, minimizando los índices de contaminación en generación de energía, por ello este trabajo es encausado al potencial solar, motor principal en la generación de energía y de vida de este planeta, perteneciente a uno de los estados más ricos en biodiversidad de la República Mexicana: Chiapas.

Es importante hacer hincapié que este estudio es en base a la energía solar y su comportamiento mostrados en mapas para una buena comprensión del recurso, por lo que se justifica en que no

hay una cartografía de esta escala a nivel nacional ni mundial, además que el nuevo modelo que se implementa está tomando otros factores (topográficos y estocásticos) que ayudan a minimizar los errores que en otros trabajos se han hecho, por lo que como continuación de este trabajo se sugiere aún más estudio en el parámetro estocástico. La implementación de nuevos recursos para la comprensión de este tipo de energía se convierte también como herramienta de apoyo para los escenarios de implementación, nuevos estudios y sobre todo la toma de decisiones. Y un último pero no menos importante punto es que este trabajo ha sido testigo de que la teledetección, técnica que utiliza imágenes creadas por información desde sensores remotos, es una herramienta fundamental hoy en día para estudios de tipo regional, sin dejar de lado la validación de los datos desde alguna estación terrestre, en donde se necesita una precisión considerable en la presentación de los resultados. Es por ello que todo el conjunto de métodos que se utilizaron son de gran importancia, así como su seguimiento en el campo de la investigación de esta índole y otras.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Área de Estudio.

Chiapas, oficialmente llamado Estado Libre y Soberano de Chiapas, es una de las 32 entidades federativas de México. Se encuentra en el extremo sureste del país, en la frontera con Guatemala. Con una superficie de más de 70 mil kilómetros cuadrados, ocupa el octavo lugar entre las entidades mexicanas. La capital del estado es Tuxtla Gutiérrez, que concentra aproximadamente a la octava parte de la población chiapaneca. Chiapas posee varios de los destinos turísticos más importantes de México, como la zona arqueológica de Palenque, que atrae a una cantidad muy importante de turistas, principalmente europeos. Por el volumen de su producción agrícola, Chiapas ocupa un sitio destacado en México, sobre todo por la producción de café y maíz.

El territorio chiapaneco presenta una morfología muy compleja, que contrasta las extensas zonas montañosas de la sierra Madre de Chiapas con la depresión central y las tierras bajas del nororiente del estado. Por este motivo, Chiapas presenta una gran diversidad climática y biológica. Algunas zonas de su territorio han sido declaradas reservas de la biosfera por albergar a varias especies animales y vegetales, entre las que se encuentran varios endemismos.

En el territorio de Chiapas se desarrollaron algunas notables culturas mesoamericanas durante la época precolombina. Entre ellas se puede citar a la cultura epílmeca, la cultura mokaya y la maya. En el período Clásico, tuvieron su auge ciudades como Palenque y Toniná. En el período Posclásico, los chiapanecas llegaron al centro del estado y dominaron a los zoques y los tzotziles, mientras que los mexicas controlaron la región de Xoconochco. La conquista española tuvo en la derrota de los chiapanecas uno de sus episodios más importantes. La provincia de Chiapas formó parte de la capitánía general de Guatemala hasta su independencia y posterior incorporación al Primer Imperio Mexicano. Cuando esta entidad se disolvió, Chiapas fue la única provincia centroamericana que optó por permanecer unida a México. Durante la colonia se fundó Ciudad Real, asiento del poder en la región hasta el siglo XIX. La provincia de Chiapas formó parte de la capitánía general de Guatemala hasta su independencia y posterior incorporación al Primer Imperio Mexicano. Cuando esta entidad se disolvió, Chiapas fue la única provincia

centroamericana que optó por permanecer unida a México. A lo largo del siglo XX y XIX, en el estado se fortaleció una amplia desigualdad social. Los abusos contra los pueblos indígenas y las comunidades rurales generaron un conflicto latente en el último cuarto del siglo XX, que estalló en 1994 con el levantamiento zapatista y continúa hasta la actualidad.

El estado cuenta con atractivos turísticos como la zona arqueológica de Palenque y las cascadas de Agua Azul. Actualmente cuenta con 122 municipios oficiales, los últimos cuatro fueron aprobados el 14 de noviembre de 2011 por el congreso estatal.

## **2.1.1. Geografía.**

### **2.1.1.1. Ubicación geográfica.**

Chiapas se localiza al sureste de México; colinda al norte con el estado de Tabasco, al oeste con Veracruz y Oaxaca, al sur con el Océano Pacífico y al este con la República de Guatemala. Al norte  $17^{\circ}59'$ , al sur  $14^{\circ}32'$  de latitud norte; al este  $90^{\circ}22'$ , al oeste  $94^{\circ}14'$  de longitud oeste.

**Figura 1: Ubicación del estado de Chiapas.**



Fuente: Chiapas.gob.mx.

### **2.1.1.2. Clima.**

Chiapas en su clima presenta dos grandes regímenes climáticos: el cálido húmedo en zonas bajas, valles y mesetas de altura media; y el templado húmedo en sierras altas y mesetas montañosas, principalmente en la Sierra Madre y el macizo montañoso de Los Altos.

El ciclo climático incluye dos temporadas anuales principales, la temporada de lluvias (mayo-octubre) y la temporada seca (noviembre-abril). Las precipitaciones varían entre los 25 mm y los 700 mm en la temporada seca y los 700 mm y algo más de 3000 mm en la lluviosa.

La depresión central y el litoral son las zonas de menor precipitación (25-1000 mm) en contraste con las regiones Fronteriza y Selva, con lluvias más abundantes en ambas temporadas.

En la depresión central la temperatura máxima varía entre los 21 y 24 °C (noviembre-enero) y de 27 a 30 °C (mayo-julio).

Las altas temperaturas, abundantes lluvias y régimen hídrico bastante estable explican la existencia de bosques tropicales en Chiapas.

### **2.1.1.3. Hidrografía.**

La región está conformada por diez cuencas hidrográficas divididas en doce subcuencas. Los principales ríos son el Usumacinta (1045 km<sup>2</sup>) y el Grijalva (832 km<sup>2</sup>). Otros ríos importantes, todos de la cuenca del Usumacinta, son: Lacantún (y sus afluentes, Negro, Azul, Tzenles, y San Pedro), Perlas, Jataté, Chacamax y Euseba.

Los recursos hidrológicos de Chiapas representan el 30% del total del país. En total, se cuenta con 110 mil hectáreas de aguas continentales, 260 kilómetros de litoral, un mar patrimonial de 96 mil km<sup>2</sup>, 75 mil 230 hectáreas de esteros y 10 sistema lagunarios, además de diez cuencas hidrográficas divididas en doce subcuencas.

Los ríos principales son el Grijalva y el Usumacinta. Ambos forman un solo sistema fluvial, sobre el curso del Grijalva, donde se han construido 4 presas: Belisario Domínguez (La Angostura); Manuel Moreno Torres (Chicoasén); Nezahualcóyotl (Malpaso); y Angel Albino Corzo (Peñitas). El Usumacinta es el río más largo de América Latina.

#### **2.1.1.4. Flora y fauna.**

El estado de Chiapas es uno de los más biodiversos del país. Junto a la frontera con Guatemala se localiza la Selva Lacandona, que en su casi millón de hectárea de superficie alberga el 20% de las especies mexicanas. En el estado se encuentran cerca de 3000 especies de plantas, entre ellas cacahuete, caoba, cedro rojo, ceiba, ciprés, encino, fresno, guácimo, guapaque, laurel, mangle, mezquite, pastizales, pino, quebracho y volador.

Asimismo existe una gran variedad de vida animal, especialmente aves y reptiles. Entre la fauna hay aves acuáticas, boas, cocodrilos (incluyendo el cocodrilo de pantano, una especie endémica), jabalíes, leoncillos, monos, puercoespines, sarahuatos, tepezcuintles, tlacuaches, tortugas, venados cola blanca, tucanes de cuello amarillo y el jaguar que es el felino más grande de América y el tercero en el mundo.

#### **2.1.1.5. Ecosistemas.**

El ambiente natural en Chiapas es extremadamente diverso debido a tres factores principales: su accidentada topografía, su consecuente diversidad climática, y el ser punto de convergencia de dos regiones biogeográficas: la región neártica y la región neotropical.

El territorio chiapaneco es una enorme placa de roca caliza fragmentada en diferentes puntos, fallada y plegada, por lo que su topografía es compleja. Su fisonomía la determinan dos grandes cadenas montañosas que la recorren con orientación Noroeste-Sureste. La primera de esas cadenas, la Sierra Madre de Chiapas, corre casi paralela a la costa del océano Pacífico e incrementa su altitud desde aproximadamente los 1000 msnm en los límites con Oaxaca hasta más de 3000 msnm en la frontera con Guatemala. La otra cadena montañosa, la llamada Altiplanicie Central (también conocida como Macizo Central o, más comúnmente, como Los Altos de Chiapas), se

desplaza por la parte central del estado. Proviene de Guatemala (Sierra de los Cuchumatanes) y desde ahí penetra en territorio mexicano, alcanzando sus máximas altitudes cerca de San Cristóbal de las Casas (aproximadamente 2000 msnm).

El clima del estado es consecuencia de esta topografía y presenta una gran variedad. En algunas partes bajas de la costa y en la depresión que se encuentra entre Los Altos y la Sierra Madre (el valle formado por el Río Grijalva) el clima es cálido y seco, con una temporada lluviosa corta (6 meses). La vegetación es de selva baja y espinosa o selva caducifolia en las vegas de los ríos. No obstante, buena parte de esta vegetación original ha sido sustituida por praderas para la cría de ganado bovino.

En cambio las partes bajas a sotavento de los vientos alisios, en el norte y noreste de la entidad, así como reciben grandes cantidades de precipitación durante 8 ó 10 meses del año, lo que aunado a las altas temperaturas favorece la presencia de la selva húmeda siempre verde (Selva Lacandona). Estas áreas forestales han sufrido fuertes impactos negativos debido a la introducción de ganado bovino o a prácticas no controladas de extracción de madera.

Las zonas elevadas de la Sierra y de los Altos difieren enormemente de los dos ecosistemas mencionados. Debido a su altitud, atrapan el remanente de humedad que no se depositó en sus vertientes, por lo que tienen una estacionalidad marcada y característica. Sus inviernos son secos y muy fríos (con temperaturas por debajo de los 0 grados centígrados), mientras que los veranos tienden a ser templados y muy húmedos (7 u 8 meses de lluvia). La vegetación de estas regiones se ve dominada por bosques de coníferas (pino) en combinación con árboles de hoja ancha (encinos). Ambas cadenas cuentan con una de las cubiertas vegetales más hermosas del estado: el bosque nuboso. Aunque estos bosques prácticamente han desaparecido de los Altos, en la Sierra Madre está la Reserva de la biosfera El Triunfo, con más de 100,000 hectáreas de bosque nuboso. La extracción de madera y las actividades agropecuarias (cultivo de maíz y cría de ganado ovino) significa lustre de la vegetación natural; y la zona costera por su parte está compuesta de manglares y su clima es también tropical.

## **2.1.2. Demografía.**

### **2.1.2.1. Población.**

Según los datos que arrojó el II Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con fecha censal del 12 de junio de 2010, el estado de Chiapas contaba hasta ese año con un total de 4 796 580 habitantes, de dicha cifra, 2 352 807 eran hombres y 2 443 773 eran mujeres.<sup>1</sup> La tasa de crecimiento anual para la entidad durante el período 2005-2010 fue del 2.2% por lo tanto ocupa el séptimo lugar a nivel nacional.

Su tasa de natalidad bruta es la más alta del país al ser de 22%; sin embargo, también ocupa el primer lugar en defunciones infantiles con una tasa del 25%. El 52% de su población habita en zonas rurales, muy por encima de la media nacional que es del 24%.

En Chiapas, habitan 12 de los 62 pueblos indígenas reconocidos por las autoridades mexicanas, Tseltal, Tsotsil, Ch'ol, Tojol-ab'al, Zoque, Chuj, Kanjobal, Mam, Jacalteco, Mochó, Cakchiquel y Lacandón o Maya Caribe. Estos conforman el 26% de la población del estado, es decir casi un millón de habitantes de los 6 millones registrados en el país, habla alguna lengua autóctona. De este millón de indígenas, solamente el 73% habla también español.

Las principales lenguas habladas por esta gran minoría son tzeltal y tzotzil en primer lugar, y después chol, zoque, tojolabal, kanjobal, mame, chuc y otras.

La condición de pobreza que caracteriza a este estado sureño, se ve reflejada en altos niveles de analfabetismo (21%), falta de acceso a los servicios básicos (agua entubada, drenaje y energía eléctrica, y la menor disponibilidad nacional de bienes en la vivienda como televisión, lavadora, secadora y computadora).

Sus principales ciudades son:

- 1 Tuxtla Gutiérrez con 753, 374 habitantes.
- 2 Tapachula de Córdova y Ordoñez con 378, 451 habitantes.
- 3 San Cristóbal de Las Casas con 148, 877 habitantes.
- 4 Comitán de Domínguez 85, 917 habitantes.

- 5 Villaflores con 56, 535 habitantes.
- 6 Palenque con 48, 547 habitantes.
- 7 Cintalapa con 47, 603 habitantes
- 8 Tonalá con 44, 594 habitantes.

## 2.2. Radiación solar.

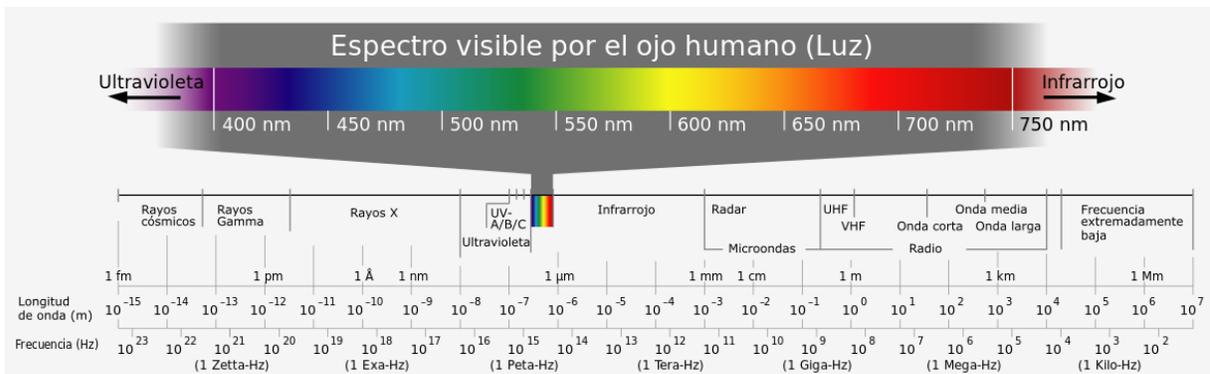
La energía solar resulta del proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el sol. Esta energía es el motor que mueve nuestro medio ambiente, siendo la energía solar que llega a la superficie terrestre 10.000 veces mayor que la energía consumida actualmente por toda la humanidad.<sup>5</sup>

La radiación es transferencia de energía por ondas electromagnéticas y se produce directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones. Estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol.<sup>5</sup>

La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas, son importantes para determinar su energía, su visibilidad y su poder de penetración. Todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de 299.792 Km/s.<sup>5</sup>

Estas ondas electromagnéticas pueden tener diferentes longitudes de onda. El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético. El conjunto de las longitudes de onda emitidas por el Sol se denomina espectro solar.<sup>5</sup>

Figura 2: Espectro electromagnético y sus categorías.



Fuente: «Electromagnetic spectrum-es». Publicado bajo la licencia CC BY-SA 3.0.

La proporción de la radiación solar en las distintas regiones del espectro es aproximadamente:

Ultravioleta: 7%, Luz visible: 43%, Infrarrojo: 49%, El resto: 1%.<sup>5</sup>

### 2.2.1. Instrumentación y medida de la radiación solar.

Las medidas de la radiación son importantes para:

- Estudiar las transformaciones de la energía en sistema Tierra-Atmósfera.
- Analizar las propiedades y distribución de la atmósfera, los elementos que la constituyen, tales como los aerosoles, el vapor de agua, el ozono, etc.
- Estudiar la distribución y variaciones de la radiación incidente, reflejada y total.
- Satisfacer las necesidades derivadas de las actividades de la biología, de la medicina, de la agricultura, de la arquitectura, de la ingeniería y de la industria relacionadas con la radiación.<sup>5</sup>

### 2.2.2. Medida de la radiación directa.

La radiación directa es, como su propio nombre indica, la que proviene directamente del sol y se mide por medio de pirheliómetros. Solamente se mide la radiación procedente del sol y de una región anular del cielo muy próxima al astro. En los instrumentos modernos, esta última abarca un semiángulo de  $2.5^\circ$  aproximadamente a partir del centro del Sol.<sup>5</sup>

Generalmente el sensor está dotado de un visor en el que un pequeño punto luminoso coincide con una marca situada en el centro del mismo cuando la superficie receptora se halla en posición exactamente perpendicular al haz solar directo.<sup>5</sup>

Por lo que se precisa que todos los pirheliómetros vayan montados sobre un mecanismo que le permita un seguimiento muy preciso del Sol.<sup>5</sup>

**Figura 3: Pirheliómetro de primera clase.**



Fuente: Hukseflux, thermal sensors.

Lo normal es que se calibren con el WSG en el transcurso de las Comparaciones Pirheliométricas Internacionales que se organizan cada 5 años. Un sensor referenciado al WSG puede usarse como patrón primario para calibrar de nuevo, por comparación y usando el sol como fuente, pirheliómetros secundarios de primera y segunda clase.<sup>5</sup>

### 2.2.3. Medida de la radiación global y difusa.

La radiación difusa es aquella recibida de la atmósfera como consecuencia de la dispersión de parte de la radiación del sol en la misma. Esta energía puede suponer aproximadamente un 15% de la radiación global en los días soleados, pero en los días nublados, en los cuales la radiación directa es muy baja, la radiación difusa supone un porcentaje mucho mayor. Por otra parte, las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que "ven" toda la semiesfera celeste, mientras que las superficies verticales reciben menos porque solo "ven" la mitad de la semiesfera celeste. La suma de la radiación difusa y la directa se le conoce como radiación global.<sup>5</sup>

El instrumento necesario para medir la radiación global es el piranómetro. Este se utiliza a veces para medir la radiación incidente sobre superficies inclinadas y se dispone en posición invertida para medir la radiación global reflejada (albedo).<sup>5</sup>

Para medir solamente la componente difusa de la radiación solar, la componente directa se cubre por medio de un sistema de pantalla o sombreado.<sup>5</sup>

**Figura 4: Piranómetros. Izquierda para medir radiación global, derecha para medir radiación difusa.**

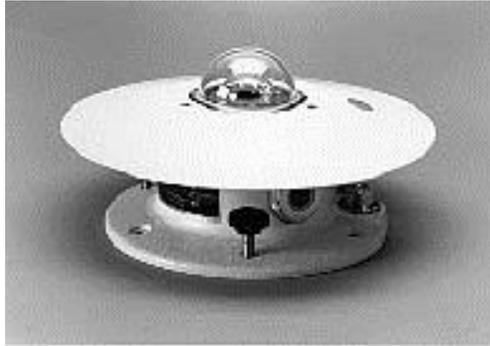


Fuente: Sensovant, asignatura.us.es.

#### 2.2.4. Medida de la radiación infrarroja.

El instrumento usado para medir radiaciones de onda larga son los pirgeómetros. La mayoría de éstos eliminan las longitudes de onda cortas mediante filtros que presentan una transparencia constante a longitudes de onda largas mientras que son casi opacos a longitudes de onda más cortas (300 a 3000nm).<sup>5</sup>

**Figura 5: Pirgeómetro.**



Fuente: infoagro.com.

## 2.3. Cálculo de la radiación solar en condiciones de cielo real.

El modelo para el cálculo de radiación solar en condiciones de cielo nublado fue desarrollado utilizando un análisis multivariado, tomado como base la radiación calculada para condiciones de cielo despejado y datos mulispectrales del satélite GOES, así como otros parámetros tales como la geometría solar y la elevación del terreno. La irradiancia instantánea para condiciones de cielo despejado fue modelada a su vez utilizando un conjunto adicional de variables tales como el parámetro de turbidez Linke, altura de terreno, albedo, ángulo de inclinación, día y hora.

El modelo numérico consiste en un conjunto de criterios de decisión basados en reglas (rule-based decision model) que genera un esquema similar a un árbol de regresión paso-a-paso (step-wise regression).

El modelado se realizó utilizando todos los datos de irradiancia solar disponibles y un footprint de 12 km. La validación se realizó utilizando un esquema de K-folds, de 10 particiones, repetido 10 veces para permitir diferentes instancias de particionamiento. (Solano and Aceituno, in preparation).

La precisión obtenida para mediciones instantáneas (mediciones individuales a cada media hora) es como sigue:

Error absoluto:  $97 \text{ W/m}^2$

Factor de correlación: 0.75

Sin embargo, los errores pertinentes para el cálculo de la radiación solar integrada se espera sean de menor magnitud por su carácter de parámetro integral, lo cual compensa errores positivos con negativos. Los valores pertinentes se muestran en la sección de resultados.

Este modelo está basado en el trabajo de investigación en proceso del Dr. Ramón Solano Barajas de la Universidad de Colima, el cual en conjunto se ha ido desarrollando, y por mi parte he tenido participación en la parte práctica y recolección de insumos.

En el apartado de anexos está de manera sintetizada.<sup>11.1</sup>

## 2.4. Factores para el cálculo de la radiación solar en condiciones de cielo despejado.

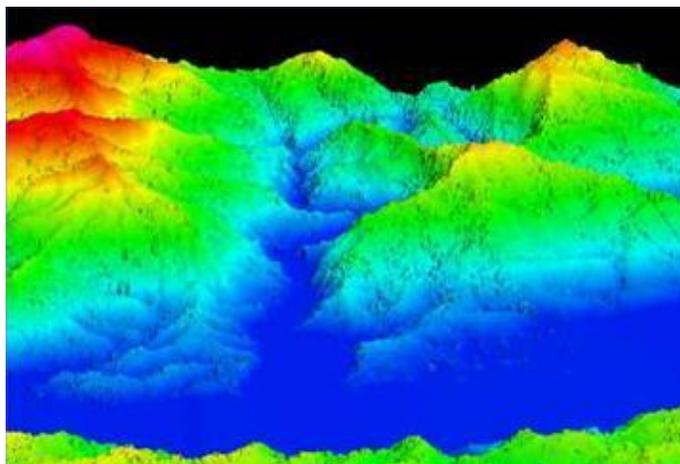
### 2.4.1. Modelo Digital de Elevación.

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.<sup>6</sup>

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.<sup>6</sup>

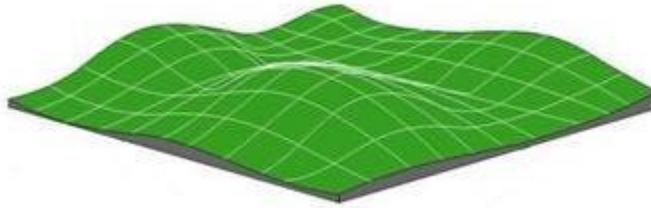
En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos y para el caso de los que son generados con tecnología LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y más precisos valores submétricos, a nivel cm).<sup>6</sup>

**Figura 6: Modelo digital de elevación con vista en perspectiva.**



Fuente: INEGI.

**Figura 7: Representación de un modelo digital de elevación en formato raster.**



Fuente: INEGI.

### **2.4.2. Albedo**

El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la Tierra es del 37-39% de la radiación que proviene del Sol. Es una medida de la tendencia de una superficie a reflejar radiación incidente.<sup>7</sup>

Un albedo alto enfría el planeta, porque la luz (radiación) absorbida y aprovechada para calentarlo es mínima. Por el contrario, un albedo bajo calienta el planeta, porque la mayor parte de la luz es absorbida por el mismo.<sup>7</sup>

La presencia de agua en la Tierra crea una interesante realimentación positiva para el albedo, ya que las bajas temperaturas incrementan la cantidad de hielo sobre su superficie, lo que hace más blanco al planeta y aumenta su albedo, lo que a su vez enfría más el planeta, lo que crea nuevas cantidades de hielo; de esta manera, teóricamente al menos, podría llegarse al punto en que la Tierra entera se convertiría en una bola de nieve.<sup>7</sup>

En astronomía ofrece un medio indirecto de averiguar la naturaleza de un astro mediante la comparación de su albedo con el de materias conocidas. El más alto registrado hasta el momento en el Sistema solar corresponde al del satélite Encélado de Saturno, y el más bajo, al de algunos asteroides carbonáceos, así como a los satélites marcianos Fobos y Deimos.<sup>7</sup>

### **2.4.3. Factor de turbiedad de Linke.**

El factor de turbiedad Linke es una aproximación muy conveniente para modelar la absorción atmosférica y la dispersión de la radiación solar bajo cielo despejado. En él se describe el espesor óptico de la atmósfera debido a vapor de agua y a los propios gases atmosféricos en relación con una atmósfera seca y limpia. Con mayor turbiedad, hay más atenuación de la radiación por la atmósfera de cielo despejado (J. Remund et al., 2003). La turbiedad de Linke fue propuesta por Linke en 1922 para expresar el espesor óptico total de una atmósfera sin nubes en relación con el espesor óptico de aerosoles de agua y atmósfera libre (Linke, 1922).

El coeficiente de turbiedad de Linke toma en cuenta la dispersión y absorción ocasionadas por los aerosoles y gases atmosféricos. Los datos de Linke han sido utilizados como parámetro de entrada en el cálculo de las diferentes componentes de la radiación solar bajo condiciones de cielo despejado (Page et al., 1984).

El índice de turbidez,  $TL$  (M), en un modelo parametrizado de atenuación de la radiación solar bajo condiciones de cielo claro determina el número de atmósferas limpias y secas equivalentes debido al contenido de humedad y de aerosoles presentes en la atmósfera. Este factor, así como el valor asociado de irradiación solar global de día claro,  $H_c$ , son de gran utilidad tanto en el campo de las energías renovables, al dimensionar sistemas aplicados, como en el estudio del sistema climático y de la polución atmosférica.  $TL$  (M) puede ser determinado a partir de datos obtenidos en días claros, pero este tipo de información es muy poco frecuente. En general se cuenta con bases de datos de irradiación solar global o, en el mejor de los casos, de irradiación directa para todo tipo de cielo, lo que determina la necesidad de seleccionar previamente los casos libres de la influencia de nubes.<sup>8</sup>

### **2.4.4. Hora universal, hora civil y hora solar.**

Las siglas UTC significan "Tiempo Universal Coordinado" (en inglés, "Universal Time Coordinated"), que antiguamente fue llamada "la hora en el meridiano de Greenwich" ("GMT") o el "tiempo Zulu" ("Z"). Esta es la hora local en el Meridiano Primario (i.e., áquel cuya longitud es

0°) dada en horas y minutos en el reloj de 24 horas. Por ejemplo, consideramos la hora 1350 UTC que significa 13 horas y 50 minutos después de la medianoche, ó 1:50 pm en el Meridiano Primario.

El Real Observatorio de Greenwich, en la ciudad de Greenwich en Inglaterra (en la longitud 0°), fue el lugar en donde se calibraban los cronómetros navales, un instrumento de gran importancia en la cálculo de la longitud. Por eso, se estableció la referencia de tiempo GMT para usar en todo el mundo. Los meteorólogos han usado el tiempo UTC o GMT por más de un siglo para asegurar que toman simultáneamente las mediciones meteorológicas de todo el planeta.

En la mayoría de las imágenes de satélite y de radar se especifica la hora de la captura. Si no se especifica el tiempo local en la imagen, entonces se indica usualmente el tiempo UTC, GMT o Z. Para convertir este tiempo a su tiempo local es necesario sustraer (restar) el número de horas correspondiente si es una localidad del Hemisferio Occidental, o añadir (sumar) el número de horas apropiado para una localidad en el Hemisferio Oriental. No olvidar hacer la corrección extra que corresponda al Horario de Verano o de Invierno (i.e., "Daylight Savings Time"), si aplica a la Hora Estándar en la localidad de interés.<sup>9</sup>

Cuando el Sol alcanza su punto más alto, que es cuando cruza el meridiano del lugar, es mediodía. Se define el día solar verdadero como el intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano del lugar o dos mediodías consecutivos. Haciendo observaciones en distintas épocas del año, se comprueba que los días así definidos no tienen todos la misma duración. En los meses de la mitad del año, la duración del día es muy cercana a 24 horas, pero alrededor del 15 de Septiembre, los días son de 23 horas, 59 minutos y 40 segundos, mientras que cerca de la Navidad los días son de 24 horas y 20 segundos de duración.<sup>10</sup> Los días solares verdaderos se dividen en 24 horas verdaderas y nuestro reloj de sol nos marca la hora solar verdadera.<sup>11</sup>

El llamado día solar medio es el promedio entre todos los días verdaderos. A pesar de no ser real, es más práctico medir el tiempo utilizando el día solar medio cuya duración es siempre la misma, 24 horas. El movimiento de ese "sol medio", que no está señalado por nada en el cielo, nos da la hora solar media.

Aunque las variaciones en la duración de los días solares y los días medios son pequeñas, su acumulación produce diferencias notables entre la hora solar verdadera y la hora solar media. Estas diferencias alcanzan un máximo de poco más de 14 minutos a mediados de febrero (cuando la hora solar verdadera va retrasada respecto a la hora solar media) y poco más de 16 minutos al principio de noviembre (cuando la hora solar verdadera va adelantada respecto a la hora solar media). Existen también otras dos variaciones menores a mediados de mayo (cuando la hora solar verdadera va adelantada aproximadamente 4 minutos) y a finales de julio (cuando la hora solar verdadera va atrasada un poco más de 6 minutos).

Las razones para estas diferencias se deben a dos causas independientes. La primera es que el plano del ecuador no es el mismo que el plano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, sino que está inclinado respecto de ella por lo que se conoce como el ángulo de oblicuidad. Y la segunda razón es que la órbita de la Tierra alrededor del Sol es una elipse y no un círculo; por ello el movimiento aparente del Sol no es igual todo el año. El Sol parece moverse más rápido cuando la Tierra está más cerca de él.

La llamada ecuación del tiempo se define formalmente como la diferencia entre la hora solar media y la hora solar verdadera.<sup>12</sup>

**Figura 8: Gráfica de la ecuación del tiempo durante el año.**



Fuente: Archivo relojes de sol.

Entonces la ecuación del tiempo puede definirse como la siguiente:

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

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

Dónde:

E: Ecuación del tiempo (minutos).

B: Latitud geocéntrica.

n: Día juliano del año.

Y para la conversión entre la hora solar y la hora civil se tiene la siguiente ecuación:

$$T_s - T_c = 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

Dónde:

T<sub>s</sub>: Tiempo solar.

T<sub>c</sub>: Tiempo civil.

L<sub>st</sub>: Meridiano estándar para el cual está basado el tiempo local.

L<sub>loc</sub>: Longitud del lugar.

E: Ecuación del tiempo.

.

## 2.5. Factores para el cálculo de la radiación en condiciones de cielo real.

### 2.5.1. Radiación solar en condiciones de cielo despejado.

Los modelos de cielo despejado estiman la radiación solar terrestre bajo un cielo sin nubes como función del ángulo de elevación solar, altitud de emplazamiento, concentración de aerosol, vapor de agua, y diversas condiciones atmosféricas. Este informe proporciona una visión general de una serie de modelos de irradiancia horizontal global (GHI) en condiciones de cielo despejado desde muy simples hasta los complejos. La validación de los modelos de cielo despejado requiere la comparación de los resultados del modelo a irradiancia medida durante períodos de cielo despejado.

El modelado de la radiación solar en condiciones de cielo despejado fue llevado a cabo mediante las fórmulas sugeridas por Kitler y Mikler (1986), teniendo en cuenta la atmósfera, parámetros geométricos y geográficos, añadiendo el efecto de sombras en las horas de insolación de la topografía de la región a través de un DEM, se trata de modelos detallados espaciales y temporales de la radiación solar entrante para los estudios sobre diversos fenómenos ambientales, incluyendo dinámica de los glaciares, estudios hidrológicos, etcétera (Kryza, M. et al, 2010) y también es confiable pues implementa la posibilidad de refinar/reducir aún más la radiación en cielo despejado mediante coeficientes de corrección atmosférica adecuados (por ejemplo nubosidad) (Hofierka y Kanuk, 2009).

Este modelo viene implementado como rutina en un sistema GIS denominado Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) y que puede ser tratado como una herramienta confiable y eficiente (Kryza, M. et al, 2010), además que proporciona una fuente abierta parcial, relativamente sin computación intensiva, pero aún con alta capacidad de medios de manipulación para modelar la energía solar a gran escala para la planificación de un sistema fotovoltaico (Nguyen, H. T., & Pearce, J. M., 2010), el fundamento teórico del modelo r.sun está basado en el trabajo para el desarrollo del Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA) (McKenney (1999), Page 1986 y Page et al. 2001). Por lo tanto será tomado en cuenta para el cálculo de la radiación solar

en condiciones de cielo despejado. Tomando en consideración los modelos existentes de radiación difusa y sus limitaciones, el equipo ESRA seleccionó el modelo para superficies inclinadas de Muneer (1990) porque tiene una fuerte base teórica y por lo tanto mayor potencial para su posterior mejoría. La radiación reflejada contribuye únicamente con un pequeño porcentaje y es con frecuencia ignorada. En el modelo r.sun se han adoptado las recomendaciones del equipo ESRA para la radiación difusa y reflejada.

### **2.5.2. Imágenes de satélite.**

Una imagen satelital es el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial mediante la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste, producto que posteriormente se transmite a estaciones terrenas para su visualización, procesamiento y análisis.

Existen diferentes tipos de imágenes satelitales, dependiendo del tipo de sensor y de la finalidad de captación con la que fue construido. Desde las primeras cámaras fotográficas montadas en satélites en la década de los '60 hasta los más sofisticados y sensibles sensores hiperespectrales del día de hoy, existe una muy amplia gama de tipos de imágenes satelitales que hoy se utilizan en las más diversas áreas, dependiendo de su resolución espacial así como de la información espectral que poseen; desde el espionaje militar, el monitoreo del cambio climático, monitoreo de incendios e inundaciones, seguimiento de huracanes y tifones, evaluaciones multiespectrales de vegetación, y hasta las que hoy tanto nos deslumbran al "poder ver el techo de nuestra casa" con el ya célebre "google earth" (por nombrar las de más pública notoriedad).

Pero la lista no termina aquí, existen infinidad de aplicaciones probadas y potenciales de las imágenes satelitales, así como también, numerosos proyectos de nuevos sensores a ser aplicados, no ya solamente para el monitoreo de nuestro planeta, sino también, para el mapeo y análisis de otros astros del sistema solar.<sup>13</sup>

## 2.6. Sistemas de Información Geográfica.

Un Sistema de Información Geográfica (también conocido con los acrónimos SIG en español o GIS en inglés) es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, hardware, software, procesos) que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la incorporación de aspectos sociales-culturales, económicos y ambientales que conducen a la toma de decisiones de una manera más eficaz.<sup>14</sup>

En el sentido más estricto, es cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.<sup>14</sup>

La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica puede ser utilizada para investigaciones científicas, la gestión de los recursos, la gestión de activos, la arqueología, la evaluación del impacto ambiental, la planificación urbana, la cartografía, la sociología, la geografía histórica, el marketing, la logística por nombrar unos pocos. Por ejemplo, un SIG podría permitir a los grupos de emergencia calcular fácilmente los tiempos de respuesta en caso de un desastre natural, o encontrar los humedales que necesitan protección contra la contaminación, o pueden ser utilizados por una empresa para ubicar un nuevo negocio y aprovechar las ventajas de una zona de mercado con escasa competencia.<sup>14</sup>

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de los mapas digitales. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.<sup>14</sup>

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología geoespacial de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.<sup>14</sup>

Las principales cuestiones que puede resolver un sistema de información geográfica, ordenadas de menor a mayor complejidad, son:

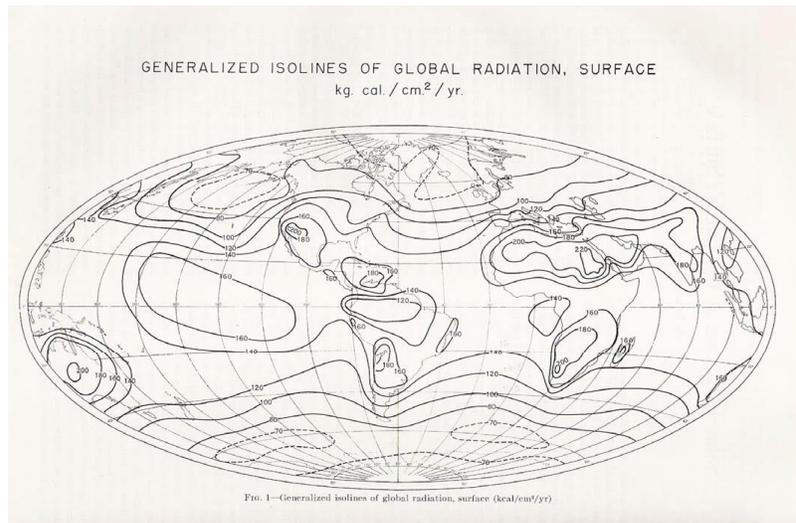
- Localización: preguntar por las características de un lugar concreto.
- Condición: el cumplimiento o no de unas condiciones impuestas al sistema.
- Tendencia: comparación entre situaciones temporales o espaciales distintas de alguna característica.
- Rutas: cálculo de rutas óptimas entre dos o más puntos.
- Pautas: detección de pautas espaciales.
- Modelos: generación de modelos a partir de fenómenos o actuaciones simuladas.<sup>14</sup>

Por ser tan versátiles, el campo de aplicación de los sistemas de información geográfica es muy amplio, pudiendo utilizarse en la mayoría de las actividades con un componente espacial. La profunda revolución que han provocado las nuevas tecnologías ha incidido de manera decisiva en su evolución.<sup>14</sup>

### III. ANTECEDENTES

Uno de los primeros trabajos que presentó cartas con la distribución de la irradiación solar en Latinoamérica fue el de Black (1956) basado en su mayor parte en datos estimados a partir de correlaciones establecidas entre el índice de nubosidad y la radiación global (12 cartas mundiales para las que no utilizó datos de estaciones sudamericanas). Landsberg (1961) publicó años más tarde una revisión teniendo en cuenta nuevas mediciones llevadas a cabo durante el Año Geofísico Internacional, presentando un mapa de la distribución anual de la radiación global.

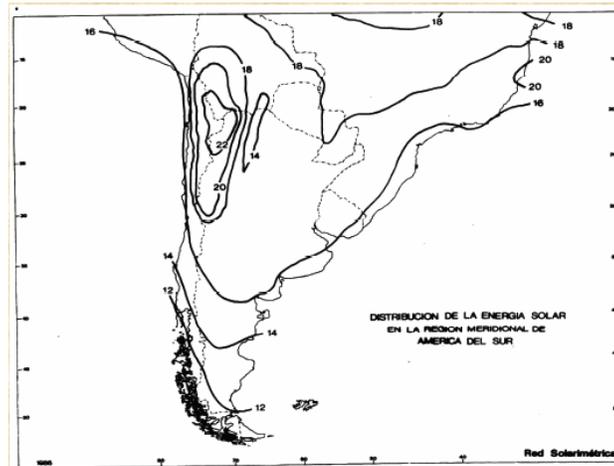
**Figura 9: Distribución anual de la radiación global de Landsberg (Landsberg, H., 1961).**



Fuente: Landsberg, H., 1961.

Grossi *et al.* (1986) presentaron un trabajo sobre la distribución del promedio anual de energía solar diaria en la región meridional de América del Sur, teniendo en cuenta tanto la información previa del Brasil cuanto la actualizada de la red piranométrica del Instituto Nacional de Meteorología-INMET, la disponible en Argentina y Chile, viéndose en la necesidad de elaborar evaluaciones preliminares para Paraguay y Bolivia.

**Figura 10: Distribución de la energía solar de la región meridional de América del Sur (Grossi et. al, 1986).**

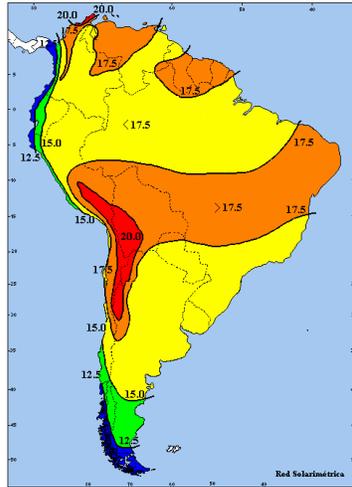


Fuente: Grossi et al., 1986.

Si bien el número de estaciones de medición de las horas de brillo solar (heliofanía) es muy elevado en Latinoamérica, no lo es tanto el dedicado a medir la irradiación global, y su confiabilidad, bastante cuestionable; además, los registros de heliofanía pueden tener muchos años de extensión pero, en general, los de irradiación son de corta vida o carecen de continuidad. Por otra parte, en casi todos los países iberoamericanos se han elaborado algunas cartas con la distribución espacio-temporal del recurso pero difícilmente se las puede compatibilizar con las de países vecinos y aún, con las de otros autores del mismo país.

Como consecuencia de la información disponible hasta ese momento en América del Sur, Grossi Gallegos (1998) trató de compatibilizarla en una carta anual, encontrándose con extensas zonas en el centro del territorio en las que no se dispone de ninguna información confiable y otras en las que la misma es incompatible con otros registros.

**Figura 11: Distribución espacial del promedio anual de la radiación solar global diaria en América del Sur (Grossi Gallegos, 1998a)**



Fuente: Grossi Gallegos, 1998a.

Los niveles de irradiación global diaria se indican en  $\text{MJ}/\text{m}^2$  (la incertidumbre en los datos no permitió una menor separación entre isólinas).

Lucano M. e Iván E. (2010) estimaron los valores de la radiación solar global por medio de modelos de Sistemas de Información Geográfica e imágenes satelitales obtenidos a través de la metodología SSE de la NASA para un periodo de registros de 22 años. Con estos valores de radiación, se obtuvo la distribución temporal y espacial de la radiación solar para el Departamento de Cochabamba mediante un proceso de interpolación que utiliza el paquete de análisis geoestadístico ILWIS, considerando datos de una rejilla conformada por 16 casillas que abarcan el departamento; se utilizó el método de superficie móvil con distancia inversa, exponente de peso 1, distancia esférica y segundo grado parabólico. Se observó que los niveles de radiación más bajos corresponden a los meses de mayo a julio (invierno) y los niveles de radiación más altos corresponden a los meses de octubre a diciembre (primavera y verano). Asimismo, se observó que la parte noreste de Cochabamba presenta los valores más bajos de media anual de radiación global, entre  $4.2$  a  $4.5 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ , ya que esta es una zona de baja altitud sobre el nivel del mar y se caracteriza por su clima tropical y alta humedad, generando una mayor dispersión de la radiación solar, en tanto que en la zona suroeste la radiación solar aumenta, ya que en ésta se localiza la Cordillera Oriental Central con un clima seco cuyos valores varían entre  $5.76.3 \text{ kWh}/\text{m}^2$  al día. También se distinguen siete regiones de niveles de radiación que van aumentando de

noreste a suroeste, tal como se observó en estudios anteriores. Los valores de radiación obtenidos mediante la interpolación fueron validados con datos medidos en superficie con un error porcentual medio anual del 10 %.

Las mediciones de radiación solar en México datan del año de 1911 (Muhlia, 1990, Estrada-Cajigal, 1992), cuando fueron iniciadas por el Dr. Ladislao Gorczyński, que las continuó hasta 1917. Posteriormente, personal del Servicio Meteorológico Mexicano continúa esta tarea en el Observatorio Astronómico de Tacubaya bajo la dirección del mismo Dr. Gorczyński, de 1923 a 1928. Las anteriores fueron mediciones de radiación directa usando un pirheliómetro de compensación eléctrica de Ångström. Los resultados de estas mediciones se publicaron en reportes, de los cuales una parte se encuentran en los archivos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, en la actualidad es una dependencia de la Comisión Nacional del Agua), mientras no se sabe con certeza la ubicación actual del resto.<sup>2</sup>

No hay registro de mediciones posteriores si no desde el año de 1957, cuando con motivo del Año Geofísico Internacional, el Instituto de Ciencia Aplicada y el Instituto de Geofísica de la UNAM, retoman esta tarea. Se instalaron cinco estaciones solarimétricas: en Ciudad Universitaria, D.F.; Alzomoni, Estado de México, San Cristóbal de las Casas, Chis.; Veracruz, Ver. y Chihuahua, Chi. Moviéndose en 1959 la estación de Alzomoni a Tlamacas, Estado de México. También se instaló en 1960 una estación en San Luís Potosí, S.L.P. De estas estaciones las únicas que operaron por un período largo fueron la de Chihuahua, Chi., durante quince años y la de Ciudad Universitaria, que opera hasta la fecha. En años recientes el Instituto de Geofísica de la UNAM puso en operación una estación en Orizabita, Hgo., la cual también continúa en operación a la fecha. Se ha intentado instalar estaciones en otros lugares pero no han tenido éxito.<sup>2</sup>

Por otro lado, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, también puso en operación en 1979 una pequeña red de cuatro estaciones. Desafortunadamente los datos obtenidos no fueron de la calidad adecuada, debido a que los instrumentos usados eran dispositivos cuyo diseño no había sido suficientemente puesto a prueba en condiciones de operación continua. Debido a esto y otros problemas, dicha red dejó de operar en 1983.<sup>2</sup>

Además de lo anterior, varias instituciones académicas han realizado mediciones en diferentes épocas. En algunos casos estas mediciones han sido hechas durante períodos muy cortos, por lo que sus datos no son realmente útiles para hacer una estimación estadística del recurso solar, y en otros no es información fácilmente accesible.<sup>2</sup>

Algunas instituciones han medido radiación solar con interés específicamente en la evaluación del recurso energético solar, como por ejemplo el Centro de investigación en Energía de la UNAM, a partir de 1990 (Quiñones Aguilar y col., 2002) y el Grupo de Energía de la Universidad de Sonora, a partir de 1993 (Villa Martínez y col., 2001).<sup>2</sup>

Ramos *et. al.* (2004) presentan los resultados obtenidos de las imágenes AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y APT (Automatic Picture Transmission) de la Estación Terrena de Satélites de la Secretaría de Gobernación del Estado de Puebla, en colaboración con la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; los estudios se enfocaron al análisis, identificación e información de los aspectos relacionados a las Ciencias de la Tierra (geológicos, ecológicos y edafológicos, entre otros) y Atmosféricas (seguimiento de fenómenos meteorológicos) en la zona de estudio. Se obtuvo información de los diversos satélites localizados en el espacio, se procesaron las imágenes en los canales 1 al 5; el canal 1 con rango visible y los canales 2 al 5 infrarrojos (térmico). Los estudios realizados en la zona norte del Estado de Puebla, nos ha permitido identificar zonas de mantos freáticos y estructuras geológicas de mediana altitud, que muestran una filtración y acumulación de aguas que en época de lluvias es muy importante. Determinándose además que su configuración geológica básica fue durante el Cenozoico; el periodo Cuaternario se caracterizó por un por intenso protagonismo tectónico y sísmico. Las zonas de mayor actividad volcánica se sitúan al sur de la gran falla transversal que sigue la línea del paralelo 19, que junto con la geohidrología determinada nos da una zona altamente potencial en aguas subterráneas.

Pérez et al. (2002) presentaron un modelo simple capaz de aprovechar las imágenes visibles del satélite geoestacionario para la producción de irradiancias directa y global. Validado contra 10 localidades americanas que representaban un amplio rango de ambientes climáticos y concluyen que el desempeño del modelo es sistémicamente mejorado, comparado a prácticas de modelado basadas en el espectro visible.

Este modelo ha sido basado en la idea que Cano et al. (1986) desarrolló en su modelo, pero fue mejorado por Pérez et al., de la cual se obtuvo la idea principal para trabajar en este estudio, la cual denomina imágenes de satélite que procesadas mediante algún modelo matemático puede arrojar cierta información sobre algún parámetro estimado. Solo se utilizó la idea de poder utilizar imágenes de satélite como unidades de información compactadas o matrices y que a través de estas las funciones matemáticas sean logradas, pero lo que hace que este modelo no sea el ideal para utilizarlo en este estudio y así poder desarrollar uno nuevo, es que las imágenes de satélite son procesadas varias veces debido al uso de un rango dinámico del cual se desprende un promedio de datos que determinará el dato más alto y el más bajo, además que este modelo no toma en cuenta otro tipo de parámetros atmosféricos, y como última instancia este modelo ha sido desarrollado para tomar en cuenta el albedo superficial específicamente la nieve. Otra de las cosas que no se puede determinar en este modelo es las ecuaciones que se utilizan para determinar la radiación solar global, la cual se propone que es empírica.

Actualmente no se disponen de mapas (datos) de radiación solar regionales particularmente del estado de Chiapas, México debido a que la metodología utilizada para la obtención de estos datos que requiere de instrumentos de medición de alto costo. La obtención de datos de radiación solar es importante para determinar las zonas geográficas que tienen un alto potencial para su aprovechamiento y para el pre diseño de los equipos que utilizan como fuente la energía solar.

Actualmente, las tablas o los mapas de radiación solar se elaboran a partir de mediciones vía satélite o a partir de los datos obtenidos en campo, la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la elaboración de mapas de radiación solar es una alternativa bastante eficaz en la obtención del potencial solar.

De esta manera, a través de los SIG y de un buen modelo matemático es posible estimar datos sobre radiación solar para una zona en particular.

# IV. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

## 4.1. Objetivo General.

Evaluar el potencial solar del estado de Chiapas por medio de imágenes satelitales de alta resolución.

## 4.2. Objetivos Específicos.

1. Obtener el modelo físico apropiado para la estimación del potencial de la radiación solar.
2. Crear mapas del potencial de la radiación solar.
3. Validación de los resultados obtenidos.

## 4.3. Hipótesis.

La técnica de la percepción remota es eficiente sobre el cálculo de la radiación solar conjugado con datos de condiciones atmosféricas y el uso de estaciones meteorológicas como base de mediciones en tierra.

## V. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la falta de información representada en cartografía digital y análoga sobre la radiación solar en el Estado de Chiapas se desconoce el comportamiento de este fenómeno, en ese sentido no se cuenta con un monitoreo adecuado para su completo aprovechamiento ya que la información de la radiación solar sirve también para hacer futuras predicciones del comportamiento del clima y así mejorar los sistemas que hagan uso de este recurso. (Estrada *et. al.*, 2005)

No existe una manera sencilla de predecir el valor de la irradiación solar en un sitio o momento dado. Esto tiene implicaciones en el diseño de instalaciones solares, las cuales se construyen para operar durante un número grande de años. Es muy importante poder estimar la energía disponible a lo largo de la vida útil del sistema, pero también su variabilidad. Por lo tanto, para poder conocer realmente el recurso solar disponible en un sitio, se requiere hacer mediciones sistemáticas de la radiación global a lo largo de un periodo de varios años (por lo menos tres años, pero idealmente durante un periodo de diez). Esto permitiría obtener lo que se conoce como un año solar típico a partir del conocimiento de la climatología del parámetro mencionado. (Estrada *et. al.*, 2005).

La evaluación de la radiación solar por medios indirectos, dígase percepción remota en este caso, es confiable si los datos son conjugados con los obtenidos de las estaciones meteorológicas, y así poder crear los mapas a partir de estos datos, dando una mayor fiabilidad al poder interpretarlos, y al momento de la instalación de equipos que permitirán su aprovechamiento al máximo.

Se necesita de una metodología que satisfaga las necesidades al cual nos enfrentamos, en este caso, determinar la radiación solar en mapas de alta resolución por medio de modelos matemáticos y datos de percepción remota, que tome en cuenta los parámetros atmosféricos, efectos de la variabilidad de las nubes y efectos de la topografía.

## VI. JUSTIFICACIÓN

La radiación solar es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima.

Medir la radiación solar es importante para un amplio rango de aplicaciones, en el sector de la ingeniería, destacándose el monitoreo del efecto en el crecimiento de las plantas, análisis de la evaporación e irrigación, generación de electricidad, diseño y uso de sistemas de calentamiento solar, implicaciones en la salud (p.e. cáncer de piel), modelos de predicción del tiempo y el clima y muchas aplicaciones más.

En este proyecto se llevará a cabo la evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica, es decir, aprovechar la energía emitida por el sol y recibirla mediante algún dispositivo que convierta esta energía luminosa a energía eléctrica, por medio de modelos matemáticos y datos de percepción remota, con lo cual nos abre un panorama más amplio hacia la tecnología y captar este recurso al máximo como principal motor de energía.

Pero ¿Por qué aprovechar la energía solar? La electricidad solar además preserva los combustibles fósiles de la tierra: carbón, aceite, gas natural, y reduce la contaminación del aire y el ruido asociado a estas fuentes de energía. Otros beneficios de la de electricidad solar son la disponibilidad de energía cuando hay cortes de electricidad en la red y el no sufrir los futuros aumentos del precio de la electricidad. La electricidad solar puede ser una muy buena alternativa a las fuentes de energía tradicionales considerando el precio actual de la electricidad, las ayudas y otras ventajas. La fiabilidad y durabilidad de las instalaciones fotovoltaicas son excepcionales, una instalación fotovoltaica típica puede durar 30 años con un mantenimiento mínimo.

México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo. La mitad del territorio nacional presenta una insolación promedio de 5.3 KWh por metro cuadrado al día, suficiente para satisfacer la necesidad de un

hogar mexicano promedio. Esto nos coloca en una situación muy favorable para el uso de la energía solar.

Debido a la gran ventaja que presenta nuestro país ante varios del mundo, claramente se nota que está posicionado dentro de los cinco países con mayor potencial solar, por lo cual este proyecto está encausado a hacer esa evaluación por medio de la técnica de la percepción remota porque con esta es posible generar mapas de radiación solar con una resolución muy detallada (de 1 a 10 km<sup>2</sup>) sobre regiones específicas. Esto los convierte en una fuente de información muy adecuada, por ejemplo, para ser integrada en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además de que estudios previos confirman que esta técnica es la que más precisión ha dado en el estudio de este fenómeno.

Los mapas generados en este proyecto servirán para la mejor visualización del recurso y también servirán como datos para estudios analíticos de recurso solar, escenarios de implementación, evaluaciones económicas y toma de decisiones en otros proyectos generados en la misma área de estudio.

## VII. MÉTODOS

La metodología elegida para este proyecto es el presentado por Perez et al. (2002), el cual está basado en los estudios del modelo de Cano et al. (1986) basado en la observación de que la transmisividad atmosférica esta linealmente relacionada al albedo planetario de la Tierra (Schmetz, 1989) detectada por el satélite como radiancia de la Tierra y reportada como una imagen.

Indica también dos partes importantes que se deben de mencionar, la primera es obtener un índice de turbiedad ocasionado por las nubes y su variabilidad en el tiempo y espacio a partir de imágenes satelitales geoestacionarias con una resolución temporal de 15 minutos a lo largo de todo un año de observaciones y una resolución espacial de 1 km, y la otra es obtener la radiación solar a partir de un modelo ya establecido. A partir de estas dos partes que distinguen esta metodología se ajustó la radiación solar modelada con el índice de turbiedad generado por las nubes y sus efectos en la superficie, obteniendo así un promedio de la radiación solar global obtenida considerando varios factores que afectan este intercambio de energía que interactúa entre el espacio y la tierra.

La elección de la metodología se llevó a cabo tomando en cuenta varios factores importantes y retomados de la lectura en el estado del arte, con lo cual pudimos hacer que esta metodología es de las precisas, pues aparte de incluir la técnica de la percepción remota y hacer hincapié que es hasta hoy en día de las técnicas más fiables en la obtención del parámetro solar, se tiene que el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos toman esta metodología para generar los mapas solares que están desde su propio sitio web y que están al alcance de todos para obtención o conocimiento del campo fotovoltaico, además de eso esta metodología ha sido utilizada como base de otras metodologías en el estudio del comportamiento de la radiación solar en Europa. Así esta metodología se toma en cuenta debido a que los componentes que hacen que su desempeño sea bueno sea que conjunta datos modelados con parámetros estocásticos, y me refiero a la variabilidad de las nubes, en tiempo y espacio, por lo cual es la metodología idónea en el estudio de este parámetro, que a partir de esto, se obtiene un índice de turbiedad derivado del parámetro estocástico. Lo que sea agregado a la metodología es la modelación de la Radiación Global, determinada

Una parte fundamental de esta metodología es la validación del trabajo, a lo cual se acudió a los datos generados por las Estaciones Automáticas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional, de los cuales se obtuvieron datos diarios sobre radiación solar.

La radiación solar global modelada se calculó utilizando parámetros geográficos, geométricos, topográficos y atmosféricos. Estos parámetros son los siguientes:

- Parámetros geográficos: Un área definida por sus coordenadas de tipo métricas, en una proyección UTM y un datum WGS84, zona 15 perteneciente al estado de Chiapas en la República Mexicana.
- Parámetros geométricos: son los concernientes a la posición del Sol dependiendo la fecha en la que el cálculo se esté haciendo, estos son declinación, azimut solar y elevación del Sol.
- Parámetros topográficos: un Modelo Digital de Elevaciones proporcionado por datos LIDAR del INEGI a una resolución de 30 m en pixel y una cobertura total del estado, un mapa de pendientes generado por un software con la misma resolución del MDE al igual que un mapa de aspecto. Un mapa de horizontes generado por un software el cual determina la altura angular de horizonte de terreno en radianes, en este caso se utilizó la resolución temporal de las imágenes de satélite, es decir cada 15'. Este mapa es utilizado con fin de agilizar los procesos en los cálculos de la radiación solar.
- Parámetros atmosféricos: Mapas de albedo superficial con una resolución de 500 m que se obtuvieron desde productos MODIS, y mapas del coeficiente de turbiedad de Linke que se obtuvieron desde la base de datos descargables del SoDa Service.

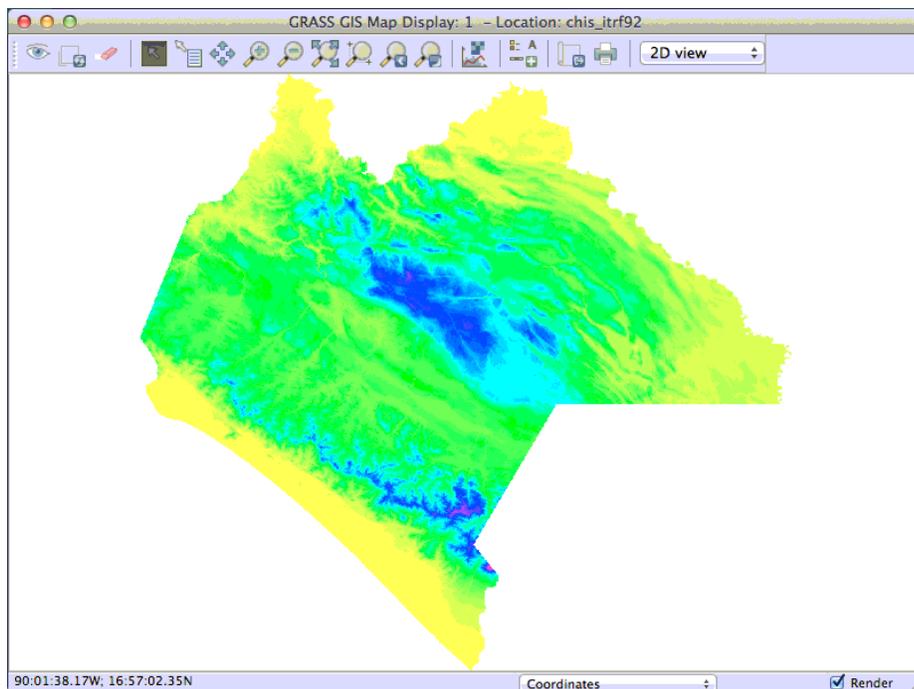
Los mapas generados durante el cálculo de la radiación solar modelada es el resultado de varias pruebas que se han hecho con el fin de recrear las gráficas obtenidas de las Estaciones Meteorológicas, de lo cual se obtuvo que los parámetros no pueden ser tomados como un dato estándar para todo el territorio debido a la variabilidad que presenta la zona de estudio, debido a que es de una superficie considerable, es por ello que se optó por tener un mapa en donde pixel por pixel contengan los datos de la variabilidad de estos parámetros y poder garantizar el correcto funcionamiento de dicho cálculo y obtener datos más fiables.

## 7.1. Modelo Digital de Elevación.

El MDE fue obtenido desde los productos descargables de la página oficial del INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>) del cual se optó por una resolución espacial de 30 m del estado de Chiapas. El archivo descargado tiene las siguientes características:

Nombre:	Chiapas30_R15m.bil
Sistema de coordenadas geográficas:	GCS_ITRF_1992
Datum:	D_ITRF_1992
Unidad angular:	Grados
Tamaño de píxel (X, Y):	0.00013888889 (15 m)
Rango de datos (min, max):	-18, 4084

**Figura 12: MDE original descargado desde el portal del INEGI.**



Fuente: Archivo.

Debido a que los datos de satélite fueron obtenidos a una resolución de 1 y 4 km, se estandarizó a una resolución de 500 m para cumplir con la parte de mapas a alta resolución, esta resolución es de las primeras que se utilizan en mapas de este tipo, pues los mapas de la NREL cuentan con mapas de 1 y 10 km.

Para empezar a trabajar con el MDE se llevó a cabo primero a una reproyección UTM en zona 15N con datum WGS84 y un remuestreo a 30 m con el método bilinear, mediante el siguiente módulo del GRASS GIS 7.0:

```
r.proj    input="Chiapas30_R15m"    location="chis_itrf92"    output="mde_30m_bil"  
method="bilinear" resolution=30
```

**r.proj:** Función de GRASS GIS 7.0, reproyecta un raster desde una localización dada a una localización actual.

**input:** Nombre del raster a reproyectar.

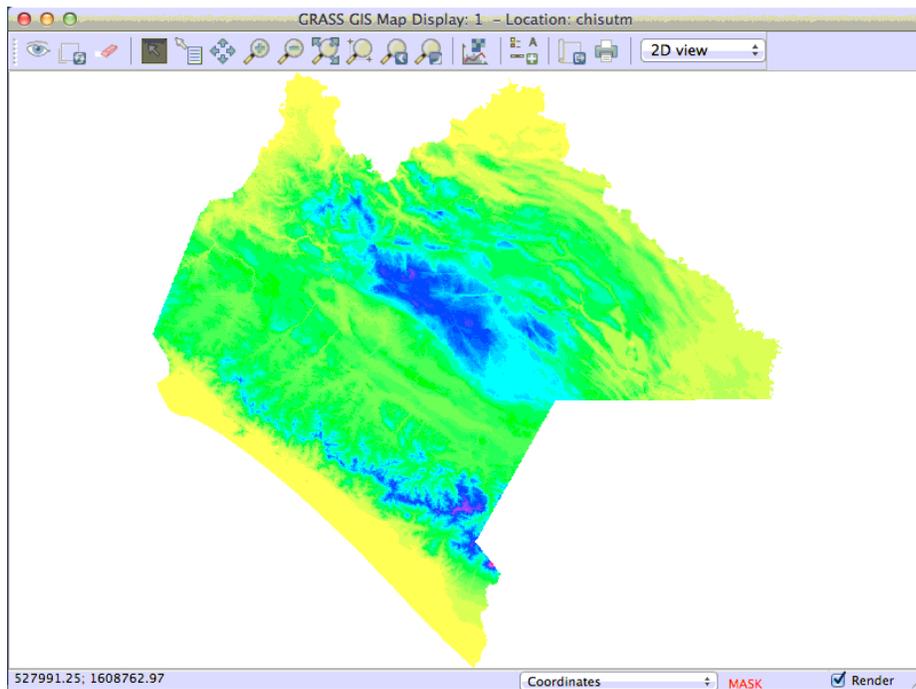
**location:** Localización que contiene el raster de entrada.

**output:** Nombre del raster de salida.

**method:** Método de interpolación que se usará.

**resolution:** resolución espacial del raster de salida.

**Figura 13: MDE reproyectado y remuestreado a 30 m.**



Fuente: Archivo.

Para fines de mapas finales que harán parte de esta tesis se remuestrearon los datos a 500 m por el método bilinear. Esto se hizo por el siguiente módulo de GRASS GIS 7.0:

```
r.resamp.interp input="mde_30m_bil" output="mde_bil" method="bilinear"
```

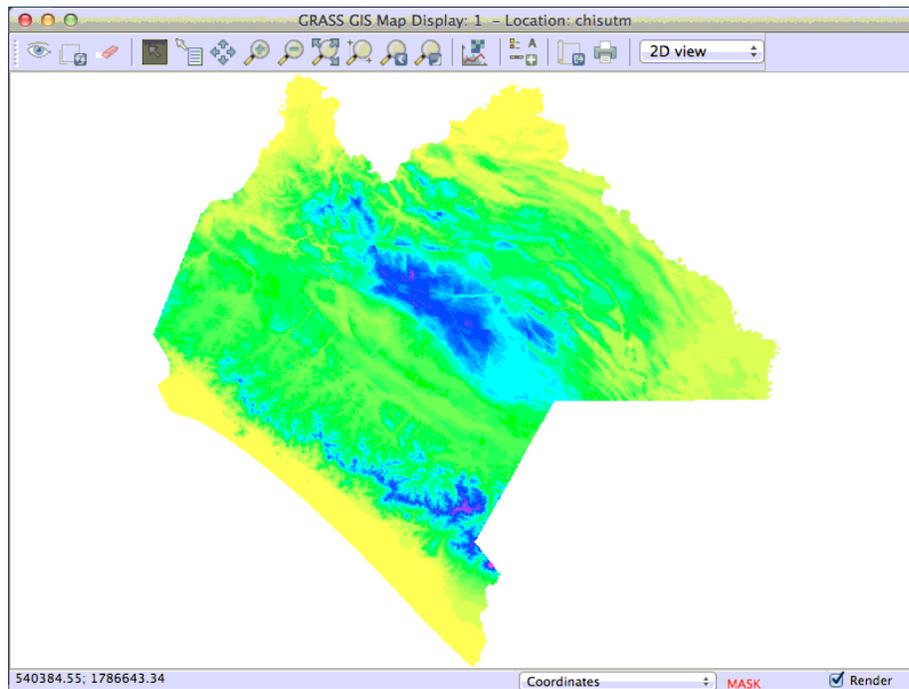
**r.resam.interp:** Módulo de GRASS GIS 7.0 que remuestrea un raster a una malla más fina con algún método de interpolación.

**input:** Nombre del raster a interpolar

**output:** Nombre del raster de salida.

**method:** Método de interpolación de muestreo.

**Figura 14: MDE reproyectado y remuestreado a 500 m.**



Fuente: Archivo.

Y ahora para el uso del nuevo modelo de radiación solar en condiciones de cielo real, se utilizó este MDE pero en formato ERS, por lo que se exportó con el siguiente módulo:

```
r.out.gdal input=mde_bil output=/Users/jaceituno/public/data/SR_Mod/MDE/mde_cs.ers  
format=ERS nodata=10000
```

**r.out.gdal:** Módulo de GRASS GIS 7.0 el cual exporta mapas de GRASS a formatos GDAL.

**input:** Nombre del mapa que será exportado.

**output:** Nombre del mapa de salida.

**format:** Formato de datos raster a escribir.

**nodata:** Asigna un valor de “no datos” específico ara bandas de salida.

Por lo tanto, las características finales que se utilizaron para el MDE en el uso para mapas de radiación solar en condiciones de cielo real son las siguientes:

Nombre: mde\_bil/mde\_cs

Sistema de coordenadas geográficas:	NUTM_15
Datum:	WGS84
Unidad angular:	Metros
Tamaño de píxel (X, Y):	500.018, 500.007
Rango de datos (min, max):	-18, 3950.44

## 7.2. Mapas de albedo superficial.

Para los datos de mapas de albedo se obtuvieron desde el sitio de productos MODIS ([https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access/data\\_pool](https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool)), dentro del cual se escogió la resolución de 500 m y una temporalidad de 16 días, por lo cual se escogió el producto con código MCD43A3, el cual provee datos descritos en reflectancia hemiesférica direccional (black-sky albedo) y reflectancia bihemiesférica (white-sky albedo) en un nivel 3 en una proyección Sinusoidal. En la generación de este producto son usados los datos Terra y Aqua, los cuales proporcionan la más alta probabilidad en datos de entrada de calidad, es un producto combinado por lo cual es designado como un MCD.

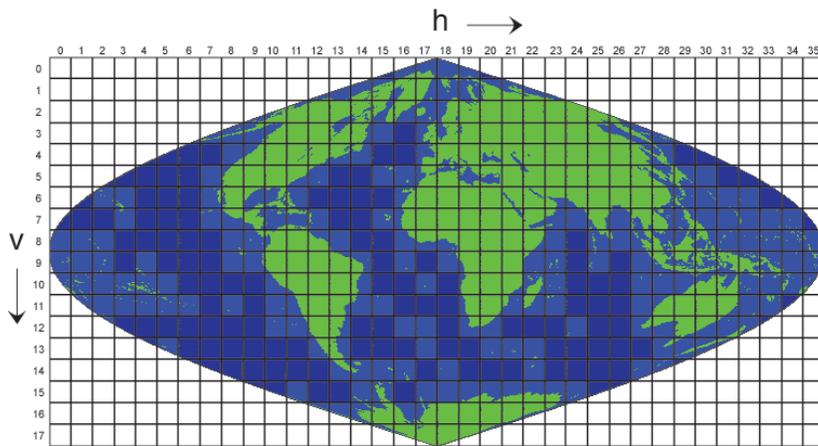
**Figura 15: Lista de productos MODIS, del cual se seleccionó el correspondiente a albedo.**

Short Name	Platform	MODIS Data Product	Raster type	Res (m)	Temporal Granularity
<a href="#">MCD12C1</a>	Combined	Land Cover Type	CMG	5600m	Yearly
<a href="#">MCD12Q1</a>	Combined	Land Cover Type	Tile	500m	Yearly
<a href="#">MCD12Q2</a>	Combined	Land Cover Dynamics	Tile	500m	Yearly
<a href="#">MCD15A2</a>	Combined	Leaf Area Index - FPAR	Tile	1000m	8 day
<a href="#">MCD15A3</a>	Combined	Leaf Area Index - FPAR	Tile	1000m	4 day
<a href="#">MCD43A1</a>	Combined	BRDF-Albedo Model Parameters	Tile	500m	16 day
<a href="#">MCD43A2</a>	Combined	BRDF-Albedo Quality	Tile	500m	16 day
<a href="#">MCD43A3</a>	Combined	Albedo	Tile	500m	16 day
<a href="#">MCD43A4</a>	Combined	Nadir BRDF-Adjusted Reflectance	Tile	500m	16 day
<a href="#">MCD43B1</a>	Combined	BRDF-Albedo Model Parameters	Tile	1000m	16 day
<a href="#">MCD43B2</a>	Combined	BRDF-Albedo Quality	Tile	1000m	16 day
<a href="#">MCD43B3</a>	Combined	Albedo	Tile	1000m	16 day

Fuente: Modis products.

Se descargaron los archivos en formato HDF (Hierarchical Data Format), pertenecientes al área de estudio y se llegó a la conclusión que se deberían de utilizar dos tomas, denominados en MODIS products como *tiles*, y los tiles correspondientes a Chiapas son: h09v07 y h08v07. (<http://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOTA/MCD43A3.005/>)

**Figura 16: Tiles correspondientes a productos MODIS.**



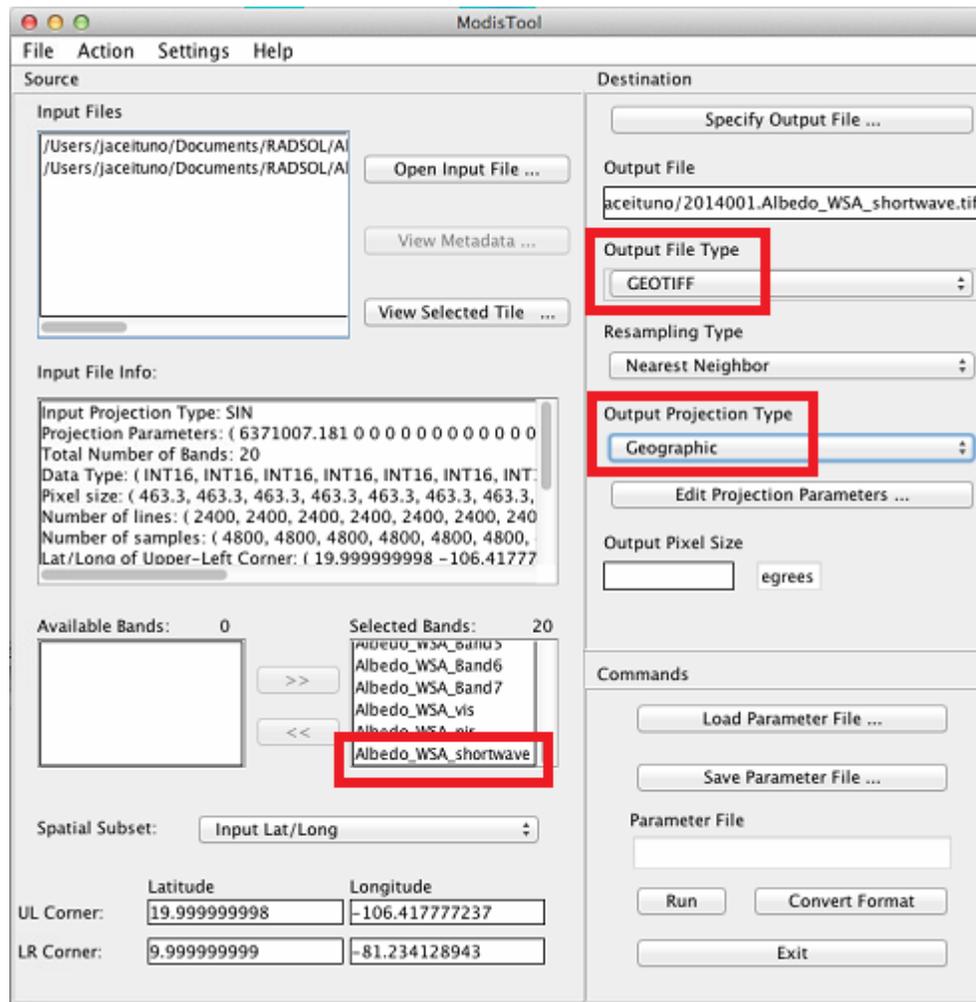
Fuente: MODIS tiles.

Se descargaron entonces via HTTP, tomando en cuenta que necesitaríamos datos de un año completo no tan alejado del año en el que estamos, por lo tanto los datos escogidos son los concernientes al 2013 en su totalidad, con lo cual se cubrió con un total de 47 archivos de tipo HDF y 47 archivos de tipo XML que son los metadatos de cada uno de los archivos HDF.

Dentro de estos archivos encontramos varios datos organizados en capas separadas en bandas de las cuales podría decirse que el albedo es obtenido por cada banda espectral del espectro electromagnético completo, por cual se optó trabajar con el shortwave del white-sky albedo de las bandas disponibles de estos datos.

Una vez descargados los 47 archivos se llevó a cabo la obtención absoluta de datos de la banda del shortwave del white-sky albedo, haciendo un mosaico con los dos tiles obtenidos e importando a archivos de tipo TIFF, con una proyección geográfica, transformándolas desde la proyección Sinusoidal. Todo esto se hizo con el software ModisTool en el cual se especificaron los parámetros de entrada y los de salida, tal como se ve en la figura siguiente:

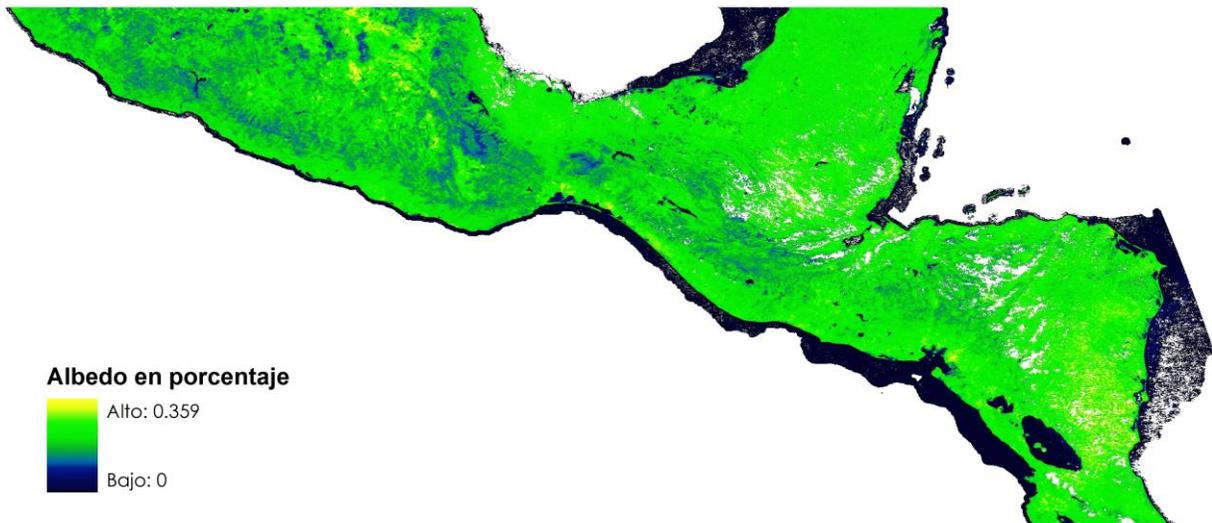
Figura 17: ModisTool con parámetros de entrada y salida de datos de albedo.



Fuente: Archivo.

De esta manera los datos de albedo se pudieron obtener y guardarlos en formato TIFF para comodidad y mejor manejo de la información, además para el siguiente paso que sería procesar esta información.

**Figura 18: Mosaico derivado de los tiles h09v07 y h08v07 en proyección geográfica en formato TIFF desde productos MCD43A3. Muestra el albedo en porcentaje en un mapa, del cual se desprendió la región en estudio.**



Fuente: Archivo.

Cada uno de los archivos exportados, fueron nuevamente procesados para una reproyección, esta vez la establecida para el área de trabajo, la proyección UTM en la zona 15, así que las coordenadas fueron transformadas desde la proyección geográfica dejando nuevos archivos dentro del sistema que hizo la reproyección.

Esto se hizo mediante una instrucción de un módulo de GRASS GIS, que fue la siguiente:

```
r.proj input="009" location="geog" output="a009"
```

De cada uno de los archivos que se descargaron se hizo la misma instrucción únicamente cambiando el nombre del archivo, estos números significa el día juliano del día correspondiente a la fecha de la toma, así el archivo 001 corresponde al 1 de enero de 2013, el 009 es el 9 de enero, y así sucesivamente a cada 8 días.

Los datos entonces disponibles son datos que no están en formato de albedo, esto es porcentaje, de lo cual a cada raster se le aplicó una nueva fórmula la cual es la siguiente:

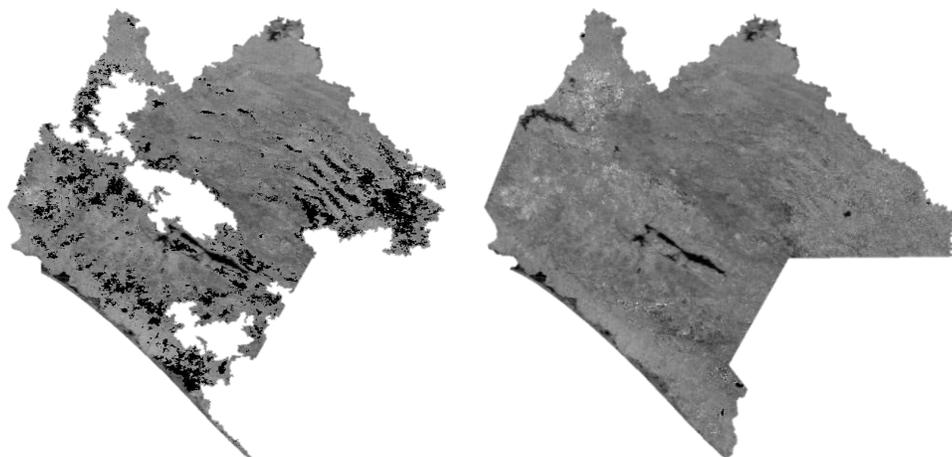
```
r.mapcalc "a009 = a009*0.001" --o
```

**r.mapcalc:** Módulo de calculadora raster

--o: --overwrite, permite a los archivos de salida ser sobrescritos.

La expresión matemática va entre paréntesis, esto significa que los datos son multiplicados por un factor de 0.001, así los datos raster quedan listos en formato de albedo.

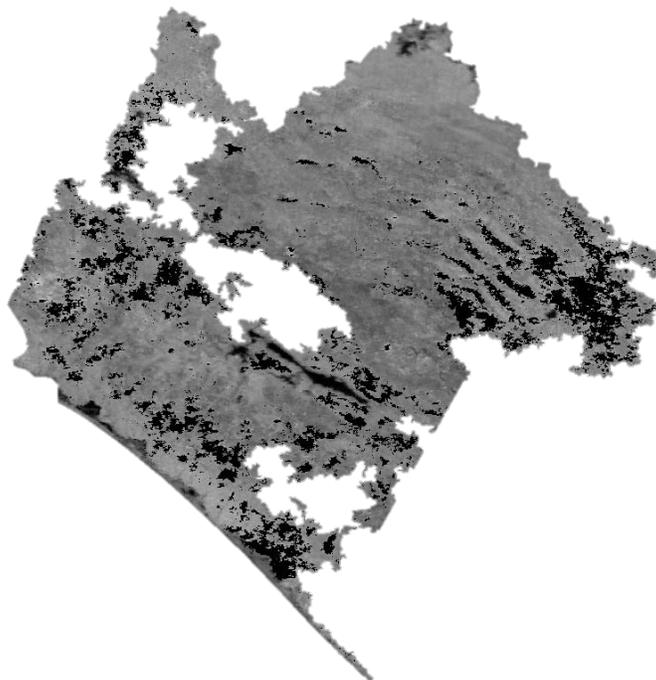
**Figura 19:** A la izquierda, mapa de albedo en números digitales en proyección UTM, se observan los valores nulos debido a las condiciones del tiempo. A la derecha mapa de albedo con números convertidos a valores de albedo en la misma proyección, se observa que no existen valores nulos, debido a las condiciones del tiempo que fueron en el tiempo de adquisición de los datos.



Fuente: Archivo.

El análisis de los mapas finales para ser tomados en cuenta como parámetro de entrada en el cálculo de la radiación solar modelada fue que existen lugares dentro del área de estudio en los que los datos son nulos, es decir no existe información en esa área debido a que la fecha en la que fueron obtenidos los datos, las nubes y sus efectos causaron generación de este tipo de datos en el producto.

**Figura 20: Mapa de albedo con huecos, original desde producto MODIS del día juliano 161.**



Fuente: Archivo.

Por razones obvias este tipo de datos no podrían ser utilizados para la generación de datos de radiación solar modelada por lo que se pensó en ocupar esos datos por medio de dos tipos de interpolación: interpolación espacial e interpolación temporal.

La *interpolación espacial* es la que uno de los módulos de GRASS GIS permite hacer determinando algunos parámetros, y lo hace a partir de los pixeles vecinos disponibles en el hueco.

La *interpolación temporal* es la que utiliza una serie de datos disponibles en el tiempo y que a través de estos se genera un nuevo píxel, esto se logró a partir de un modelo diseñado por el Dr. Ramón Solano, como módulo de Python llamado iinterp.

Para fines prácticos y de modelado del albedo, en primera instancia se generó la interpolación temporal, tomando en cuenta los doce mapas de albedo correspondientes a los días medios de cada mes, esto es cada 15 de cada mes, así que a partir de estos mapas se generó la serie de datos disponibles para este tipo de interpolación. La instrucción y sintaxis para llevar a cabo este proceso es el siguiente.

Primero que nada se necesitan los datos en formato ERS con la siguiente instrucción en una carpeta definida por el usuario y por el programa `iinterp`, en este caso es Albedo dentro de la carpeta pública de la Mac utilizada:

```
r.out.gdal input=aii009 output=/Users/jaceituno/Public/Albedo/a009.ers format=ERS  
nodata=1000
```

Después se realizó un proceso de interpolación para calcular los valores de los pixeles faltantes en función de la serie de tiempo anual de ese mismo pixel, utilizando cubic splines con condiciones naturales de frontera, (R. Solano, en proceso). Esto se llevó a cabo con el módulo `iinterp`, con la siguiente instrucción:

```
iinterp -d albedo.dic 9 ai009 9 a009 41 a041 73 a073 105 a105 129 a129 161 a161 193 a193 225  
a225 257 a257 281 a281 313 a313 345 a345
```

**iinterp**: Interpola una imagen en la posición indicada, a partir de las imágenes indicadas.

**-d**: Especifica un archivo diccionario (dicc..txt or default)

**albedo.dic**: Diccionario de imágenes, relaciona nombres cortos con nombres largos de archivo.

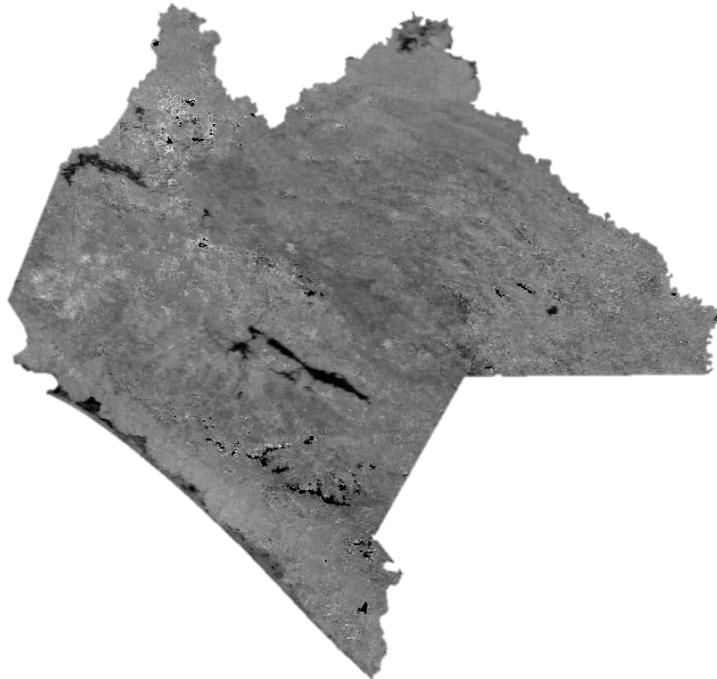
**33**: Día juliano correspondiente al raster de albedo que se va a generar.

**ai033**: Nombre del archivo de salida.

Notar que hay una serie de datos disponibles después del nombre de salida, estos datos son los que nosotros exportamos a la carpeta pública y estos servirán como datos serie en el tiempo de los cuales se determinará el nuevo raster interpolado.

La instrucción que está de ejemplo determina que a partir de la serie de datos disponibles se generó un nuevo raster de albedo que contiene información interpolada temporalmente para el día 9 de enero con lo cual el archivo nuevo se llamara `ai009`, definiendo que el albedo es interpolado para el día 9 juliano. Así se llevará a cabo hacer el interpolado por cada uno de los meses correspondientes al año, de lo cual se obtuvieron 12 rasters interpolados temporalmente.

**Figura 21: Mapa de albedo interpolado temporalmente con iinterp del día juliano 161.**



Fuente: Archivo.

Debido a la naturaleza interpolativa del proceso, los píxeles faltantes a los extremos de la serie de tiempo no fueron extrapolados, causando algunos huecos remanentes después de este proceso por ello en ciertos rasters la información en píxel no existía, entonces se llevó a cabo la interpolación espacial desde el módulo de GRASS GIS, dejando en total disponibilidad a los datos para la generación de mapas de radiación solar en condiciones de cielo despejado. La instrucción utilizada fue la siguiente:

```
r.fillnulls --overwrite input=ai009 output=aii009 method=rst edge=50 npmin=400
```

**r.fillnulls:** Llena las áreas de datos nulos en rasters utilizando un método de interpolación.

**input:** Nombre del raster a ser interpolado.

**output:** Nombre del raster de salida.

**method:** Método de interpolación a usar.

**edge:** Ancho del borde del hueco utilizado para la interpolación (en píxeles)

**npmin:** Número mínimo de puntos de aproximación en un segmento (> segmax)

**--overwrite:** Permite sobrescribir los datos.

Y por último se obtuvieron los rasters finales de albedo, disponibles para cada mes, dejando datos por completo en todo el territorio, y sin datos nulos dentro del mismo.

**Figura 22: Mapa de albedo interpolado espacialmente con GRASS GIS del día juliano 161. Mapa final de albedo para generación de datos de radiación solar en condiciones de cielo despejado.**



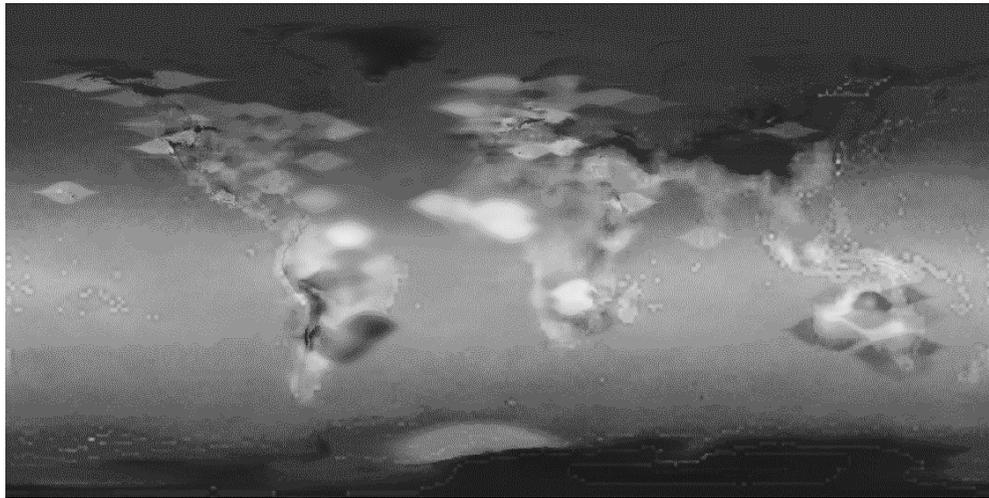
Fuente: Archivo.

### 7.3. Mapas de turbiedad de Linke.

Los mapas de coeficiente de turbiedad de Linke se obtuvieron desde el SoDa Service ([http://www.soda-is.com/eng/services/climat\\_free\\_eng.php#lin](http://www.soda-is.com/eng/services/climat_free_eng.php#lin)) cubriendo todo el mundo con una resolución de 5' (aproximadamente 9 km), mapas mensuales que además tuvieron que ser georreferenciados y procesados para obtener el área que se necesitaba según la zona de estudio.

Este proceso de georreferenciación se llevó a cabo por medio de un World File al cual se le atribuyó los parámetros geométricos y geográficos de la imagen.

**Figura 23: Mapa de coeficiente de Linke correspondiente al mes de enero, descargado directamente del sitio de SoDa Service.**



Fuente: SoDa service website.

Los parámetros de georreferenciación fueron datos geográficos y geométricos de la imagen, estos son:

Tamaño del pixel (X, Y):	0.0833333, -0.0833333
Rotación (X, Y):	0.0
Pixel superior izquierdo (X, Y):	-179.95833333333329000, 89.95833333333399700

Estos parámetros fueron introducidos en un archivo denominado Word File que es un adjunto a la imagen y sirve principalmente para dar referencia espacial a la misma con una extensión de tipo .tfw, debido a que la imagen que se descargó es de tipo TIFF.

**Figura 24: A la izquierda los parámetros del archivo .tfw (World File), a la derecha los archivos .tfw con su respectiva imagen .tif.**

0.08333333333333330	 April.aux	09/05/2014 02:21 ...	Archivo AUX	8 KB
0.00000000000000000	 April.tfw	09/05/2014 01:11 ...	Archivo TFW	1 KB
0.00000000000000000	 April.tif	23/03/2010 05:12 ...	Archivo TIF	2,196 KB
-0.08333333333333330	 August.aux	09/05/2014 02:22 ...	Archivo AUX	8 KB
-179.95833333333329000	 August.tfw	09/05/2014 01:11 ...	Archivo TFW	1 KB
89.95833333333399700	 August.tif	23/03/2010 05:13 ...	Archivo TIF	2,133 KB
	 December.aux	09/05/2014 02:23 ...	Archivo AUX	8 KB
	 December.tfw	09/05/2014 01:11 ...	Archivo TFW	1 KB

Fuente: Archivo.

Estos archivos fueron importados a una proyección geográfica sin datum por lo cual se le anulo la proyección y únicamente se desplegó con las coordenadas correspondientes al archivo de georreferenciación.

**r.in.gdal** input=/Volumes/ZAGHAREET/Month Linke Turbidity Maps/January.tif  
**output=enero -o**

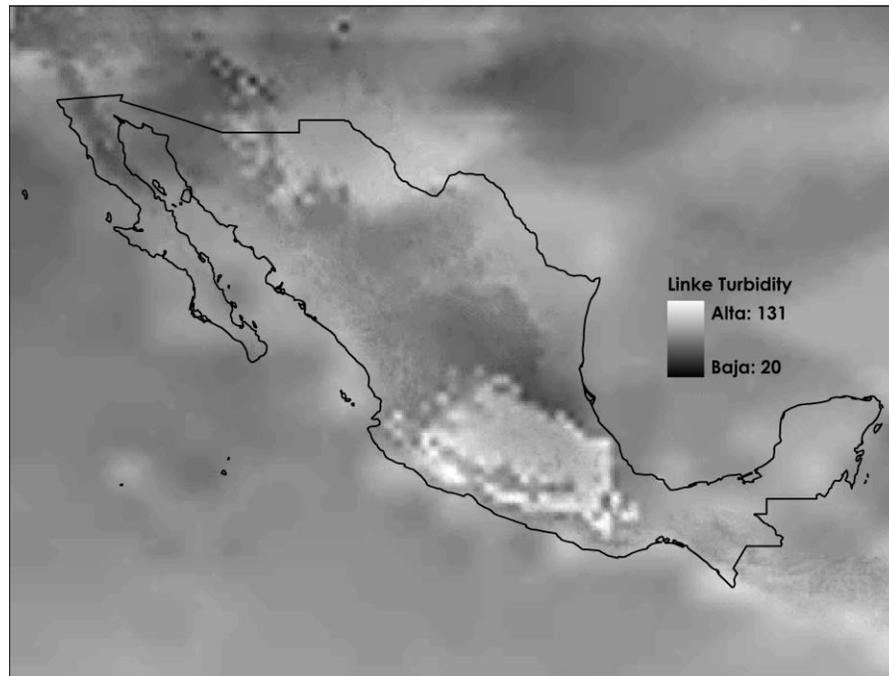
**r.in.gdal:** Importar raster a GRASS GIS 7.0

**input:** Raster que será importado.

**output:** Nombre de salida del raster importado.

**-o:** Anular proyección (utilizar la proyección de la localización).

**Figura 25: Mapa de turbiedad de Linke de todo el país, en datos originales y en una proyección geográfica.**



Fuente: Archivo.

Uno de los obstáculos que se presentó en el despliegue de información de Linke fue que no solo la georreferenciación de imágenes era la solución sino que los valores del pixel no correspondían a los valores establecidos como estándar, es decir estaban presentados en valores de números digitales (0-255) por lo cual se tuvo que hacer una correlación entre los valores de la imagen con los valores arrojados puntualmente en la página de SoDa Service por cada mes en diferentes puntos de la República. Esta correlación se llevó a cabo con el fin de encontrar la línea de tendencia entre datos existentes y obtener la ecuación que ajustara mejor los resultados. Para ello se escogieron 16 estaciones meteorológicas con coordenadas establecidas distribuidas en la Republica, por lo que se tomaron algunos puntos en Baja California, debido a que ha presentado los datos más limpios en cuestión de radiación solar, Chiapas por ser el extremo sur del país y ser área de estudio, Guanajuato por ser parte del centro y Coahuila por estar al norte del país. Con cada uno de los puntos escogidos se tomó la medida desde el SoDa Service ([http://www.soda-is.com/eng/services/service\\_invoke/gui.php?xml\\_descript=soda\\_tl.xml&Submit2=Month](http://www.soda-is.com/eng/services/service_invoke/gui.php?xml_descript=soda_tl.xml&Submit2=Month)) por mes en cada punto. De la misma manera se escogieron los valores de los mismos puntos pero de las imágenes procesadas. Se compararon los datos y se hicieron graficas que efectivamente

comprobaron que entre los datos existía una correlación lineal y que en la búsqueda de una ecuación que calibrara los datos se encontró una  $R^2$  muy cercano a la unidad y una ecuación para cada uno de los meses bastante parecida. Esto se ilustra en las tablas siguientes.

**Tabla 1: Datos del sitio SoDa Service por cada estación meteorológica por mes.**

DATOS DE LINKE SEGÚN EL SITIO DE SODA-IS PUNTUALES															
Estacion	Lat	Lon	Alt	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P. Abelardo L.	32.44722222	116.90833333	156	2.7	3	3.5	3.7	3.9	3.6	3.6	3.9	3.6	3.3	2.9	2.7
P. Lopez Zamora	31.89138889	116.60333333	32	2.7	2.9	3.5	3.7	3.9	3.6	3.8	3.9	3.7	3.4	2.9	2.8
Catavina	29.72722222	114.7191667	514	2.4	2.5	2.6	2.6	2.9	3	3.1	3.2	2.9	2.7	2.5	2.8
B. Angeles	28.89638889	113.5602778	10	2.9	3	3.1	3.4	3.8	3.7	4.1	4.4	3.8	3.4	3.1	3
S. Felipe	31.02805556	114.8344444	20	2.4	2.5	2.5	2.4	2.8	2.8	3.2	3.4	3	2.5	2.4	2.8
Rumorosa	31.27222222	116.2055556	1262	2.2	2.4	2.4	2.5	2.9	2.8	2.8	2.8	2.6	2.3	2.3	2.5
S. Quintin	30.53166667	115.8375	32	2.7	2.9	3.4	3.3	3.7	3.6	3.7	3.9	3.5	3.3	2.8	2.8
Las Flores II	16.6925	93.56333333	509	3.4	3.6	4.4	4.4	4.6	4.8	4.9	5	4.9	4.3	4	3.6
S. Cristobal	16.73333333	92.63333333	2115	3	3.4	3.9	4.2	4.4	4.3	4.4	4.4	4.4	3.9	3.5	3.5
La Encrucijada	15.57416667	93.19222222	13	3.4	3.6	4.1	4.4	4.3	4.8	4.8	4.8	4.8	4.4	3.9	3.9
S. Felipe Gto	21.32555556	101.1138889	2102	3.6	3.8	3.7	4	4.1	3.7	2.9	3.2	3	3.1	3.3	2.7
Salvatierra	20.21638889	100.8855556	1745	3.4	3.8	3.7	4.1	4.2	3.9	3.2	3.4	3.3	3.1	3.2	2.7
Las Adjuntas	20.675	101.8441667	1720	3.5	3.9	3.7	4.1	4.2	4.1	3.4	3.6	3.5	3.3	3.4	2.9
R. P. La Amistad	29.42444444	101.6205556	285	3.4	3.6	3.7	4.2	4.6	4.7	5.1	5.1	4.6	4.3	3.8	3.4
Saltillo	25.37638889	101.0166667	1789	2.9	3.3	3.3	3.8	4	4	4.2	4	3.8	3.6	3.1	2.9
Torreón	25.53333333	103.45	1123	2.9	3.3	3.3	3.9	4.1	4.2	4.4	4.3	3.8	3.8	3.2	2.9

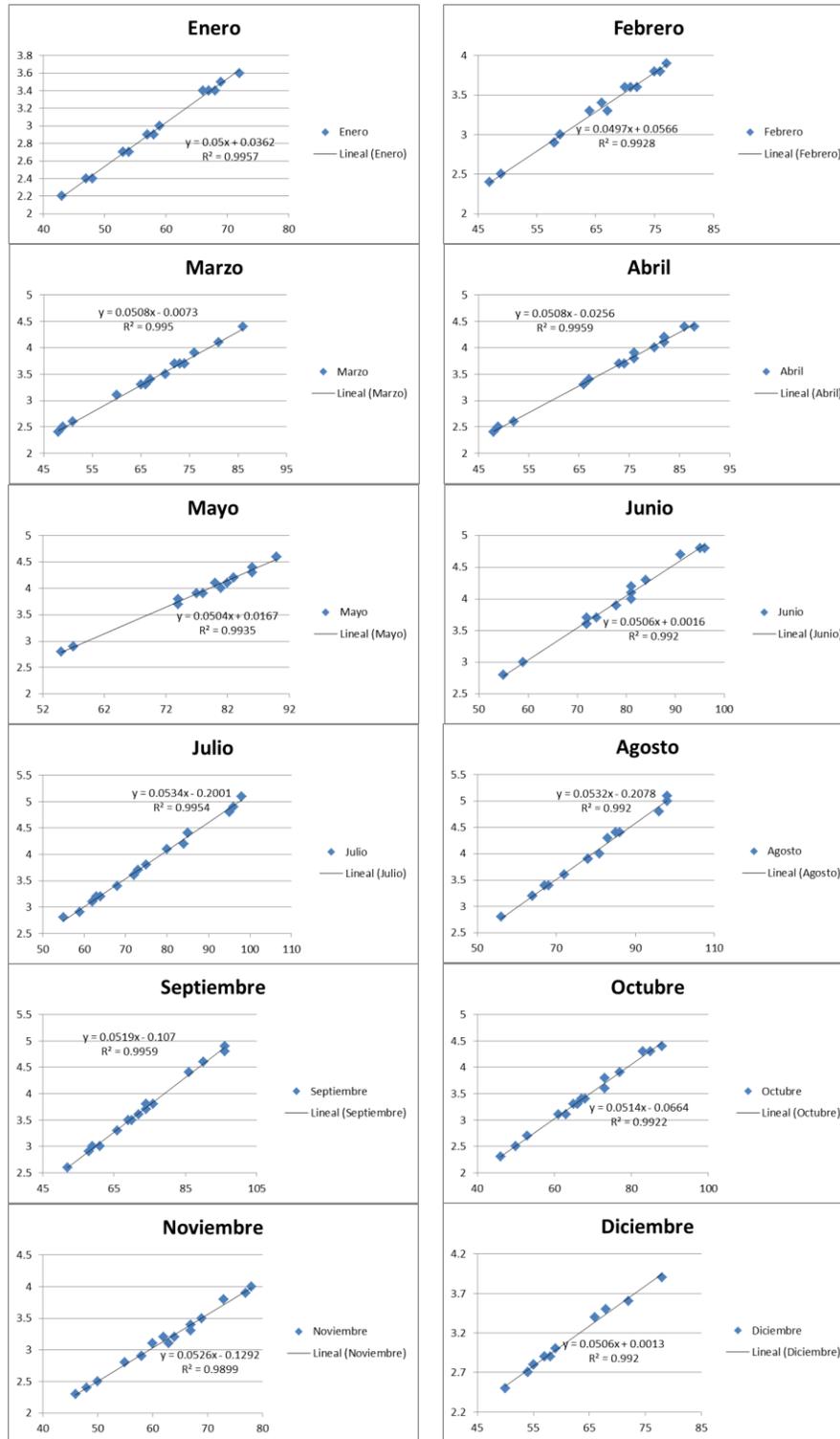
Fuente: Archivo.

**Tabla 2: Datos de las imágenes procesadas por cada estación meteorológica por mes.**

DATOS DE LINKE SEGÚN MAPAS MENSUALES															
Estacion	Lat	Lon	Alt	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P. Abelardo L.	32.44722222	116.90833333	156	54	59	70	73	77	72	72	78	72	65	58	54
P. Lopez Zamora	31.89138889	116.60333333	32	53	58	70	74	78	72	75	78	74	68	58	55
Catavina	29.72722222	114.7191667	514	47	49	51	52	57	59	62	64	58	53	50	55
B. Angeles	28.89638889	113.5602778	10	57	59	60	67	74	72	80	85	74	67	60	59
S. Felipe	31.02805556	114.8344444	20	48	49	49	48	55	55	64	67	59	50	48	55
Rumorosa	31.27222222	116.2055556	1262	43	47	48	49	57	55	55	56	52	46	46	50
S. Quintin	30.53166667	115.8375	32	53	58	67	66	74	72	73	78	70	66	55	55
Las Flores II	16.6925	93.56333333	509	67	71	86	86	90	95	96	98	96	85	78	72
S. Cristobal	16.73333333	92.63333333	2115	59	66	76	82	86	84	85	86	86	77	69	68
La Encrucijada	15.57416667	93.19222222	13	67	72	81	88	86	96	95	96	96	88	77	78
S. Felipe Gto	21.32555556	101.1138889	2102	72	76	74	80	82	74	59	64	61	63	67	54
Salvatierra	20.21638889	100.8855556	1745	68	75	74	82	83	78	63	68	66	61	64	54
Las Adjuntas	20.675	101.8441667	1720	69	77	73	82	83	81	68	72	69	66	67	57
R. P. La Amistad	29.42444444	101.6205556	285	66	70	72	82	90	91	98	98	90	83	73	66
Saltillo	25.37638889	101.0166667	1789	58	67	66	76	81	81	84	81	76	73	63	58
Torreón	25.53333333	103.45	1123	57	64	65	76	80	81	85	83	74	73	62	57

Fuente: Archivo.

**Gráfica 1: Correlación lineal entre los datos reales de Linke y datos de las imágenes procesadas.**



Fuente: Archivo.

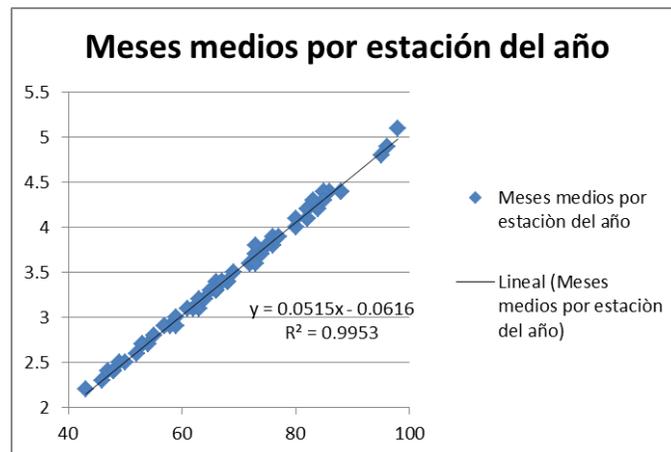
Para poder estandarizar una sola ecuación de calibración para todos los meses se escogió el mes más distintivo o mes medio de cada estación y estos fueron: Enero, Abril, Julio y Octubre. Al final se encontró una correlación entre datos de estos meses y el resultado fue el siguiente:

**Tabla 3: Datos utilizados para hallar la correlación entre meses medios por estación del año.**

Estacion	Lat	Lon	Alt	Datos puntuales del SoDa-is				Datos de las imágenes procesadas			
				Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
				Ene	Abr	Jul	Oct	Ene	Abr	Jul	Oct
P. Abelardo L.	32.44722222	116.90833333	156	2.7	3.7	3.6	3.3	54	73	72	65
P. Lopez Zamora	31.89138889	116.60333333	32	2.7	3.7	3.8	3.4	53	74	75	68
Catavina	29.72722222	114.7191667	514	2.4	2.6	3.1	2.7	47	52	62	53
B. Angeles	28.89638889	113.5602778	10	2.9	3.4	4.1	3.4	57	67	80	67
S. Felipe	31.02805556	114.8344444	20	2.4	2.4	3.2	2.5	48	48	64	50
Rumorosa	31.27222222	116.2055556	1262	2.2	2.5	2.8	2.3	43	49	55	46
S. Quintin	30.53166667	115.8375	32	2.7	3.3	3.7	3.3	53	66	73	66
Las Flores II	16.6925	93.56333333	509	3.4	4.4	4.9	4.3	67	86	96	85
S. Cristobal	16.73333333	92.63333333	2115	3	4.2	4.4	3.9	59	82	85	77
La Encrucijada	15.57416667	93.19222222	13	3.4	4.4	4.8	4.4	67	88	95	88
S. Felipe Gto	21.32555556	101.1138889	2102	3.6	4	2.9	3.1	72	80	59	63
Salvatierra	20.21638889	100.8855556	1745	3.4	4.1	3.2	3.1	68	82	63	61
Las Adjuntas	20.675	101.8441667	1720	3.5	4.1	3.4	3.3	69	82	68	66
R. P. La Amistad	29.42444444	101.6205556	285	3.4	4.2	5.1	4.3	66	82	98	83
Saltillo	25.37638889	101.0166667	1789	2.9	3.8	4.2	3.6	58	76	84	73
Torreon	25.53333333	103.45	1123	2.9	3.9	4.4	3.8	57	76	85	73

Fuente: Archivo.

**Gráfica 2: Correlación entre datos de meses medios de estaciones del año, línea de tendencia, ecuación definitiva para calibrar los datos y R<sup>2</sup>.**



Fuente: Archivo.

Una vez encontrada la ecuación de calibración de datos se llevó a cabo en las imágenes procesadas. El resultado arrojado fueron números que coincidían con el formato requerido en números de Linke, números flotantes que dentro de cada pixel especifica un índice diferente para cada punto del territorio. Esto se llevó a cabo a través del siguiente módulo:

**r.mapcalc expression=**TL\_ene = ( 0.0515 \* January) -0.0616

**r.mapcalc:** Calculadora raster.

**expression:** Expresión a ser evaluada.

El siguiente paso fue hacer una reproyección en cada uno de los mapas, desde la geográfica hasta la proyección UTM, la proyección establecida como parámetro geográfico en el cálculo de la radiación solar modelada. Esto se hizo de un espacio de trabajo hacia otro transformando las coordenadas de una proyección a otra, y fijando la región, se aseguró que el espacio fue el correcto para el estado de Chiapas, con esto obtuvimos entonces los doce mapas del promedio de coeficiente de Linke a los largo de un año, correspondientes al área de trabajo destinadas al estado de Chiapas. Se logró desde el módulo ya utilizado en GRASS GIS 7.0.

**Figura 26: Mapa de Coeficiente de turbiedad de Linke, georreferenciado y proyectado a UTM.**



Fuente: Archivo.

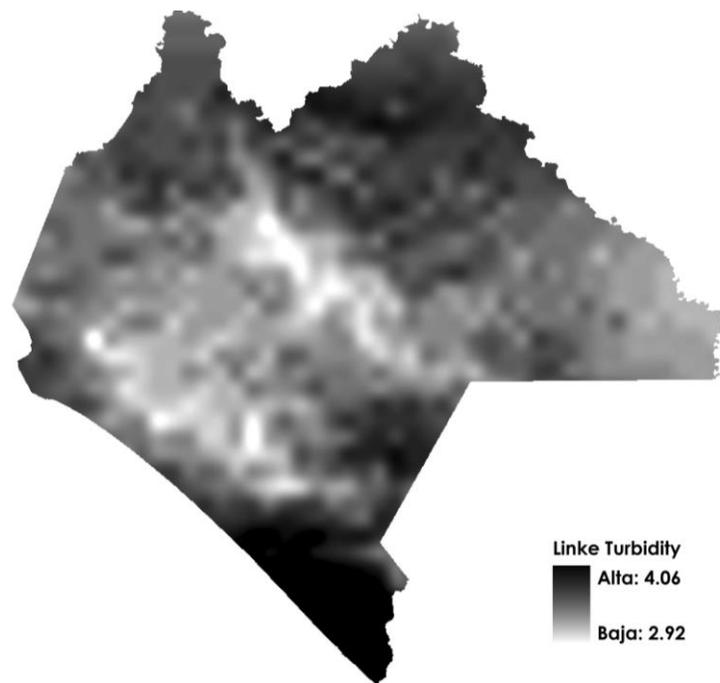
Pero en el análisis de los mapas de Linke se definió que los píxeles eran demasiado gruesos para el estudio, así que se decidió aplicar un remuestreo de 500 m, valor de pixel estándar para estos mapas a través del método bicúbico. Todo fue mediante la siguiente instrucción:

```
r. input="TL_ene" location="TL_MX" output="Lin_01" method="bicubic" resolution=500
```

Pero otro de los detalles que los mapas de Linke presentaban eran huecos de valores nulos, con lo cual sólo aplicamos la fórmula de interpolación espacial, debido a que los huecos eran muy pequeños. Siguiendo la instrucción como la de albedo:

```
r.fillnulls input=Lin_01 output=L_01 method=rst edge=50 npmin=400
```

**Figura 27: Mapa de Coeficiente de turbiedad de Linke, georreferenciado y proyectado a UTM. Mapa utilizado como parámetro de entrada en el cálculo de la radiación solar en condiciones de cielo despejado.**



Fuente: Archivo.

Así estos mapas ya fueron utilizados como parámetro de entrada para el cálculo del flujo solar entrante modelado en condiciones de cielo despejado.

## 7.4. Mapas de radiación solar en condiciones de cielo despejado.

El resultado de la conjugación de datos de MDE, albedo y Linke en el módulo r.sun de la paquetería de GRASS GIS son los mapas de radiación solar global de un día en el cual se observa que hay una variabilidad a través del tiempo pero se observó que esta variabilidad no era muy coherente con los datos esperados pues en la búsqueda de encontrar el mejor aprovechamiento del recurso se probó trabajar con inclinaciones que podrían ser óptimas para encontrarlo, entonces a estos mapas se les introdujo datos tanto de albedo como de Linke variables, así como los datos geométricos de ángulo de horizonte a cada 30 minutos con un ángulo de  $7.5^\circ$ , una orientación hacia el “sur” con  $270^\circ$  y una inclinación de  $0^\circ$ , es decir la radiación solar global en una superficie plana horizontal.

Se prosiguió a hacer una prueba con los mismos parámetros solo que cambiando la inclinación, ahora con  $16^\circ$ , que es igual a la latitud del lugar, con lo cual se esperaba que el resultado fuera mayor en las zonas, pero no fue así, el resultado fue que aplicando la inclinación igual a la latitud se obtuvieron valores menores a lo que se obtiene en una superficie plana horizontal, por lo cual la duda de poder encontrar cual era el problema con lo obtenido fue la razón por la que se hizo el análisis de los datos.

Se hicieron varias pruebas las cuales señalaban el comportamiento de la radiación solar a través del tiempo y su variabilidad a lo largo de las estaciones del año, todos los datos coincidían pero al momento de poner la inclinación estos arrojaban datos menores, por lo cual se siguieron haciendo pruebas no solo con la inclinación (slope) sino con el azimut (aspect), de lo cual se llegó a la siguientes conclusiones:

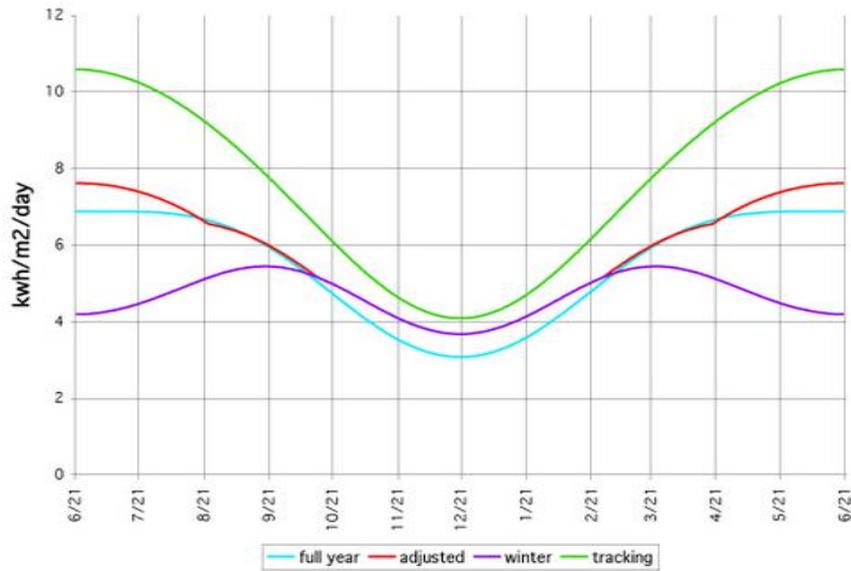
- El modelo no está tomando el aspect= $270^\circ$  como una placa plana inclinada orientada al sur, como la literatura lo dice, sino que está orientada hacia el poniente.
- De todas las pruebas que se hicieron se llegó a la conclusión que el aspect= $180^\circ$  es la indicada para poner una placa plana horizontal orientada al sur, no como la literatura lo está describiendo en el proceso.

- En resumen se habla de que el aspect en el módulo r.sun se refiere a la orientación de la captación de la placa, en este caso la mayor parte de las veces se orienta al sur, y con las pruebas que se hicieron este debe fijarse a 180°.

Además de eso se hicieron otras pruebas sobre ¿Cuál es la inclinación óptima para la mejor captación de energía solar? Por lo cual se recurrió a la lectura en donde se menciona que la denominada “2-tracking” es la mejor, pues consiste en seguir al sol todo el día durante todo el año, moviendo los paneles solares tanto en inclinación (vertical) como en azimut (horizontal). Pero también se menciona que los cambios de inclinación hacen óptima la mayor captación del recurso solar, haciendo hincapié que no es necesario el movimiento horizontal solo el vertical y se mencionan dos tipos: el de 2 veces por año y el de 4 veces por año, de lo cual se establecen las fechas óptimas para este cambio y además algunas fórmulas para obtener esta inclinación. Por último se menciona que se aprovecha mejor el recurso solar en una superficie inclinada que horizontal, de lo cual también se obtienen los ángulos de inclinación fija para todo el año. En comparativa de cada uno de los métodos a utilizar se hacen referencia a gráficas que dejan ver el aprovechamiento del recurso solar, de lo cual se obtiene que el denominado “2-trackng” es el mejor para el aprovechamiento del sol.

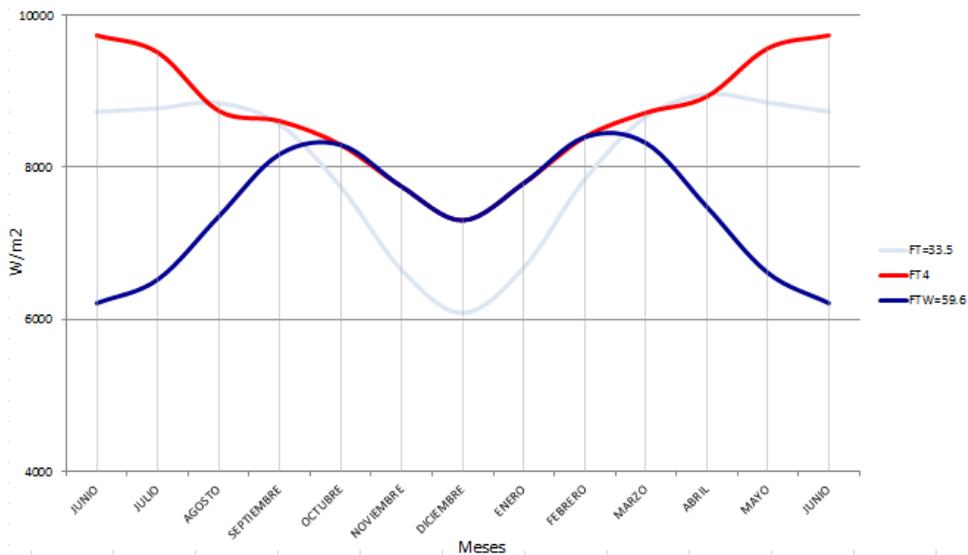
A manera de actividad y probando el modelo que se está utilizando en este proyecto, se hicieron las pruebas necesarias para llegar al resultado de la literatura, recreando las gráficas de captación de energía solar.

**Gráfica 3: Gráfica de la eficiencia de un panel fotovoltaico a una inclinación fija, a cuatro inclinaciones al año, a dos movimientos (vertical y horizontal) y una inclinación fija para invierno en todo el año.**



Fuente: Solar panel tilt.

**Gráfica 4: Gráfica obtenida con el modelado de la radiación en las siguientes inclinaciones del panel: FT es una inclinación fija para todo el año, FT4, cuatro inclinaciones al año y FTW, inclinación de invierno para todo el año.**



Fuente: Archivo.

Por lo tanto se iniciaron los mapas de radiación solar en condiciones de cielo despejado que serán los utilizados para la generación de mapas de radiación solar en condiciones de cielo real. Para ello se utilizó el modulo `r.sun` de GRASS GIS 7.0, tomando en cuenta todas las observaciones que se hicieron a lo largo del análisis de los datos en prueba, se llevó a cabo la generación de los mapas a una temporalidad de 30 minutos, obtenida de los datos de satélite disponibles, los cuales nos dieron la pauta para decidir por esta temporalidad. Así que se se hizo por medio de la siguiente instrucción:

```
r.sun elev_in=mde_bil aspect=180 slope=0 linke_in=Lin_01 albedo=aii009  
glob_rad=MP015.1145 day=015 time=11.75
```

**r.sun:** Modelo de irradiancia solar e irradiación. Calcula la radiación solar directa (haz), difusa y reflejada en mapas raster a través de un día determinado, latitud, superficie y condiciones atmosféricas. Parámetros solares (por ejemplo, la salida del sol, puesta del sol, de declinación, irradiancia extraterrestre, longitud de la luz del día) se guardan en el archivo histórico del mapa. Alternativamente, una hora local se puede especificar para calcular el ángulo de incidencia solar y/o mapas raster de irradiancia. El efecto de sombreado de la topografía se incorpora opcionalmente.

**elev\_in:** Modelo digital de elevación.

**aspect:** Orientación del panel.

**slope:** Inclinación del panel.

**linke\_in:** Mapas de Linke.

**albedo:** Mapas de albedo.

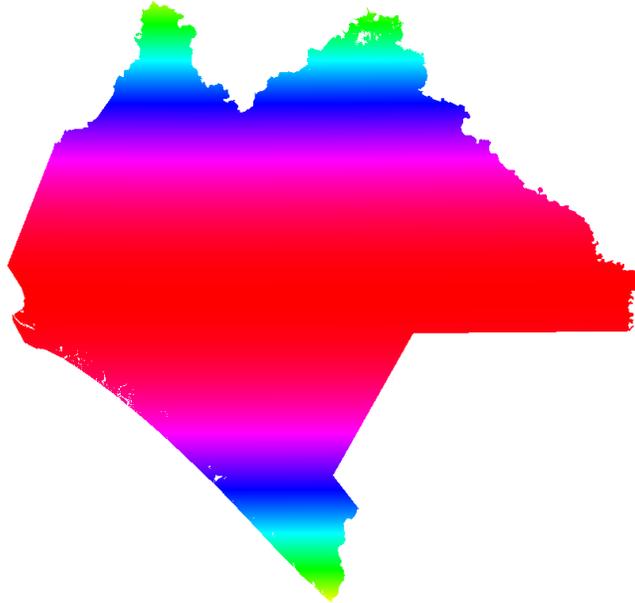
**glob\_rad:** Raster de salida de mapas de radiación solar.

**day:** Día juliano del día deseado.

**time:** Hora local deseada.

La rutina calculó correctamente la radiación solar considerando la variación en latitud, lo cual se aprecia en la figura 27. Sin embargo, considera erróneamente la misma hora solar todos los pixeles este-oeste, lo cual es incorrecto.

**Figura 28: Radiación solar en condiciones de cielo despejado con hora solar. Prueba realizada para el día 125 juliano a mediodía, paso del sol por el cenit de la región.**



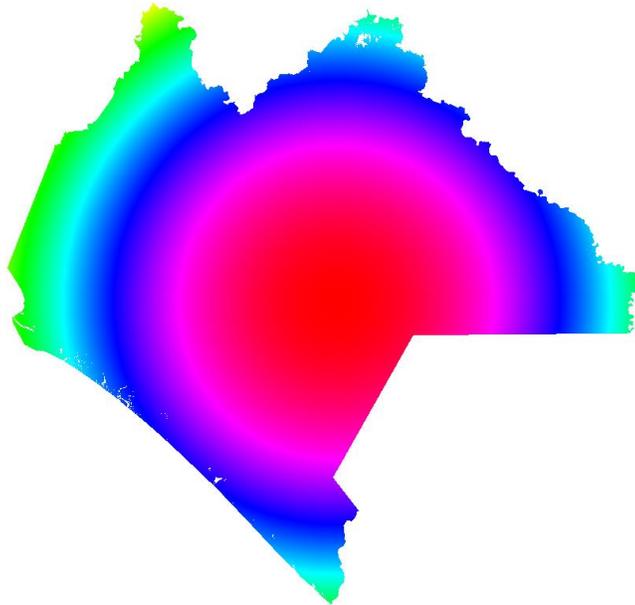
Fuente: Archivo.

Dado que lo que los cálculos fueron a una hora determinada para toda la zona de estudio, debe considerarse la hora instantánea, lo cual implica un ángulo diferente de incidencia de los rayos solares en dirección este-oeste, en adición a la norte-sur, es decir, así como varía la irradiancia solar en dirección N-S, debe varían en dirección E-W.

Entonces al final del análisis se encontró que el parámetro “time” es el que estaba provocando este error pues se supuso que hay un pequeño error concerniente en el manejo de horas decimales en el sistema, pues este parámetro no toma en cuenta la longitud del lugar, la solución estaba en que si había un error en el parámetro time, tenía que haber alguna reacción con el parámetro “civil\_time”, el cual el sistema automáticamente utiliza la ecuación del tiempo para hacer el arreglo de la hora en función, mediante un mapa de longitudes, a lo cual conlleva que los mapas generados tomarían en cuenta la variabilidad de la radiación en dirección este-oeste.

Entonces se agregaron dos parámetros más, estos fueron: *civil\_time* y *long\_in*, que corresponden a la zona horaria de la región y el mapa de longitudes de la región, respectivamente.

**Figura 29: Radiación solar tomando en cuenta el tiempo civil y el mapa de longitudes. Prueba realizada para el día 125 juliano a mediodía, paso del sol por el cenit de la región.**

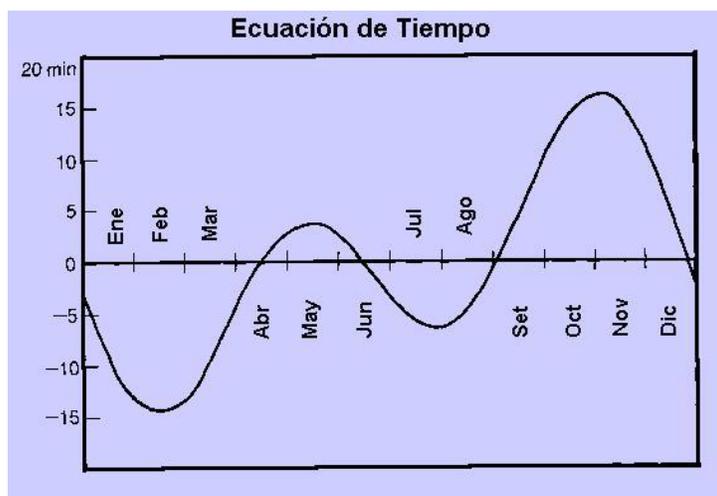


Fuente: Archivo.

El resultado con los parámetros agregados fue el esperado, un mapa de radiación solar propagándose en el territorio de manera circular hacia todas las direcciones. Con lo cual, en esta prueba dejó en claro el funcionamiento de la rutina para tiempo solar y tiempo civil, de lo cual se recomienda utilizar la opción de tiempo civil, por obvias razones.

Pero dentro de la evaluación de esta opción se tuvo que un  $\pm 1\%$  de error en la generación de los datos, pues al evaluar los resultados con la ecuación del tiempo, se tuvo que hay unas pequeñas diferencias en los lapsos en que la ecuación tiene valles en su gráfica, concerniente al año. Esto es un problema sistemático de lo cual se asumió que no es significativo lo aportado a los datos pero que si se sugiere al lector la generación de un nueva rutina con este pequeño error ya resuelto.

Figura 30: Ecuación del tiempo durante el año.



Fuente: Archivo relojes de sol.

Por razones de tiempo se llevó a cabo la siguiente instrucción de la cual se generaron los mapas de radiación solar en condiciones de cielo despejado.

```
r.sun elev_in=mde_bil aspect=180 slope=0 linke_in=Lin_01 albedo=aii009  
glob_rad=M015.1145 day=015 time=11.45 civil_time=-6 long_in=long_cs
```

Para el uso de estas imágenes se tuvo procedió a exportar las rasters generados a formato ERS, con el propósito de ser entendidos por le nuevo modelo. Esto se hizo con la siguiente instrucción:

```
r.out.gdal input=M015.1145  
output=/Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/sun/SR_ClrSky/CS/015/M015.1145.ers  
format=ERS nodata=10000
```

La salida de la nueva imagen es en format ERS, en un directorio raíz que será utilizado ara la generación de nuevos mapas, este es:

```
/Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/sun/SR_ClrSky/CS/015/
```

La numeración que se tiene al final del directorio corresponde al día juliano del mes en función.

## 7.5. Imágenes de satélite.

Las imágenes satelitales fueron obtenidas desde el sitio web europeo Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS) of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ([http://www.class.ncdc.noaa.gov/saa/products/search?datatype\\_family=GVAR\\_IMG](http://www.class.ncdc.noaa.gov/saa/products/search?datatype_family=GVAR_IMG)) que es un alojamiento de imágenes GOES es un radiómetro de imágenes de cinco canales (uno visible, cuatro infrarojos) diseñado para detectar energía radiante y solar reflejada desde áreas muestreadas de la Tierra. GVAR es el formato de transmisión de datos utilizado para la transmisión de datos ambientales medidos por los instrumentos independientes de imágenes y sonda de GOES, empezando con GOES-8 lanzada en 1994. Los formatos de datos de distribución disponibles son crudos, AREA, NetCDF, GIF, y JPEG.

Las imágenes descargadas cuentan con las siguientes características:

Sensor:	GOES-13 East
Resolución espacial:	1 km/4 km
Resolución temporal:	30 min aprox.
Número de bandas:	5 bandas
Datos de referencia:	WGS84
Formato:	NetCDF

Debido a que el formato presentado fue en NetCDF (Network Common Data Form), y el nuevo modelo solo soporta imágenes en formato ERS, se hizo el procedimiento de convertir cada una de las imágenes a este formato requerido, mediante las siguientes instrucciones desde Python:

Primero nos situamos en las carpetas que contienen las imágenes crudas NetCDF:

```
cd /Users/jaceituno/Documents/Datos_Satelite_CS/011513
```

Una vez situados en la carpeta se prosigue a la siguiente instrucción que es el `gdalinfo`, que nos arrojará información espacial del NetCDF, del cual escogeremos el último EPSG, que nos dice cual es la referencia espacial actual del archivo:

/opt/local/bin/gdalinfo NETCDF:goes13.2011.349.114520.BAND\_01.nc:data

Figura 31: Resultado de ejecutar la función gdalinfo, para obtener información de referencia espacial del archivo, obteniendo el EPSG.

```
geopy02:011513 jaceituno$ /opt/local/bin/gdalinfo NETCDF:goes13.2013.015.163147.
BAND_01.nc:data
Warning 1: dimension #2 (xc) is not a Longitude/X dimension.
Warning 1: dimension #1 (yc) is not a Latitude/Y dimension.
Driver: netCDF/Network Common Data Format
Files: none associated
Size is 1128, 520
Coordinate System is ''
Metadata:
  data#coordinates=lon lat
  data#long_name=Raw Satellite Counts
  data#type=GVAR
  NC_GLOBAL#Conventions=CF-1.4
  NC_GLOBAL#Satellite Sensor=G-13 IMG
  NC_GLOBAL#Source=McIDAS Area File
  NETCDF_DIM_EXTRA={time}
  NETCDF_DIM_time_DEF={1,4}
  NETCDF_DIM_time_VALUES=1358267520
  time#long_name=seconds since 1970-1-1 0:0:0
  time#units=seconds since 1970-1-1 0:0:0
Geolocation:
  LINE_OFFSET=0
  LINE_STEP=1
  PIXEL_OFFSET=0
  PIXEL_STEP=1
  SRS=GEOGCS["WGS 84",DATUM["WGS_1984",SPHEROID["WGS 84",6378137,298.257223563,A
  UTHORITY["EPSG","7030"]],TOWGS84[0,0,0,0,0,0],AUTHORITY["EPSG","6326"]],PRIMEM
  ["Greenwich",0,AUTHORITY["EPSG","8901"]],UNIT["degree",0.0174532925199433,AUTHOR
  ITY["EPSG","9108"]],AUTHORITY["EPSG","4326"]]
  X_BAND=1
  X_DATASET=NETCDF:"goes13.2013.015.163147.BAND_01.nc":lon
  Y_BAND=1
  Y_DATASET=NETCDF:"goes13.2013.015.163147.BAND_01.nc":lat
Corner Coordinates:
Upper Left ( 0.0, 0.0)
Lower Left ( 0.0, 520.0)
Upper Right ( 1128.0, 0.0)
Lower Right ( 1128.0, 520.0)
Center ( 564.0, 260.0)
Band 1 Block=1128x1 Type=Float32, ColorInterp=Undefined
NoData Value=9.96920996838686905e+36
Metadata:
  coordinates=lon lat
  long_name=Raw Satellite Counts
  NETCDF_DIM_time=1358267520
  NETCDF_VARNAME=data
  type=GVAR
geopy02:011513 jaceituno$
```

Fuente: Archivo.

Una vez obtenido el EPSG, en este caso 4326, que se refiere al WGS84 que es un sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar cualquier punto de la Tierra por medio de tres unidades dadas; se llevará a cabo la instrucción de gdalwarp que nos permitirá hacer la conversión de la imagen en formato ERS con la misma proyección.

Pero como todos los datos están referidos al sistema WGS84 Zona 15N, entonces necesitamos el EPSG coproporcionado a ese sistema de coordenadas, de lo cual se encontró que es el 32615, así de esta manera se tiene la instrucción siguiente:

```
/opt/local/bin/gdalwarp -t_srs EPSG:32615 -of ERS  
NETCDF:goes13.2013.015.114518.BAND_01.nc:data  
/Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/GOES/CS/015/goes.015.1145.B1.ers
```

La instrucción nos dice claramente que a partir de la función `gdalwarp` se va a convertir a una nueva proyección, en este caso la WGS84 UTM 15N, de la imagen NetCDF que está en función, y que habrá una imagen ERS de salida en un directorio específico.

De esta manera se convirtieron cada una de las imágenes que se descargaron, todas estas fueron guardadas en un directorio raíz denominado como:

```
/Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/GOES/CS/015/
```

Este directorio es sumamente importante para la generación de todos los datos necesarios para la implementación del nuevo modelo. Una vez obtenidos los datos de satélite se llevará a cabo el uso del nuevo modelo para la generación de mapas de radiación solar en condiciones de cielo real.

## 7.6. Mapas de radiación solar en condiciones de cielo real.

Estos mapas que se obtuvieron fueron a partir del nuevo modelo para determinar la radiación solar en condiciones de cielo real, tomando en cuenta parámetros estocásticos, en este caso las nubes en conjunto con la radiación solar en condiciones de cielo despejado, una vez así se encontrará entonces los nuevos índices de radiación para la región en estudio.

Estos se llevaron a cabo mediante la siguiente instrucción:

**IrradB1\_com /Users/jaceituno/Public/data/SR\_Mod/sun/SR\_RSky/CS/015/SRR1145.xpar**

Mediante esta instrucción tenemos entonces un archivo denominado xpar, el cual contiene la siguiente estructura:

**Figura 32: Estructura de datos requeridos por el IrradB1\_com.**

```
# Modelado de radiacio solar
# R. Solano y J. Aceituno

# Variable (imagen) a modelar:
VAR_DEP SR_CS_2013015_1145

# Calcular Sun params. Opciones: az, zenith y altura (SAZ SZ SH)
SUN_POS 1
SUN_PAR SH
DATE 2013 01 15
TIME_UTC 11 45
PROJ4 "+proj=utm +zone=15 +datum=WGS84"

# Params varios
PIXSIZE 500
NULL_VAL -9999

# Variables independientes (de entrada):
NVAR 7

# NVar  NomVar  Imagen  Remuestreo
# -----
VAR 1  SR_Clr  /Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/sun/SR_ClrSky/CS/015/M015.1145  NN
VAR 2  B1      /Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/GOES/CS/015/goes.015.1145.B1  NN
VAR 3  B2      /Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/GOES/CS/015/goes.015.1145.B2  NN
VAR 4  B3      /Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/GOES/CS/015/goes.015.1145.B3  NN
VAR 5  B4      /Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/GOES/CS/015/goes.015.1145.B4  NN
VAR 6  B6      /Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/GOES/CS/015/goes.015.1145.B6  NN
VAR 7  H       /Users/jaceituno/Public/data/SR_Mod/MDE/mde_cs  NN
```

Fuente: Archivo.

La primera parte que es # Variable a modelar se refiere a la nueva imagen que se generará, en este caso requiere de un nombre el cual ha sido escrito con siglas que digan que es Radiacion Solar

(SR) del estado de Chiapas (CS), en un año y día juliano (2013, 015) en una hora determinada con sus minutos (1145).

La segunda parte # Sun Params. Se refiere a todos los datos de geometría del sol que serán calculados internamente, pero que requiere una hora específica y una fecha, en este caso estamos trabajando con la fecha **DATE 2013 01 15** y una hora **TIME\_UTC 11 45**, con lo cual se está garantizando que la variabilidad de la geometría del sol estará en función de la fecha y la hora.

La tercera parte # Params varios se trata de las características de la imagen de salida, en este caso se especifica el tamaño del pixel deseado y el valor nulo por default, se trabajará con un valor de 500 por pixel y - 9999 para el valor nulo.

Y la cuarta y última parte pero de mayor importancia, serán las 7 variables que se necesitan para calcular la irradiancia solar instantánea en condiciones de cielo real, las cuales son las siguientes:

1. Valor de la radiación solar en condiciones de cielo despejado en un directorio específico.
2. Valor radiométrico de la banda 1 espectral de la imagen satelital, en un directorio específico.
3. Valor radiométrico de la banda 2 espectral de la imagen satelital, en un directorio específico.
4. Valor radiométrico de la banda 3 espectral de la imagen satelital, en un directorio específico.
5. Valor radiométrico de la banda 4 espectral de la imagen satelital, en un directorio específico.
6. Valor radiométrico de la banda 6 espectral de la imagen satelital, en un directorio específico.
7. Valor concerniente a las alturas o elevaciones. En este caso se utilizó un MDE.

Con los siete parámetros correctamente especificados, se tendrá una imagen de salida que tendrá las mismas características espaciales de las de entrada, y un formato ERS, por lo tanto se obtuvieron 12 imágenes que representan a los doce meses del año.

## 7.7. Mapa de la radiación solar global.

Con las imágenes de radiación solar instantánea en condiciones de cielo real se obtuvieron imágenes a cada media hora, de lo cual se prosiguió a intergrar la información en periodos de 30 minutos, de lo cual se utilizó la siguiente formula:

$$\frac{(B + b) * h}{2}$$

El método de la fórmula de Simpson consiste en que la curva se divide en secciones que se aproximan a trapecios en su forma (Fig. 33) y se calcula el área de cada una de ellas y se suman al final para obtener el área bajo la curva. Por lo tanto la formula a utilizar queda de la siguiente manera:

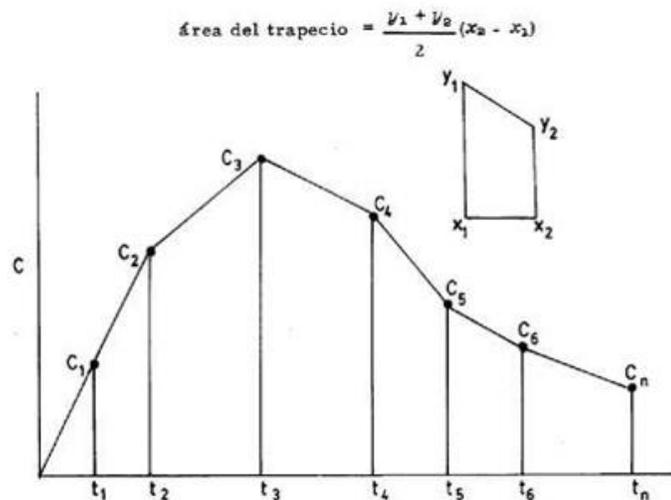
$$\frac{(y_2 + y_1) * (x_2 - x_1)}{2}$$

En donde:

$y_n$  = radiación solar en W/m<sup>2</sup>

$x_n$  = tiempo en minutos

Figura 33: Método trapezoidal.



Fuente: mazinger.sisib.uchile.cl.

Por lo tanto la sumatoria de cada una de las áreas de los trapezios generados en la curva, darán el resultado de la radiación solar global del día determinado:

$$GSR = \left( y_1 + 2 \sum_{i=2}^{i=n-1} y_i + y_n \right) * \left( \frac{x_2 - x_1}{2} \right)$$

Pero para agilizar esto, en el álgebra de mapas, se obtuvo una nueva fórmula que determina la radiación solar global tomando en cuenta un tiempo constante de media hora, convertido en dígitos de días sería la siguiente fórmula:

$$GSR = \left( y_1 + 2 \sum_{i=2}^{i=n-1} y_i + y_n \right) * \left( \frac{0.020833335}{2} \right)$$

Por último, para que las unidades de los mapas de radiación solar global sean en kWh/m<sup>2</sup>\*día, se hará la conversión desde la fórmula propuesta agregando el factor de conversión:

$$GSR = \left( y_1 + 2 \sum_{i=2}^{i=n-1} y_i + y_n \right) * \left( \frac{0.020833335}{2} \right) * 0.024$$

De esta manera las imágenes generadas serán mapas de la radiación solar global de un día determinado en condiciones de cielo real y con unidades en kWh/m<sup>2</sup>\*día. Esto transformado en fórmula disponible para mapas sería la propuesta por Python, que es su función de gcalc, la cual acepta imágenes ERS, con algunas restricciones. La fórmula quedaría de la siguiente manera:

```
gcalc GSR_2013015='(SR_CS_2013015_1145 +
(2*(SR_CS_2013015_1231+SR_CS_2013015_1301+SR_CS_2013015_1331+SR_CS_2013015_1
401+SR_CS_2013015_1431+SR_CS_2013015_1445+SR_CS_2013015_1515+SR_CS_2013015_
1601+SR_CS_2013015_1631+SR_CS_2013015_1701+SR_CS_2013015_1731+SR_CS_2013015_
1745+SR_CS_2013015_1831+SR_CS_2013015_1901+SR_CS_2013015_1931+SR_CS_201301
5_2001+SR_CS_2013015_2031+SR_CS_2013015_2045+SR_CS_2013015_2131+SR_CS_20130
```

15\_2201+SR\_CS\_2013015\_2231+SR\_CS\_2013015\_2301+SR\_CS\_2013015\_2331+SR\_CS\_2013015\_2345+SR\_CS\_2013015\_2415)) + SR\_CS\_2013015\_2501) \* (0.020833335/2) \* 0.024'

De la fórmula anterior se puede interpretar que por medio de la función gcalc se generará una nueva imagen denominada GRS\_2013015, utilizando la ecuación de integración de información, la cual estará disponible en la carpeta actual donde se localice la consola. De esta manera se llevó a cabo esta integración dando por resultado los mapas de la radiación por cada día.

Finalmente para obtener el mapa de la radiación solar global promedio, se promediaron por medio de la misma función las doce imágenes obtenidas. La instrucción fue la siguiente:

**gcalc**

**GSR\_2013**='(GSR\_2013015+GSR\_2013105+GSR\_2013196+GSR\_2013288+GSR\_2013046+GSR\_2013135+GSR\_2013227+GSR\_2013319+GSR\_2013074+GSR\_2013166+GSR\_2013258+GSR\_2013349)/12'

La función puede ser interpretada como la imagen GRS\_2013 será el promedio de doce imágenes que se procesaron. Así esta imagen es el promedio que se estaba esperando.

Cada uno de los mapas generados se presentan en el apartado de Anexos.

## VIII. RESULTADOS

Con todos los datos obtenidos para un año en específico, en este estudio el 2011, 2012 y 2013, por pertenecer a años más cercanos al cual se hizo esta investigación, se tuvo que el compendio de datos de estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional que sirvieron para la modelación y validación, fueron exclusivamente de los estado de Colima y Chiapas, en una temporalidad de un año y algunos días de meses en específico, respectivamente. Las estaciones que validaron este trabajo son las siguientes:

**Tabla 4: Estaciones meteorológicas de validación.**

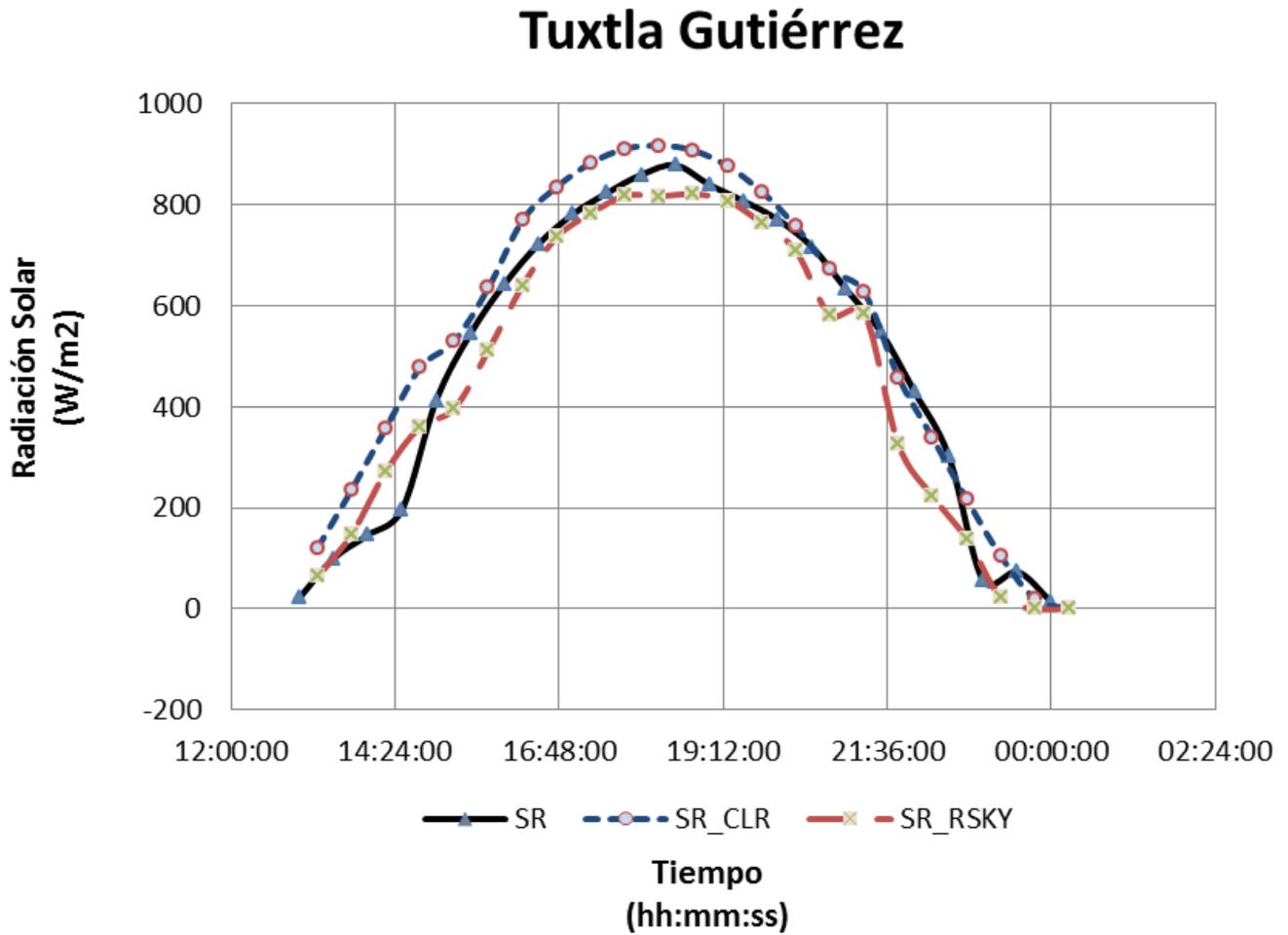
<b>Estación</b>	<b>Operada por</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>	<b>Mediciones puntuales cada 30 minutos</b>
Colima, Col	SMN ESIME	19°14'00"	103°44'00"	494	322
Tuxtla Gtz., Chis	SMN ESIME	16°45'00"	93°08'00"	570	49
Tonala, Chis	OCFS	16°05'03"	93°44'38"	66	51
Tapachula, Chis	SMN ESIME	14°53'13"	92°17'47"	118	50
Agua Azul, Chis	OCFS	17°14'56"	92°06'51"	299	50
L. Montebello, Chis	SMN EMAS	16°06'52"	91°43'48"	1492	50

Fuente: Archivo.

A continuación se muestra el compendio de gráficas de la validación de datos:

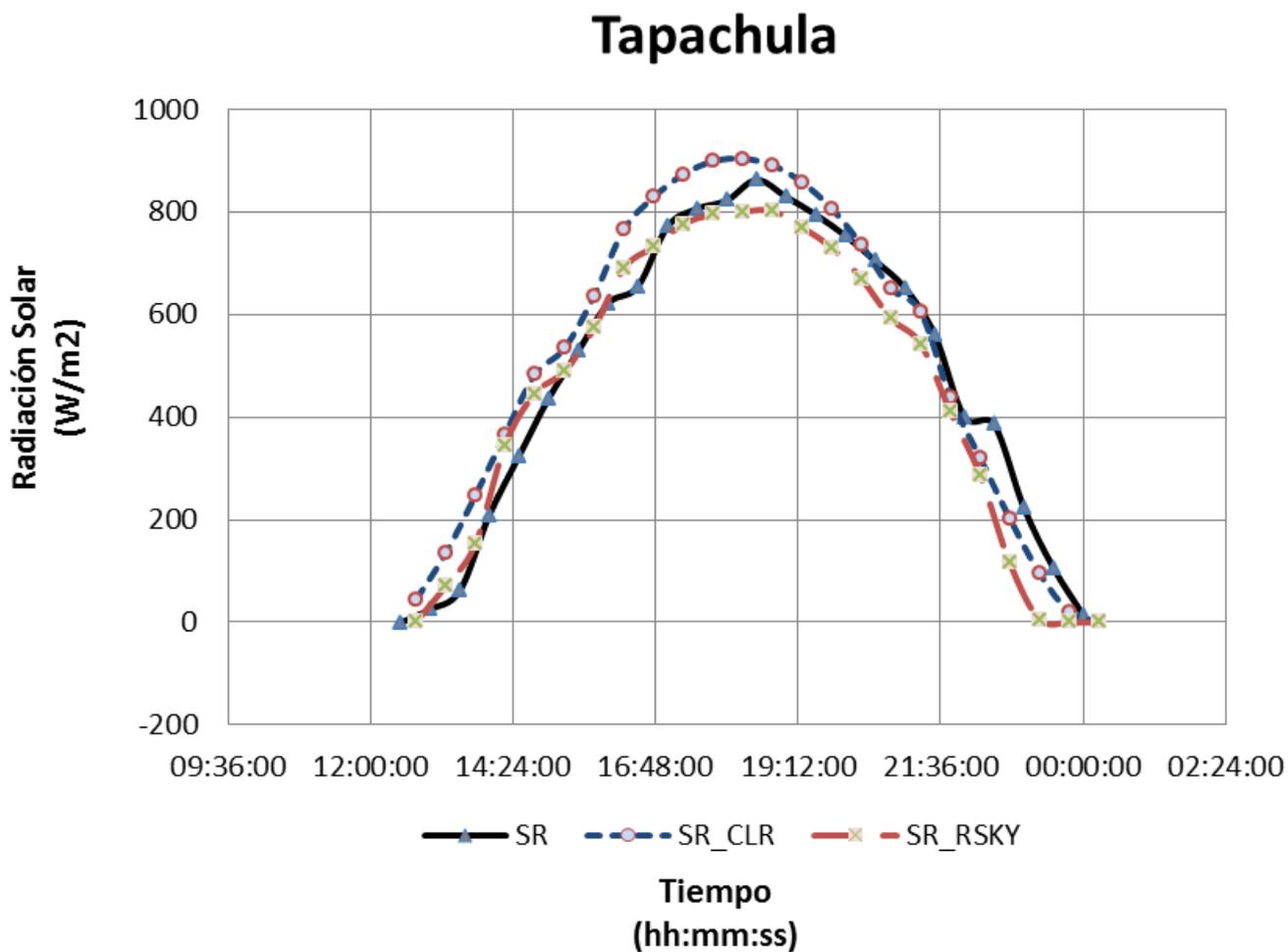
- SR: Datos de estaciones meteorológicas
- SR\_CLR: Datos modelados de radiación en condiciones de cielo despejado.
- SR\_RSKY: Datos modelados de radiación en condiciones de cielo real.

Gráfica 5: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de Tuxtla Gutiérrez, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



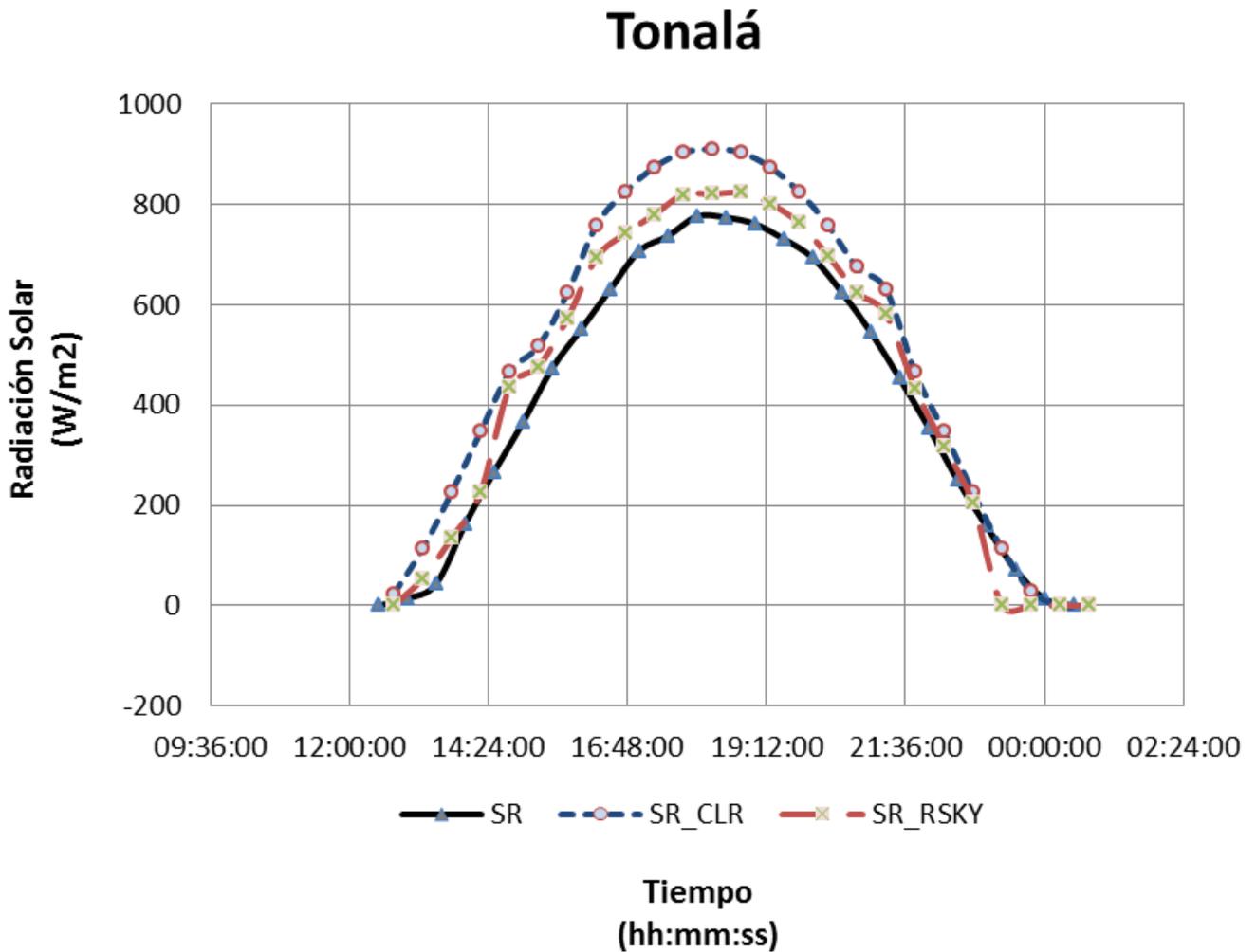
Fuente: Archivo.

Gráfica 6: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de Tapachula, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



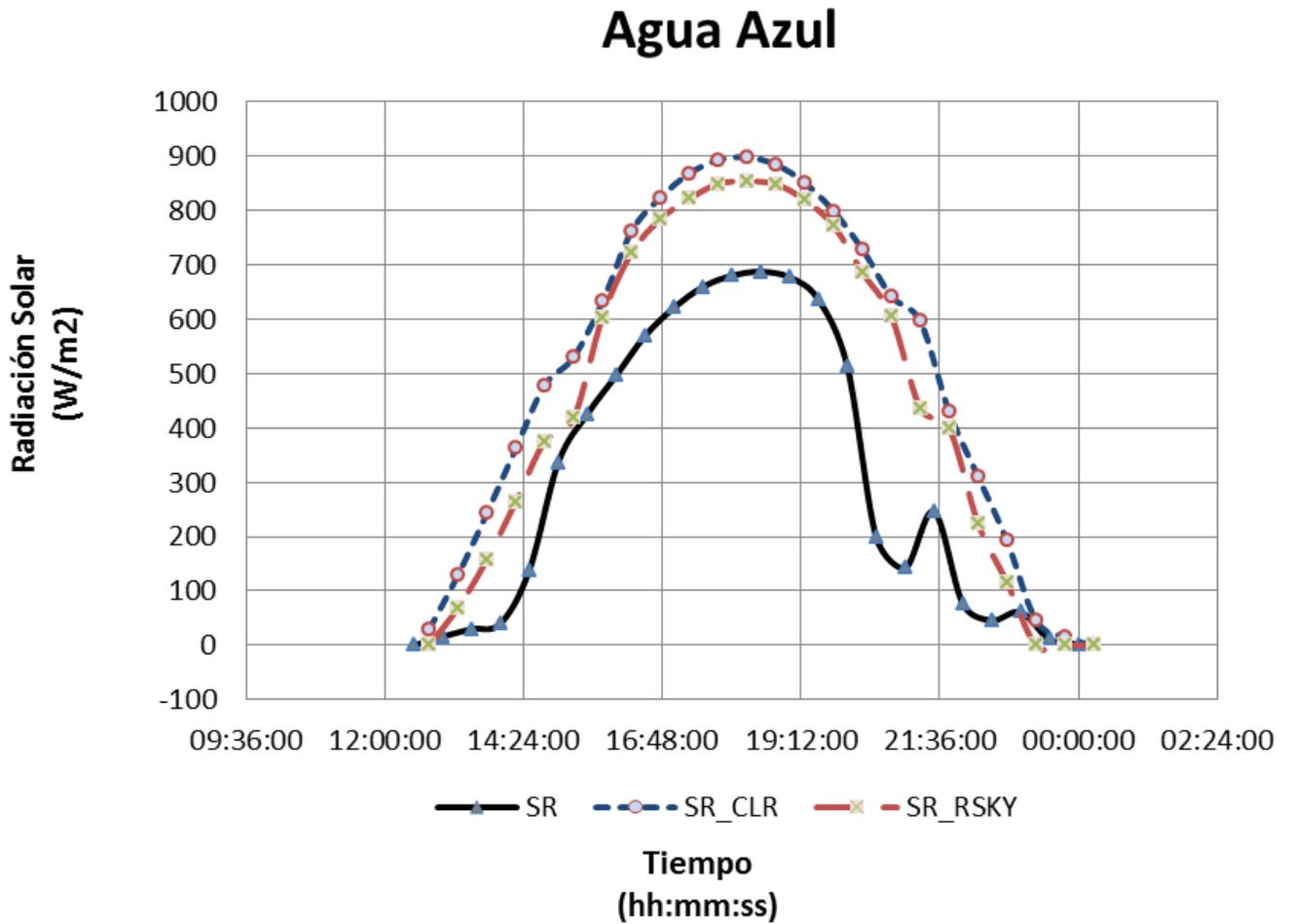
Fuente: Archivo.

Gráfica 7: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de Tonalá, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



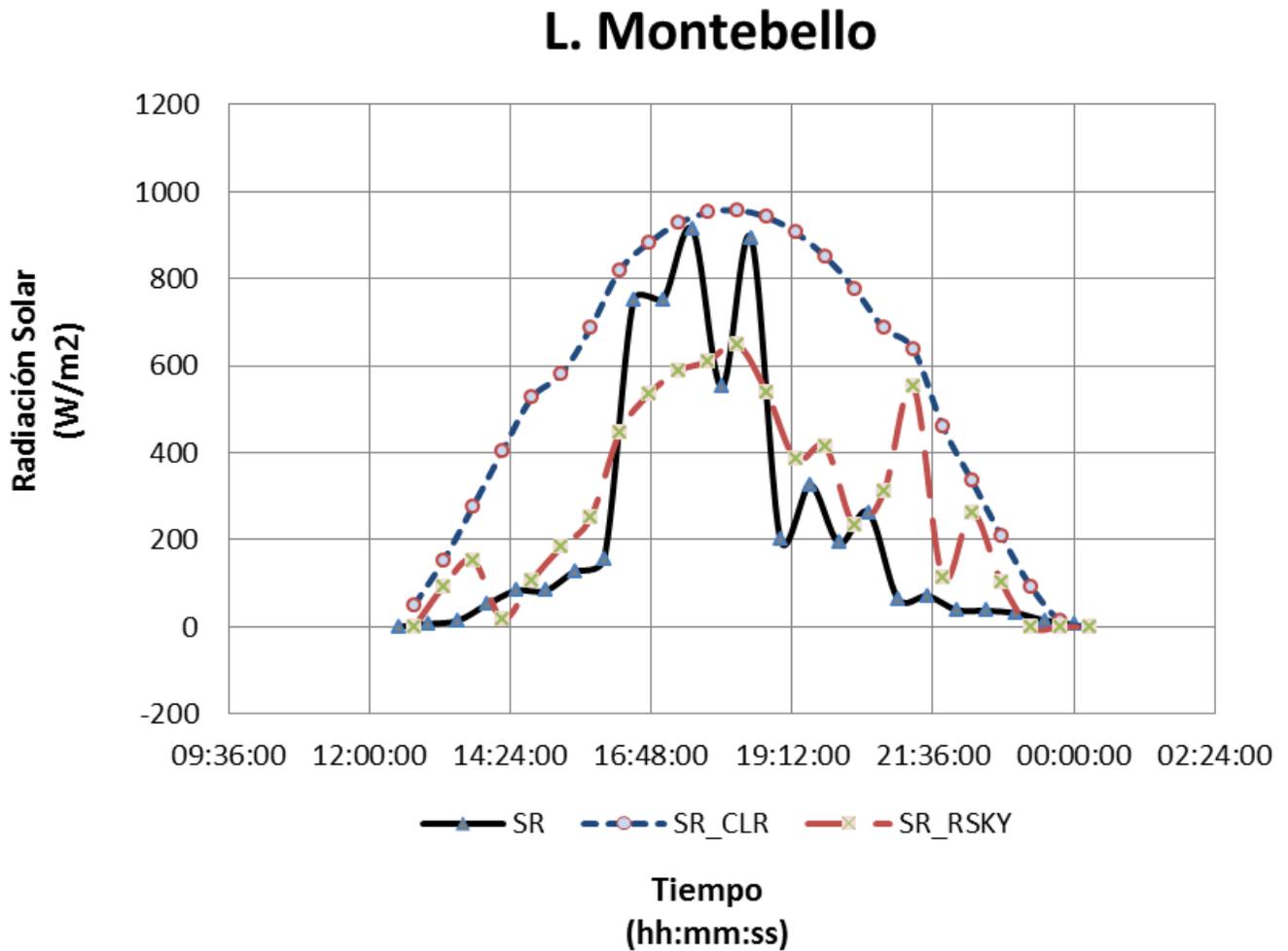
Fuente: Archivo.

Gráfica 8: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de Agua Azul, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



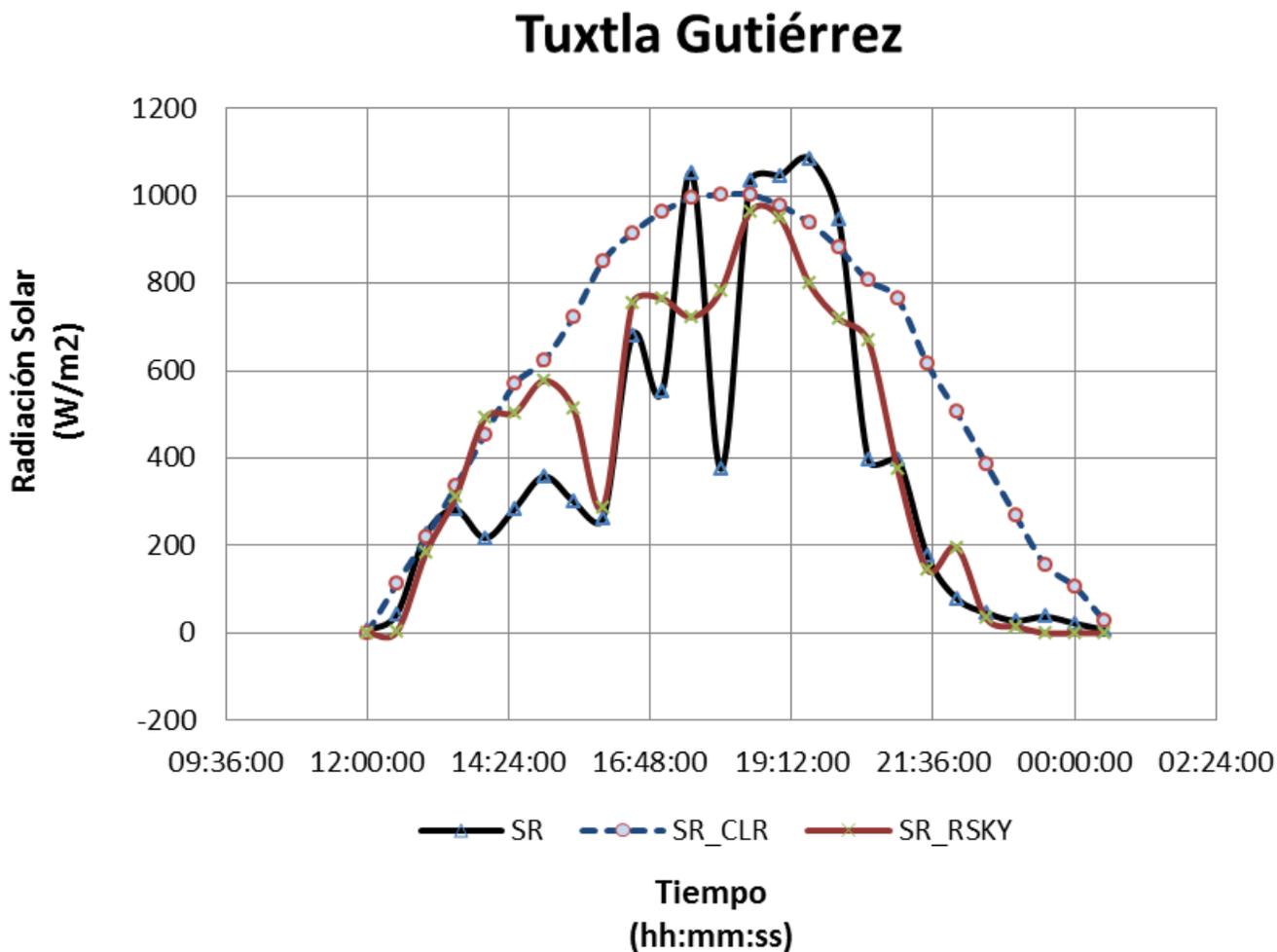
Fuente: Archivo.

Gráfica 9: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de L. Montebello, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



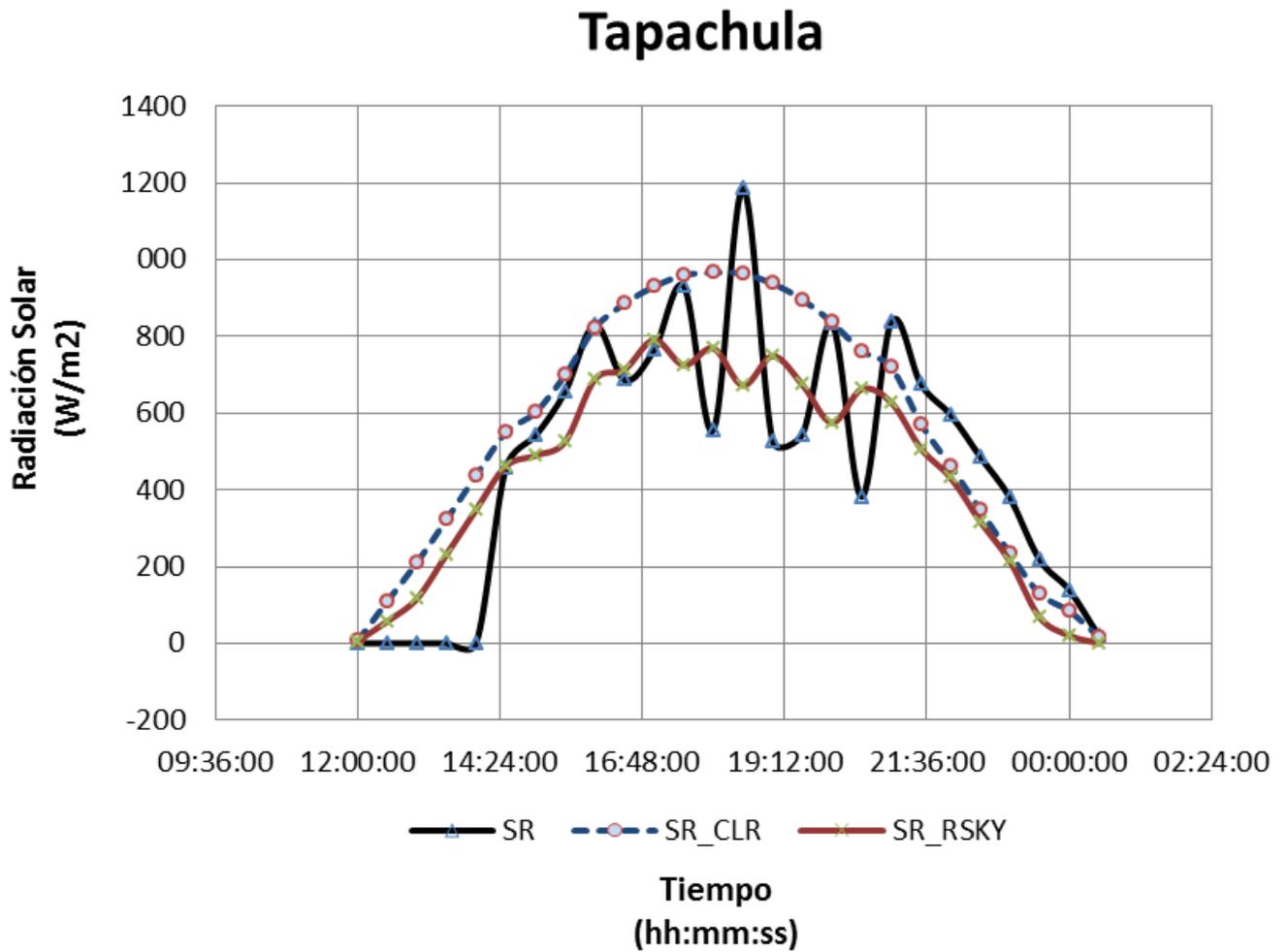
Fuente: Archivo.

Gráfica 10: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de Tuxtla Gutiérrez, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



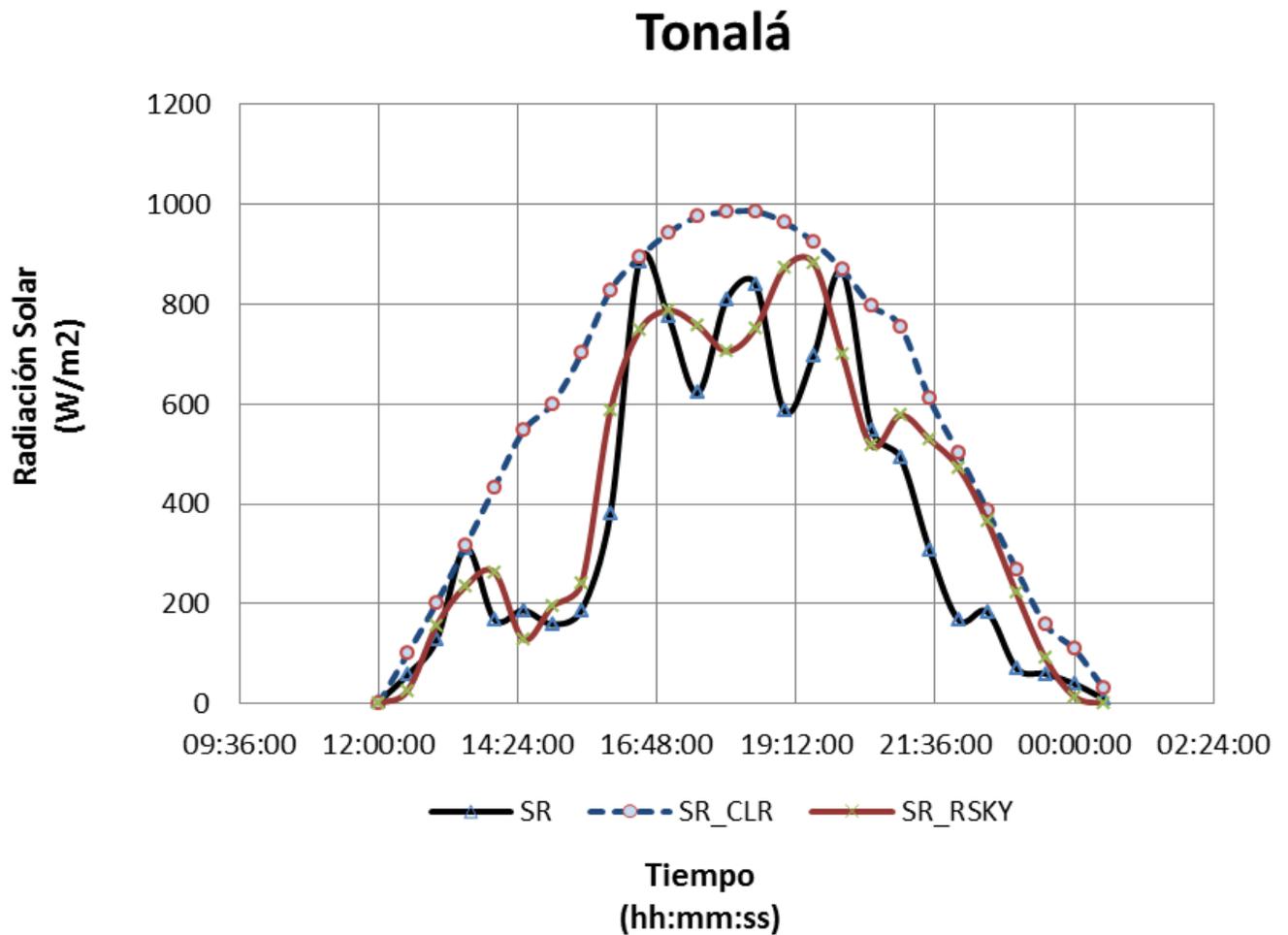
Fuente: Archivo.

Gráfica 11: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de Tapachula, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



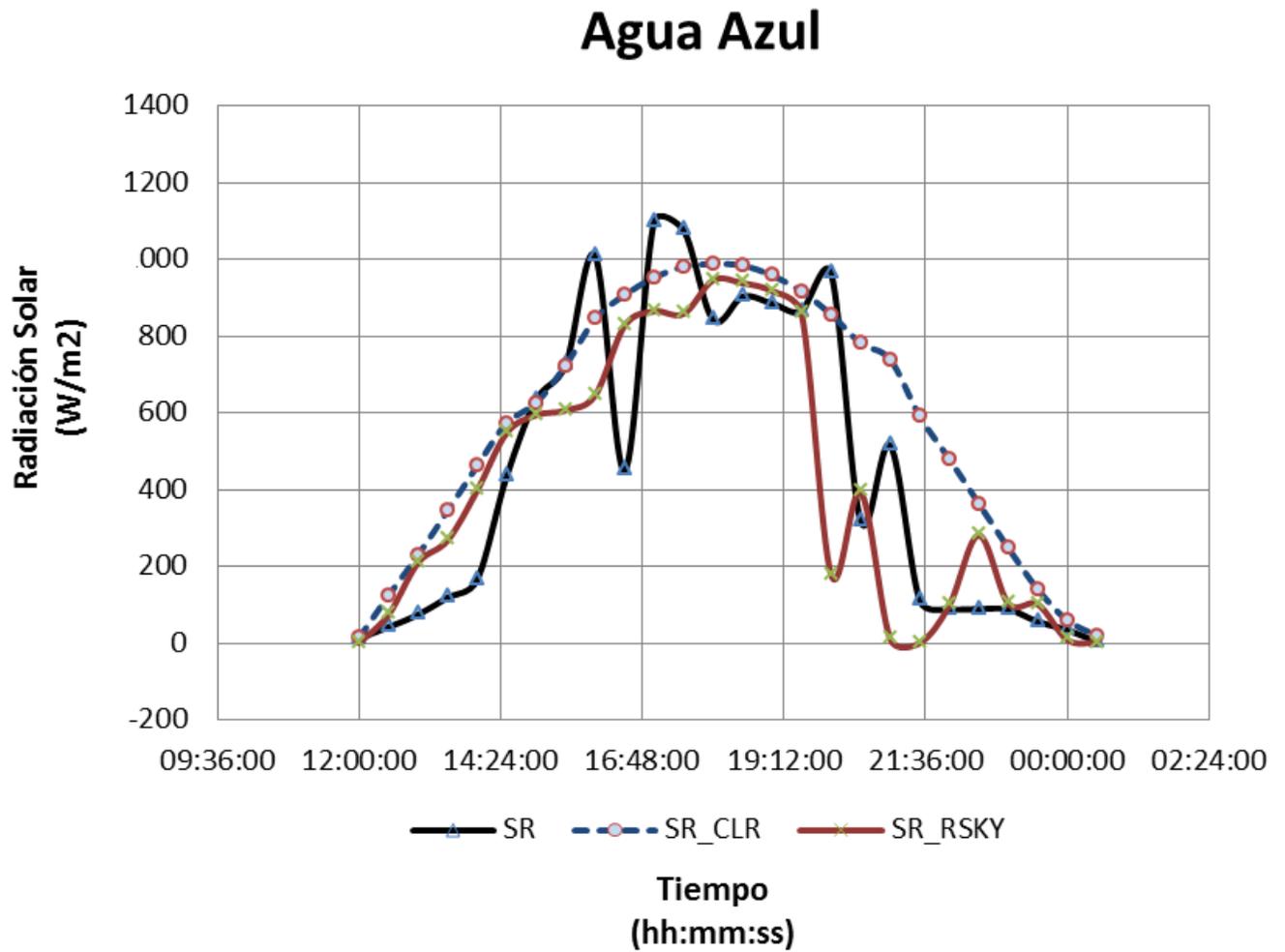
Fuente: Archivo.

Gráfica 12: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de Tonalá, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



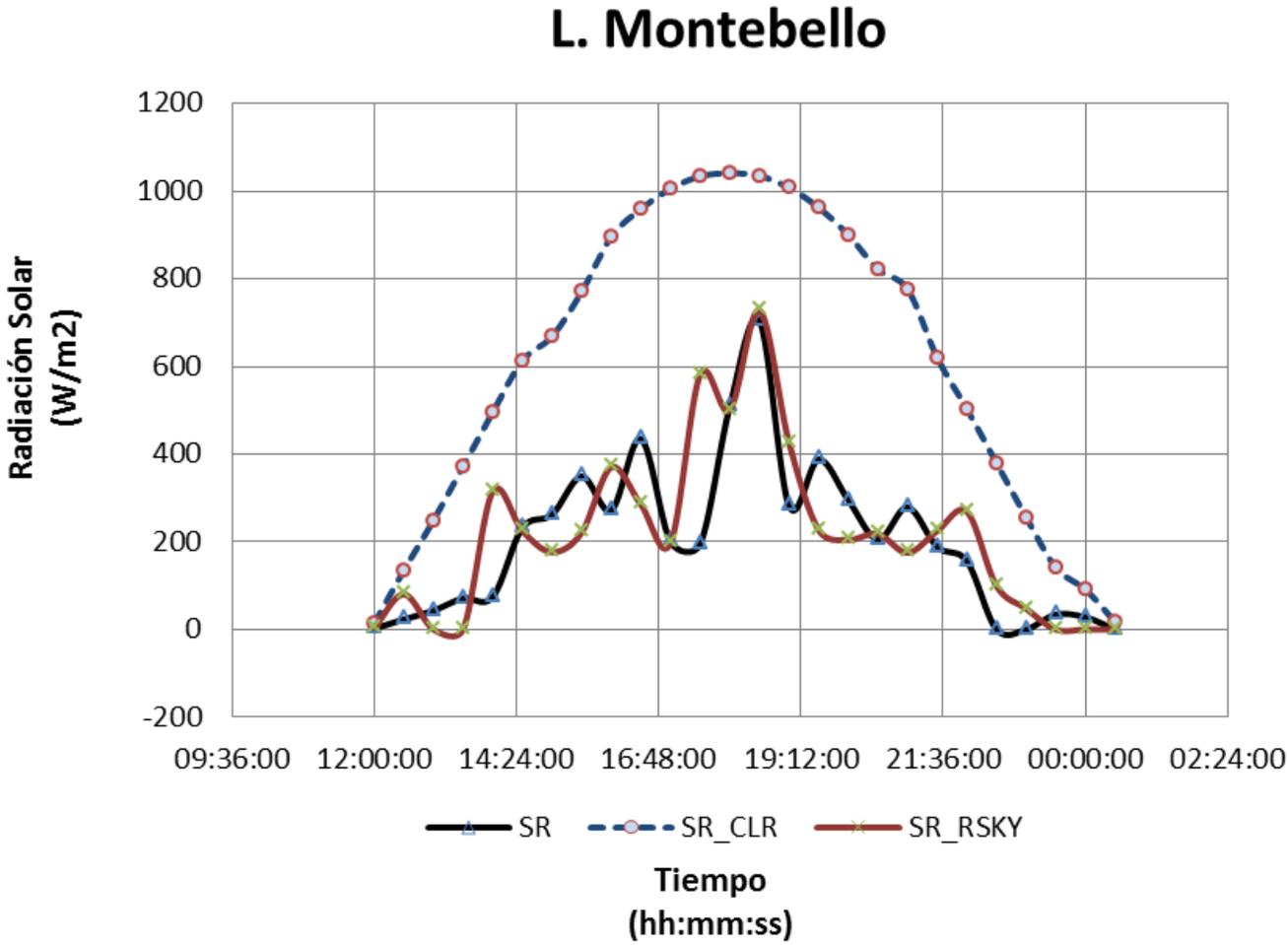
Fuente: Archivo.

Gráfica 13: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de Agua Azul, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



Fuente: Archivo.

Gráfica 14: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de L. Montebello, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica.



Fuente: Archivo.

Las gráficas nos muestran gran parte del trabajo realizado con los datos que se obtuvieron desde las estaciones meteorológicas, sitios de internet, información de satélite y otros más que fueron realizados por este equipo de trabajo de la realización de esta tesis.

A continuación se muestran las tablas pertenecientes a las estadísticas de las gráficas concernientes a los errores encontrados en porcentaje de los datos de estaciones contra los datos de radiación solar en condiciones de cielo real modelada:

**Tabla 5: Error encontrado entre los datos reales y los modelados de irradiancias totales integradas diarias. 04 de febrero de 2014.**

<b>Estación</b>	<b>Error (%)</b>
Tuxtla Gtz.	7.2
Tapachula	6.4
Tonalá	8.3
Agua Azul	48.1
L. Montebello	16.2

**Tabla 6: Error encontrado entre los datos reales y los modelados de irradiancias totales integradas diarias. 04 de agosto de 2014.**

<b>Estación</b>	<b>Error (%)</b>
Tuxtla Gtz.	8.3
Tapachula	6.5
Tonalá	13.5
Agua Azul	7.5
L. Montebello	6.7

De lo cual se desprendió que existe un error del 12.8% en irradiancias diarias integradas que se obtuvieron del modelado y la validación de estos, con los componentes de Radiación solar de estación meteorológica y Radiación solar en condiciones de cielo real, además que los datos obtenidos fueron para dos fechas en específico:

1. 04 de febrero de 2014, invierno para el hemisferio norte, condiciones de cielo despejado por la temporada y con muy poca nubosidad.
2. 04 de agosto de 2014, verano para el hemisferio norte, condiciones de cielo nublado por la temporada, con abundante nubosidad.

Se han escogido estas dos fechas por razones de practicidad, por cuestión de datos disponibles y para observar la radiación solar en función de la nubes y su efecto, además que las estaciones meteorológicas están situadas a diferentes alturas, por lo que en las gráficas se diferencia el comportamiento en cada región en las dos fechas específicas.

De lo que observamos es que en todas las gráficas existe un error el cual puede ser minimizado mediante el estudio profundo del problema, del cual se ha sugerido sobre la geometría Sol-nube, la cual tenemos la hipótesis de que puede ser un factor importante para la dinámica de la radiación solar, pero que por razones de tiempo y académicas, no se nos permitió continuar, pero lo satisfactorio de este trabajo, es que presentamos un nuevo modelo el cual está teniendo en cuenta los parámetros atmosféricos necesarios para el estudio del recurso solar, pero hemos añadido otros parámetros que en teoría son importantes para nosotros, estos son: el estocástico y el topográfico, factores relevantes para esta investigación, lo cual permitió también hacer por primera vez un producto de alta resolución, se habla de 500 m de resolución espacial, con lo que hemos cumplido con los objetivos planeados, y obtuvimos el producto que es de carácter referencial y el nuevo modelo que es aplicable en cualquier región del mundo, siempre y cuando existan los suministros debidamente georreferenciados, tomando en cuenta que hay un error aproximado del 12%.

Se sugiere continuar con este trabajo en la validación de datos para un tiempo más prolongado, lo cual podría haber una reducción en el error. De lo cual queda a consideración del lector poder tomar esta herramienta como base a futuros trabajos relacionados con el recurso solar y la teledetección como base fundamental.

Para la validación de los datos instantáneos a cada media hora se llevó a cabo mediante una validación cruzada denominada “K-fold cross validation” que es una técnica utilizada para evaluar los resultados de un análisis estadístico y garantizar que son independientes de la partición entre datos de entrenamiento y prueba. Consiste en repetir y calcular la media aritmética obtenida de las

medidas de evaluación sobre diferentes particiones. Se utiliza en entornos donde el objetivo principal es la predicción y se quiere estimar cómo de preciso es un modelo que se llevará a cabo a la práctica.<sup>3</sup>

Presenta dos ventajas sobre otro tipo de validaciones y son las siguientes:

- Los datos se dividen en  $K$  subconjuntos (folds). Uno de los subconjuntos se utiliza como datos de prueba y el resto ( $K-1$ ) como datos de entrenamiento.
- El proceso de validación cruzada es repetido durante  $K$  iteraciones, con cada uno de los posibles subconjuntos de datos de prueba.

Por lo tanto, el proceso de validación se realizó mediante un sistema de validación de diez particiones, que se repitió diez veces con particiones al azar para reducir los errores de muestreo. Los resultados fueron los siguientes:

Summary:

Average  error	96.7 W/m <sup>2</sup>
Correlation coefficient	0.75

# IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones que se pueden decir respecto a la metodología implementada para la obtención de la radiación solar global en condiciones de cielo real son las siguientes:

Se dijo en un principio que los mapas resultantes serían de alta resolución espacial, por lo que este objetivo se ha cumplido con una resolución de 500 m, siendo de los primeros mapas a este alcance, la metodología empleada para la producción de estos mapas han permitido la utilización de insumos de muy buena resolución espacial.

El conjunto de la utilización de procesos para el cálculo de la radiación solar global en condiciones de cielo despejado y real, han permitido el análisis de la metodología utilizado por los modelos que se siguieron en este trabajo, por lo que en el apartado de recomendaciones se hacen puntuales algunas concerniente al modelo utilizado para condiciones de cielo despejado.

La programación como herramienta en la obtención de este recurso se ha denominado como una herramienta sumamente básica, ya que sin ayuda de esta, este trabajo no hubiera sido terminado en tiempo y forma. Por lo que es de suma importancia reconocer y tener el conocimiento previo para poder entender el mecanismo utilizado en este trabajo concerniente a la nueva metodología.

Las imágenes satelitales como insumo base en la nueva metodología de cálculo de la irradiancia solar, también toman un lugar muy importante en este trabajo, deben de cumplir los requisitos de resolución espacial y temporal para una mejor obtención del producto.

La técnica de la percepción remota es una de las más confiables para la obtención de recursos a gran escala, con lo que se concluye que esta técnica ha surtido efecto tal y como se esperaba en un principio.

La validación se realizó utilizando un esquema K-folds validation usando 10 particiones y repitiendo 10 veces el proceso para permitir diferente particionamiento y reducir los errores de muestreo, en conclusión se tiene que este esquema es confiable y de gran ayuda para la reducción de errores en procesos repetitivos.

Las conclusiones de los mapas obtenidos son las siguientes:

Se evaluaron las ocho ciudades principales del estado de Chiapas: Tuxtla Gutiérrez, Tapachula de Córdova y Ordoñez, San Cristóbal de las Casas, Comitán de Domínguez, Villaflores, Palenque, Cintalapa y Tonalá.

Dejándolas en un shape de puntos con sus coordenadas centrales correctas en un WGS84 UTM Zona 15N, se procedió a evaluar e recurso con los mapas obtenidos finales y se tiene la siguiente tabla:

**Tabla 7: Resultados obtenidos en las ciudades principales en radiación solar global por mes y el promedio anual, unidades en kWh/m<sup>2</sup>/día.**

Mes/Ciudad	Tuxtla Gutiérrez	Tapachula	San Cristóbal	Comitán	Villaflores	Palenque	Cintalapa	Tonalá
Enero	4.69	4.83	1.01	2.63	5.33	4.96	4.74	4.86
Febrero	4.84	4.18	0.16	2.04	4.67	3.94	4.22	5.45
Marzo	4.8	5.9	1.65	2.44	5.82	4.92	4.95	5.11
Abril	6.79	5.66	2.57	4.2	7.2	6.12	7.42	6.41
Mayo	7.02	6.36	3.25	4.89	7.55	6.76	6.78	6.57
Junio	6.34	5.3	2.93	4.52	6.99	6.66	7.08	5.68
Julio	5.03	4.51	0.97	2.81	4.12	3.76	5.68	6.02
Agosto	5.13	3.68	0.26	2.12	6.23	4.91	5.65	5.63
Septiembre	5.12	5.63	2.25	3.73	5.15	4.45	4.81	5.01
Octubre	4.71	5.02	1.1	3.19	5.95	4.94	4.38	5.33
Noviembre	5.53	7.06	2.01	3.43	6.17	5.19	5.42	7.08
Diciembre	2.33	4.33	0.65	1.36	3.55	2.96	1.61	4.44
Promedio	5.19	5.21	1.57	3.11	5.73	4.96	5.23	5.63

Fuente: Archivo.

De lo cual se desprende que:

- La ciudad con mayor insolación promedio anual es: Villaflores con 5.73 y la que menor presenta es: San Cristóbal de las Casas con 1.57.
- La ciudad con mayor insolación en primavera es: Cintalapa con 7.42 y la menor es: San Cristóbal de las Casas con 2.57.
- La ciudad con mayor insolación en verano es: Tonalá 6.02 y la menor es San Critóbal con 0.97.
- La ciudad con mayor insolación en otoño es: Villaflores con 5.95 y la menor es San Cristóbal con 1.1.

- La ciudad con mayor insolación en invierno es: Villaflores con 5.33 y la menor es San Cristóbal con 1.01.

Las unidades utilizadas son kWh/m<sup>2</sup>/día.

**Tabla 8: Valores correspondientes a la insolación en las ciudades principales del estado de Chiapas, estas van de mayor a menor con una unidad de kWh/m<sup>2</sup>/día.**

	<b>Enero</b>		<b>Febrero</b>		<b>Marzo</b>		<b>Abril</b>
Villaflores	5.33	Tonalá	5.45	Tapachula	5.9	Cintalapa	7.42
Palenque	4.96	Tuxtla Gutiérrez	4.84	Villaflores	5.82	Villaflores	7.2
Tonalá	4.86	Villaflores	4.67	Tonalá	5.11	Tuxtla Gutiérrez	6.79
Tapachula	4.83	Cintalapa	4.22	Cintalapa	4.95	Tonalá	6.41
Cintalapa	4.74	Tapachula	4.18	Palenque	4.92	Palenque	6.12
Tuxtla Gutiérrez	4.69	Palenque	3.94	Tuxtla Gutiérrez	4.8	Tapachula	5.66
Comitán	2.63	Comitán	2.04	Comitán	2.44	Comitán	4.2
San Cristóbal	1.01	San Cristóbal	0.16	San Cristóbal	1.65	San Cristóbal	2.57
	<b>Mayo</b>		<b>Junio</b>		<b>Julio</b>		<b>Agosto</b>
Villaflores	7.55	Cintalapa	7.08	Tonalá	6.02	Villaflores	6.23
Tuxtla Gutiérrez	7.02	Villaflores	6.99	Cintalapa	5.68	Cintalapa	5.65
Cintalapa	6.78	Palenque	6.66	Tuxtla Gutiérrez	5.03	Tonalá	5.63
Palenque	6.76	Tuxtla Gutiérrez	6.34	Tapachula	4.51	Tuxtla Gutiérrez	5.13
Tonalá	6.57	Tonalá	5.68	Villaflores	4.12	Palenque	4.91
Tapachula	6.36	Tapachula	5.3	Palenque	3.76	Tapachula	3.68
Comitán	4.89	Comitán	4.52	Comitán	2.81	Comitán	2.12
San Cristóbal	3.25	San Cristóbal	2.93	San Cristóbal	0.97	San Cristóbal	0.26
	<b>Septiembre</b>		<b>Octubre</b>		<b>Noviembre</b>		<b>Diciembre</b>
Tapachula	5.63	Villaflores	5.95	Tonalá	7.08	Tonalá	4.44
Villaflores	5.15	Tonalá	5.33	Tapachula	7.06	Tapachula	4.33
Tuxtla Gutiérrez	5.12	Tapachula	5.02	Villaflores	6.17	Villaflores	3.55
Tonalá	5.01	Palenque	4.94	Tuxtla Gutiérrez	5.53	Palenque	2.96
Cintalapa	4.81	Tuxtla Gutiérrez	4.71	Cintalapa	5.42	Tuxtla Gutiérrez	2.33
Palenque	4.45	Cintalapa	4.38	Palenque	5.19	Cintalapa	1.61
Comitán	3.73	Comitán	3.19	Comitán	3.43	Comitán	1.36
San Cristóbal	2.25	San Cristóbal	1.1	San Cristóbal	2.01	San Cristóbal	0.65

Fuente: Archivo.

**Tabla 9: Valores correspondientes a la insolación mensual en cada ciudad principal.**

<b>Tuxtla Gutiérrez</b>		<b>Tapachula</b>		<b>San Cristóbal</b>		<b>Comitán</b>	
Mayo	7.02	Noviembre	7.06	Mayo	3.25	Mayo	4.89
Abril	6.79	Mayo	6.36	Junio	2.93	Junio	4.52
Junio	6.34	Marzo	5.9	Abril	2.57	Abril	4.2
Noviembre	5.53	Abril	5.66	Septiembre	2.25	Septiembre	3.73
Agosto	5.13	Septiembre	5.63	Noviembre	2.01	Noviembre	3.43
Septiembre	5.12	Junio	5.3	Marzo	1.65	Octubre	3.19
Julio	5.03	Octubre	5.02	Octubre	1.1	Julio	2.81
Febrero	4.84	Enero	4.83	Enero	1.01	Enero	2.63
Marzo	4.8	Julio	4.51	Julio	0.97	Marzo	2.44
Octubre	4.71	Diciembre	4.33	Diciembre	0.65	Agosto	2.12
Enero	4.69	Febrero	4.18	Agosto	0.26	Febrero	2.04
Diciembre	2.33	Agosto	3.68	Febrero	0.16	Diciembre	1.36
Prom	5.19	Prom	5.21	Prom	1.57	Prom	3.11
<b>Villaflores</b>		<b>Palenque</b>		<b>Cintalapa</b>		<b>Tonalá</b>	
Mayo	7.55	Mayo	6.76	Abril	7.42	Noviembre	7.08
Abril	7.2	Junio	6.66	Junio	7.08	Mayo	6.57
Junio	6.99	Abril	6.12	Mayo	6.78	Abril	6.41
Agosto	6.23	Noviembre	5.19	Julio	5.68	Julio	6.02
Noviembre	6.17	Enero	4.96	Agosto	5.65	Junio	5.68
Octubre	5.95	Octubre	4.94	Noviembre	5.42	Agosto	5.63
Marzo	5.82	Marzo	4.92	Marzo	4.95	Febrero	5.45
Enero	5.33	Agosto	4.91	Septiembre	4.81	Octubre	5.33
Septiembre	5.15	Septiembre	4.45	Enero	4.74	Marzo	5.11
Febrero	4.67	Febrero	3.94	Octubre	4.38	Septiembre	5.01
Julio	4.12	Julio	3.76	Febrero	4.22	Enero	4.86
Diciembre	3.55	Diciembre	2.96	Diciembre	1.61	Diciembre	4.44
Prom	5.73	Prom	4.96	Prom	5.23	Prom	5.63

Fuente: Archivo.

## X. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

<sup>7</sup>Albedo. (2015, 13 de marzo). Wikipedia, La enciclopedia libre. Fecha de consulta: 22:36, mayo 24, 2015 desde <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Albedo&oldid=80568994>.

Ángel Ramiro Montes de Oca. Peccata minuta (3a. y 4a. de forros) -Colección Premio- Editorial Icimavall. Perú, Madrid, Miami, México.

Aronoff. Stan, Remote Sensing for GIS Managers, ESRI Press: 2005.

Baker, John C., Kevin M. O'Connell y Ray A. Williamson Editors, Commercial Observation Satellites. At the Leading Edge of Global transparency. Rand and ASPRS: 2001.

Beyer, H. G., Costanzo, C., Heinemann, D. (1996). Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. Solar Energy, vol. 56, pp. 207-212.

Bird, R. E., Riordan, C. (1986). Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted plates at the earth's surface for cloudless atmospheres. Journal of Climate and Applied Meteorology, vol. 25, pp. 87-97.

Boletín UNAM-DGCS-157; Ciudad Universitaria. 12 de marzo de 2013. Mauro Valdés, Roberto Bonifaz, David Riveros y Héctor Estévez.

Buffo, J., Fritschen, L.J. & Murphy, J.L. 1972. Direct solar radiation on various slopes from 0 to 60 degrees north latitude. USDA Forest Service Research Paper PNW-142. Portland, OR, US.

Campbell, James B., Introduction to Remote Sensing, The Guilford Press: 1996.

Diana Liverman, Emilio F. Moran, Ronald R. Rindfuss y Paul C. Stern Editors, People and Pixels. National Academic Press: 1998.

<sup>3</sup>Devijver, P. A., and J. Kittler, *Pattern Recognition: A Statistical Approach*, Prentice-Hall, Londres, 1982.

<sup>8</sup>Estimación del índice de turbidez de linke para distintas localidades de Argentina. C. Raichijk GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina.

Estrada-Cajigal, V. (1992). Datos de Radiación Solar en la República Mexicana, alcances y limitaciones. *La Revista Solar*, No. 21, pp. 10-19.

Estrada, G. *et. al.* (2005) *Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de las Energías Renovables en México*. Anexo 6 – I. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigación en Energía. Mayo del 2005.

<sup>2</sup>Gasca, C. A. E., Bulnes, C. A. A., Rodríguez, R. D., Samperio, J. I., & Velásquez, A. M. *Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de las Energías Renovables en México Energía Solar*. Gordillo y Ortiz, Octavio. (1977). *Diccionario Biográfico de Chiapas*. Costa Amic. Tuxtla Gutiérrez, México.

German Advisory Council on Global Change (WGBU), 2009. *Solving the climate dilemma: the budget approach*. German Advisory Council on Global Change (WBGU) Special Report 2009.

*Global Horizontal Irradiance Clear Sky. Models: Implementation and Analysis*; Matthew J. Reno, Clifford W. Hansen, Joshua S. Stein.

Grossi Gallegos (1998a); *Distribución de la radiación solar global en la República Argentina*. I. *Análisis de la información*. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 4, pp. 119-123.

Grossi *et al.* (1986); *Disponibilidad y características de la radiación solar en Latinoamérica*; Universidad Nacional de Luján, Servicio Meteorológico Nacional; Buenos Aires, Argentina.

H. Grossi Gallegos (2005), Disponibilidad y características de la radiación solar en Latinoamérica; Universidad Nacional de Luján, Servicio Meteorológico Nacional; Buenos Aires, Argentina.

Gobierno del Estado de Chiapas. Agenda Estadística de Chiapas.

Hofierka, J., & Kaňuk, J. (2009). Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Renewable Energy*, 34(10), 2206-2214.

<sup>10</sup>“Hora solar” y “hora civil”. José C. Montes J. y Martha A. Villegas V. de Torreón, Coahuila, México, el 7 de Febrero del 2000.

<sup>9</sup>Hurricane Research Divission. Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory of National Oceanic and Atmospheric Administration: [http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A13\\_esp.html](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A13_esp.html)

Jan Remund, Lucien Wald, Mireille Lefevre, Thierry Ranchin, John Page. Worldwide Linke turbidity information. ISES Solar World Congress 2003, Jun 2003, Göteborg, Sweden. International Solar Energy Society (ISES), CD-ROM, 13 p, 2003.

Jensen, John R., *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall:1996.

Joshua Pearce, "Photovoltaics - A Path to Sustainable Futures", *Futures* 34 (7), 663-674, 2002. open access «How Thin-film Solar Cells Work» (en inglés). How stuff works.com. Consultado el 20 de febrero de 2013.

Juarros, Domingo. (1981). *Compendio de la Historia del Reino de Guatemala 1500-1800*. Editorial Piedra Santa. Guatemala.

Kittler, R., Mikler, J. (1986): *Basis of the utilization of solar radiation (in Slovak)*. VEDA, Bratislava, p. 150.

Kryza, M., Szymanowski, M., Migala, K., & Pietras, M. (2010). Spatial information on total solar radiation: Application and evaluation of the r. sun model for the Wedel Jarlsberg Land, Svalbard. Polish Polar Research, 31(1), 17-32.

Landsberg, H., (1961). Solar radiation over the earth's Surface. Solar Energy, vol. V, N° 3, pp. 95-98.

<sup>11</sup>Leer la hora en un reloj solar. <https://relojesdesol.wordpress.com/como-leer-la-hora-en-un-reloj-solar/>

Lillesand, Thomas M. y Ralph W. Kiefer, Remote Sensing and Image Interpretation, New York: Wiley & Sons, 2000.

Linke F. Transmissions-Koeffizient und Trübungsfaktor. Beitr. Phys. fr. Atmos. 10, 91-103 (1922).

Liu, B. Y. H., Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, vol. 4, pp. 1-19.

Lucano M. e Iván E. (2010); Evaluación del potencial de radiación solar global en el departamento de Cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales; Departamento de Física, Universidad Mayor de San Simón Cochabamba – Bolivia.

Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.),. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

<sup>5</sup>Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. Agencia Estatal de Meteorología.

<sup>6</sup>Modelos Digitales de Elevación (MDE) – Descripción, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Muhlía, A. (1990). Algo de Historia de la Solarimetría en México. II Taller de Radiación Solar, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Palmira Morelos, 23 al 25 de mayo de 1990. pp 21-25.

NIMA Technical Report TR8350.2 Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships With Local Geodetic Systems, Third Edition, National Geospatial-Intelligence Agency. This is the official publication of the standard, including addenda. Note this report actually documents the EGM 96 model (a revision of WGS 84). The original WGS 84 is documented in versions prior to 1996.

Optimum Tilt of Solar Panels. Written by Charles R. Landau. Copyright © 2001, 2002, 2008, 2010-2012, 2014. All rights reserved.

Orozco Zuarth, Marco A. (1994). Síntesis de Chiapas. Ediciones y Sistemas Especiales. Tuxtla Gutiérrez, México.

Page J. K., Flynn R. J., Dogniaux R. and Preuveneers G. European Solar Radiation Atlas, Vol II: global and diffuse radiation on vertical and inclined surfaces. TUV Rheinland, Koln (1984).

Pearce, J.M., 2002. Photovoltaics: a path to sustainable futures. Futures 34 (7), 663–674.

<sup>12</sup>¿Qué hora indica nuestro reloj de sol?. <http://olle.c2001.com/Horas.htm>

<sup>13</sup>¿Qué es una imagen satelital?. <http://www.teledet.com.uy/imagen-satelital.htm>

Renné, D. S., Perez, R., Zelenka, A., Whitlock, C. (1999). Use of weather and climate research satellites for estimating solar resources. In Y. D. Goswami, K. W. Böer (editors), Advances in Solar Energy, Vol. 13. American Solar Energy Society, Boulder, Colorado (ISBN 0-89553-256-5). Chapter 5, pp. 171-239.

Richards, John A. y Xiuping Jia, Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction, Springer: 1999.

Robledo Santiago, Edgar. (1990). Valores Humanos de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, México.

Thompson, Roberto G. y Poo, María de Lourdes. (1985). Cronología histórica de Chiapas, (...1516-1940). CIES. San Cristóbal de Las Casas, México.

Rogelio Ramos Aguilar/Alejandro Rivera Domínguez/Raúl Mayorga Raposo/José González Guevara. Aplicación de imágenes satelitales para determinar el clima y la radiación solar en el estado de Puebla y la geohidrología de su zona norte. *Ciencia Ergo Sum*, Noviembre 2003-Febrero 2004, año/vol. 10, número 003. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México, pp. 283-394.

Schowengerdt, Robert A., Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. Elsevier: 2007.

<sup>14</sup>Sistema de información geográfica. (2015, 23 de mayo). Wikipedia, La enciclopedia libre. Fecha de consulta: 23:57, mayo 24, 2015 desde.

[http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema\\_de\\_informaci%C3%B3n\\_geogr%C3%A1fica&oldid=82675765](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema_de_informaci%C3%B3n_geogr%C3%A1fica&oldid=82675765).

<sup>4</sup>Solano, R. and Aceituno, J., A high resolution Solar Irradiance Model Using Multispectral Satellite data, en preparación.

<sup>1</sup>USO DE SENSORES REMOTOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES; C. Angueira. 2000. GTRecursos Naturales, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Santiago del Estero.

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

# XI. ANEXOS

Este apartado consta de algunos datos que no aparecen en la parte del cuerpo de la tesis, por lo que se han puesto aquí con fin de hacerlos relevantes y dejando en claro que pertenecen tanto al marco teórico como a los resultados.

## 11.1. Tabla de figuras

Figura 1: Ubicación del estado de Chiapas. _____	11
Figura 2: Espectro electromagnético y sus categorías. _____	17
Figura 3: Pirheliómetro de primera clase. _____	18
Figura 4: Piranómetros. Izquierda para medir radiación global, derecha para medir radiación difusa. _____	19
Figura 5: Pirgeómetro. _____	20
Figura 6: Modelo digital de elevación con vista en perspectiva. _____	23
Figura 7: Representación de un modelo digital de elevación en formato raster. _____	24
Figura 8: Gráfica de la ecuación del tiempo durante el año. _____	27
Figura 9: Distribución anual de la radiación global de Landsberg (Landsberg, H., 1961) _____	33
Figura 10: Distribución de la energía solar de la región meridional de América del Sur (Grossi et. al, 1986) _____	34
Figura 11: Distribución espacial del promedio anual de la radiación solar global diaria en América del Sur (Grossi Gallegos, 1998a) _____	35
Figura 12: MDE original descargado desde el portal del INEGI. _____	45
Figura 13: MDE reproyectado y remuestreado a 30 m. _____	47
Figura 14: MDE reproyectado y remuestreado a 500 m. _____	48
Figura 15: Lista de productos MODIS, del cual se seleccionó el correspondiente a albedo. _____	50
Figura 16: Tiles correspondientes a productos MODIS _____	51
Figura 17: ModisTool con parámetros de entrada y salida de datos de albedo. _____	52
Figura 18: Mosaico derivado de los tiles h09v07 y h08v07 en proyección geográfica en formato TIFF desde productos MCD43A3. Muestra el albedo en porcentaje en un mapa, del cual se desprendió la región en estudio. _____	53
Figura 19: A la izquierda, mapa de albedo en números digitales en proyección UTM, se observan los valores nulos debido a las condiciones del tiempo. A la derecha mapa de albedo con números convertidos a valores de albedo en la misma proyección, se observa que no existen valores nulos, debido a las condiciones del tiempo que fueron en el tiempo de adquisición de los datos. _____	54
Figura 20: Mapa de albedo con huecos, original desde producto MODIS del día juliano 161. _____	55
Figura 21: Mapa de albedo interpolado temporalmente con iinterp del día juliano 161. _____	57
Figura 22: Mapa de albedo interpolado espacialmente con GRASS GIS del día juliano 161. Mapa final de albedo para generación de datos de radiación solar en condiciones de cielo despejado. _____	58
Figura 23: Mapa de coeficiente de Linke correspondiente al mes de enero, descargado directamente del sitio de SoDa Service. _____	59
Figura 24: A la izquierda los parámetros del archivo .tfw (World File), a la derecha los archivos .tfw con su respectiva imagen .tif _____	60
Figura 25: Mapa de turbiedad de Linke de todo el país, en datos originales y en una proyección geográfica. _____	61
Figura 26: Mapa de Coeficiente de turbiedad de Linke, georreferenciado y proyectado a UTM. _____	65

Figura 27: Mapa de Coeficiente de turbiedad de Linke, georreferenciado y proyectado a UTM. Mapa utilizado como parámetro de entrada en el cálculo de la radiación solar en condiciones de cielo despejado. _____	66
Figura 28: Radiación solar en condiciones de cielo despejado con hora solar. Prueba realizada para el día 125 juliano a mediodía, paso del sol por el cenit de la región. _____	71
Figura 29: Radiación solar tomando en cuenta el tiempo civil y el mapa de longitudes. Prueba realizada para el día 125 juliano a mediodía, paso del sol por el cenit de la región _____	72
Figura 30: Ecuación del tiempo durante el año. _____	73
Figura 31: Resultado de ejecutar la función gdalinfo, para obtener información de referencia espacial del archivo, obteniendo el EPSG. _____	75
Figura 32: Estructura de datos requeridos por el IrradB1_com _____	77
Figura 33: Método trapezoidal. _____	79

## 11.2. Tabla de tablas

Tabla 1: Datos del sitio SoDa Service por cada estación meteorológica por mes. _____	62
Tabla 2: Datos de las imágenes procesadas por cada estación meteorológica por mes. _____	62
Tabla 3: Datos utilizados para hallar la correlación entre meses medios por estación del año. _____	64
Tabla 4: Estaciones meteorológicas de validación. _____	82
Tabla 5: Error encontrado entre los datos reales y los modelados de irradiancias totales integradas diarias. 04 de febrero de 2014. _____	93
Tabla 6: Error encontrado entre los datos reales y los modelados de irradiancias totales integradas diarias. 04 de agosto de 2014. _____	93
Tabla 7: Resultados obtenidos en las ciudades principales en radiación solar global por mes y el promedio anual, unidades en kWh/m <sup>2</sup> /día. _____	97
Tabla 8: Valores correspondientes a la insolación en las ciudades principales del estado de Chiapas, estas van de mayor a menor con una unidad de kWh/m <sup>2</sup> /día. _____	98
Tabla 9: Valores correspondientes a la insolación mensual en cada ciudad principal. _____	99

## 11.3. Tabla de gráficas

Gráfica 1: Correlación lineal entre los datos reales de Linke y datos de las imágenes procesadas. _____	63
Gráfica 2: Correlación entre datos de meses medios de estaciones del año, línea de tendencia, ecuación definitiva para calibrar los datos y R <sup>2</sup> . _____	64
Gráfica 3: Gráfica de la eficiencia de un panel fotovoltaico a una inclinación fija, a cuatro inclinaciones al año, a dos movimientos (vertical y horizontal) y una inclinación fija para invierno en todo el año _____	69

Gráfica 4: Gráfica obtenida con el modelado de la radiación en las siguientes inclinaciones del panel: FT es una inclinación fija para todo el año, FT4, cuatro inclinaciones al año y FTW, inclinación de invierno para todo el año. _____	69
Gráfica 5: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de Tuxtla Gutiérrez, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. _____	83
Gráfica 6: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de Tapachula, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. _____	84
Gráfica 7: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de Tonalá, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. _____	85
Gráfica 8: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de Agua Azul, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. _____	86
Gráfica 9: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de febrero de 2014, para la estación de L. Montebello, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. _____	87
Gráfica 10: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de Tuxtla Gutiérrez, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. _____	88
Gráfica 11: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de Tapachula, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. _____	89
Gráfica 12: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de Tonalá, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. _____	90
Gráfica 13: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de Agua Azul, considerando tres parámetros, radiación solar en condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. _____	91
Gráfica 14: Resultado del modelado y validación de datos correspondientes al 4 de agosto de 2014, para la estación de L. Montebello, considerando tres parámetros, radiación solar en	

condiciones de cielo despejado, radiación solar en condiciones de cielo real y la radiación medida desde una estación meteorológica. \_\_\_\_\_ 92

## 11.4. Modelo para cálculo de la radiación solar en condiciones de cielo real<sup>4</sup>

Solano, R. and Aceituno, J., A high resolution Solar Irradiance Model Using Multispectral Satellite data, en preparación.

Modeling results, Col + Chis dataset (Col+Chis-v1)

R. Solano, Nov/26/14

Dataset

- Col v5, 1 station \* 12 months
- Chis v1, 5 stations \* 2 months

Validation was done using a 10-fold scheme, repeated 10 times to allow different fold partitioning and reducing sampling errors.

Results

Variables used:

MS = Satellite multispectral data

SH = Solar height angle

H = Terrain altitude

Model (empirical, rule-based modeling, similar to a step-wise regression)

Data: 542 cases (14 attributes) from Irrad-vB1.data

Rule 1: [92 cases, mean 56.1, range -129 to 340, est err 57.2]

if

B1 <= 1934

then

$$\text{SR\_Diff} = -144.2 + 0.1213 \text{ B1} - 0.99 \text{ SH} + 0.0046 \text{ B3}$$

Rule 2: [367 cases, mean 169.2, range -222 to 829, est err 120.4]

if

B1 > 1934

H <= 500

then

$$\text{SR\_Diff} = -93.2 + 0.0496 \text{ B1} - 0.0046 \text{ B4} + 0.0044 \text{ B6} + 0.002 \text{ B2} + 0.016 \text{ H}$$

Rule 3: [83 cases, mean 283.8, range -147 to 839, est err 133.4]

if

B1 > 1934

H > 500

then

$$\begin{aligned} \text{SR\_Diff} = & -483.1 - 0.1096 \text{ B4} + 0.1064 \text{ B6} + 0.0354 \text{ B2} + 0.0334 \text{ B1} \\ & + 0.264 \text{ H} \end{aligned}$$

Attribute usage:

Conds Model

100% 100% B1

83% 83% H

83% B2

83% B4

83% B6

17% B3

17% SH

## 11.5. Definiciones básicas y glosario de términos

### *Estación Meteorológica:*

Instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos.

### *Imágenes satelitales:*

Representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial.

### *MDE:*

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

### *Percepción Remota:*

Ciencia y arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto.

### *Radiación Solar:*

Se trata de un proceso físico, por medio del cual se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas, en línea recta, sin intervención de una materia intermedia, a 300.000 km por segundo.

### *Satélite artificial:*

Nave espacial fabricada en la Tierra o en otro lugar del espacio y enviada en un vehículo de lanzamiento, un tipo de cohete que envía una carga útil al espacio. Los satélites artificiales pueden orbitar alrededor de lunas u objetos naturales del espacio, asteroides, planetas. Tras su vida útil, los satélites artificiales pueden quedar orbitando como basura espacial.

*Sensor Satelital:*

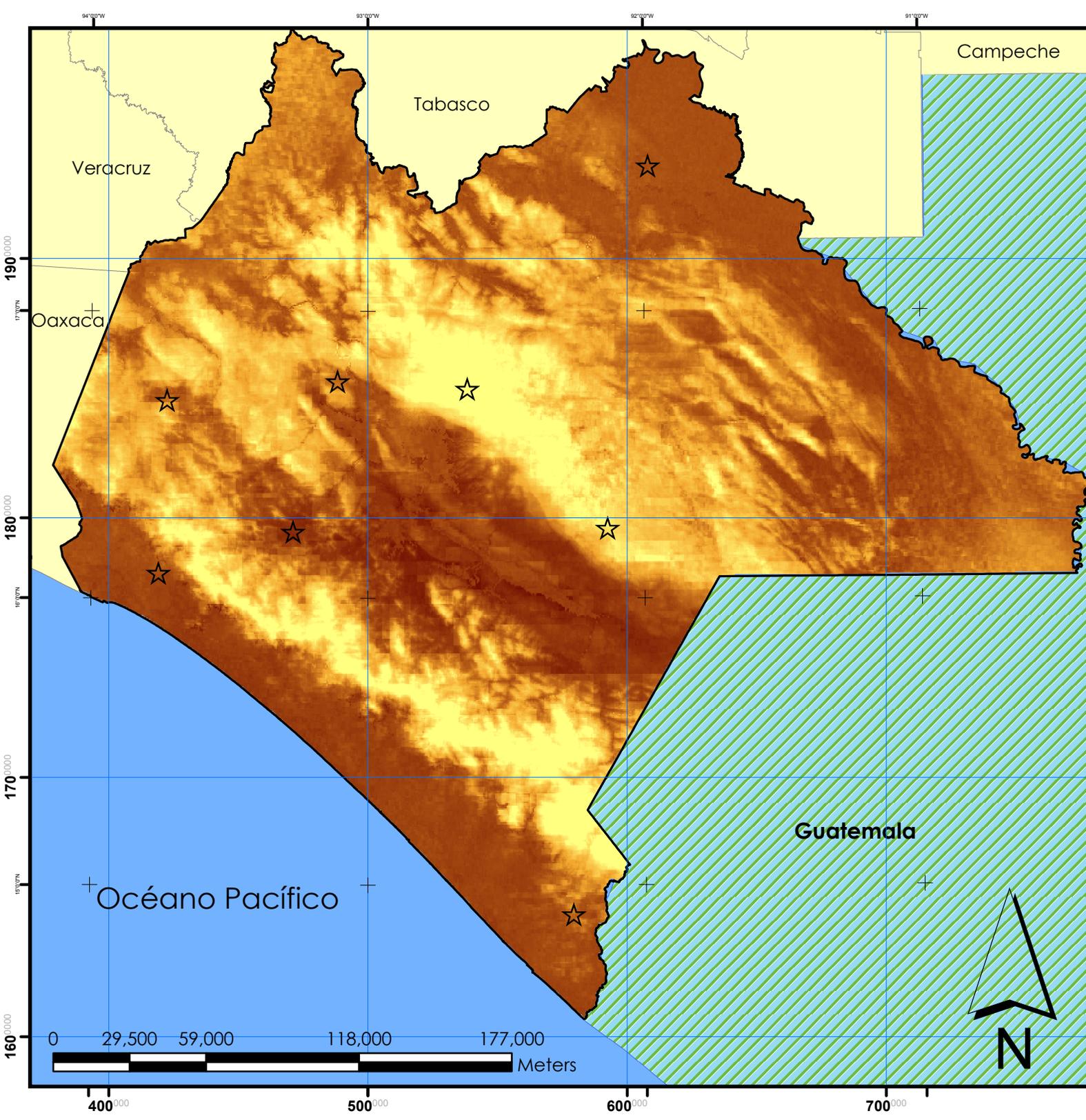
Recogen información reflejada por la superficie de la tierra que luego es enviada a la Tierra y que procesada convenientemente entrega valiosa información sobre las características de la zona representada.

## **11.6. Compendio de mapas de insolaciones mensuales**

Ver el CD.

## 11.7. Mapa de insolación promedio anual

Ver el CD.



# Insolación global de enero para el estado de Chiapas

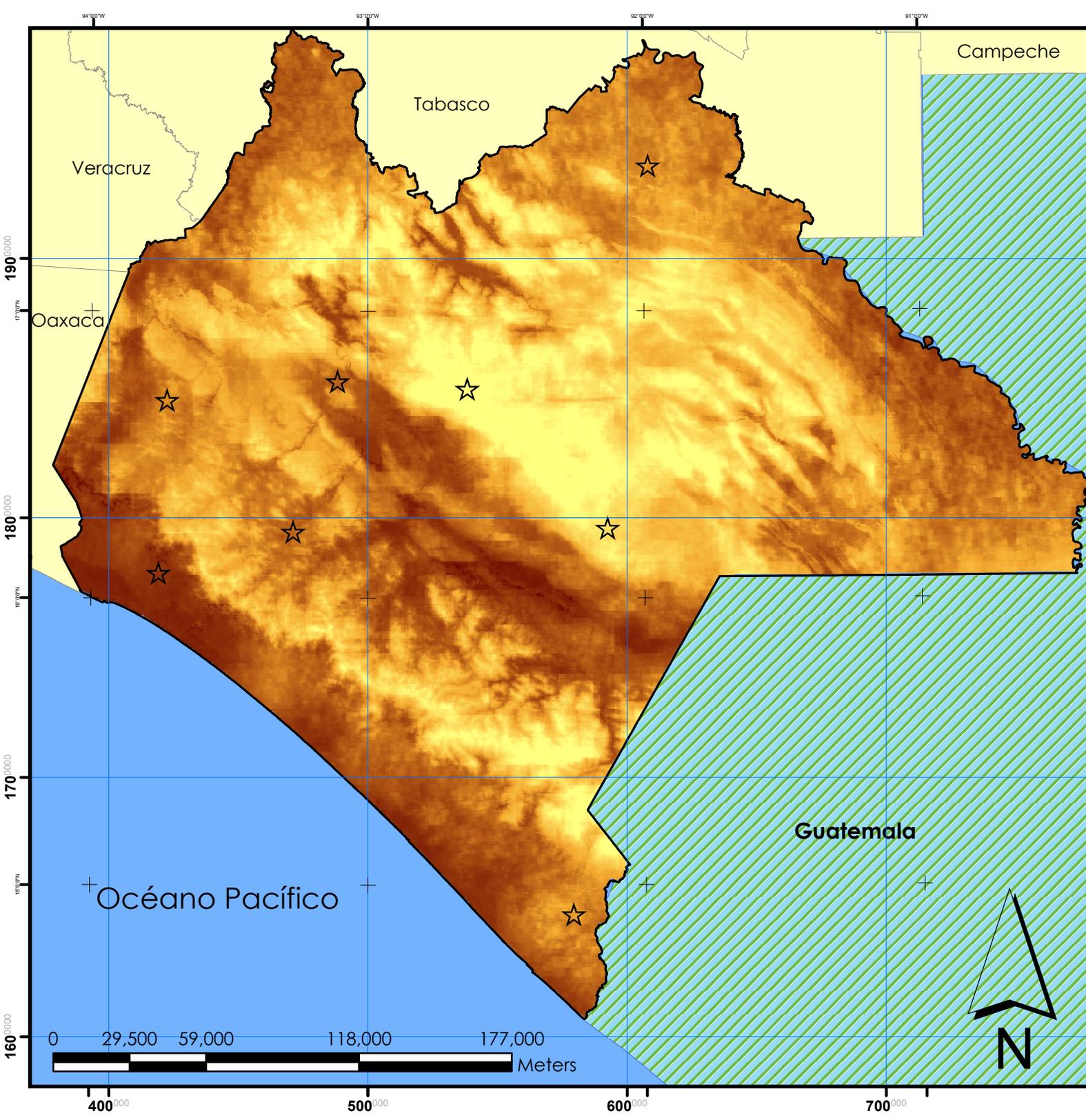
## SIMBOLOGÍA

### Enero (kWh/m<sup>2</sup>/día)



- ☆ C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



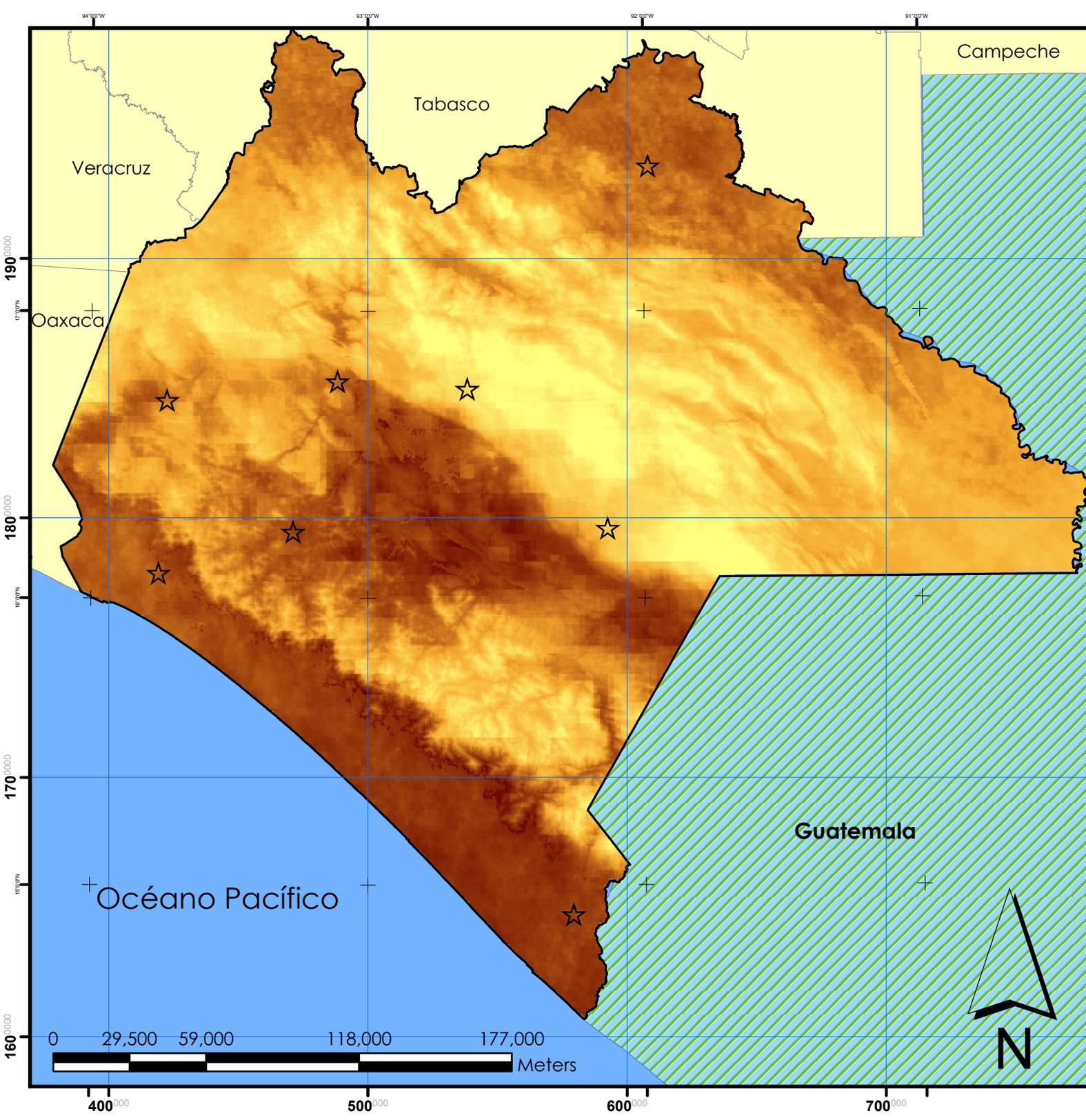
# Insolación global de febrero para el estado de Chiapas

## SIMBOLOGÍA

### Febrero (kWh/m<sup>2</sup>/día)

- Alta: 6.52**
- Baja: 0.00**
- C. importantes**
- Estados**
- Guatemala**

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



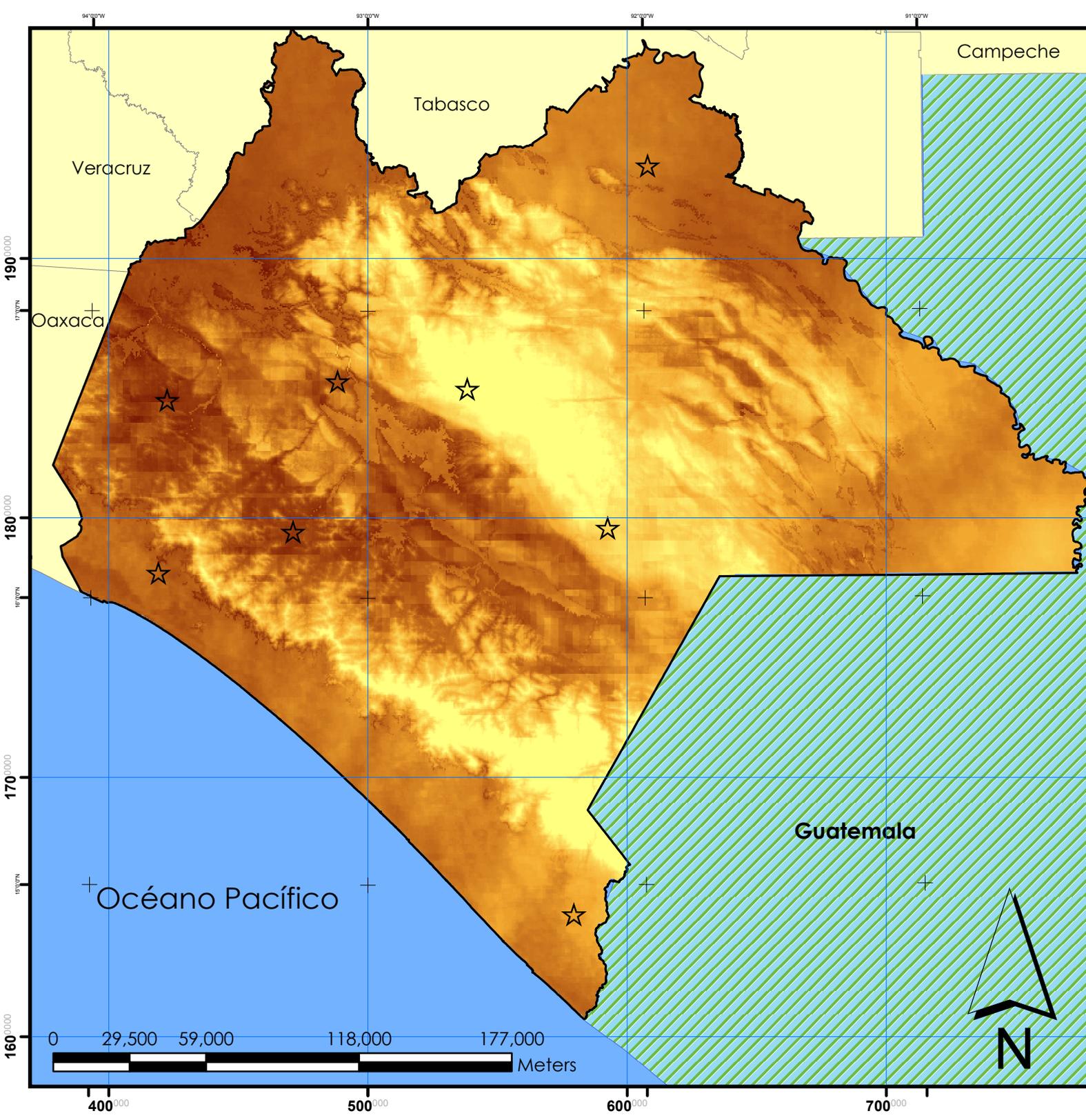
# Insolación global de marzo para el estado de Chiapas

## SIMBOLOGÍA

Marzo (kWh/m<sup>2</sup>/día)

- Alta: 7.27
- Baja: 0.00
- ☆ C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



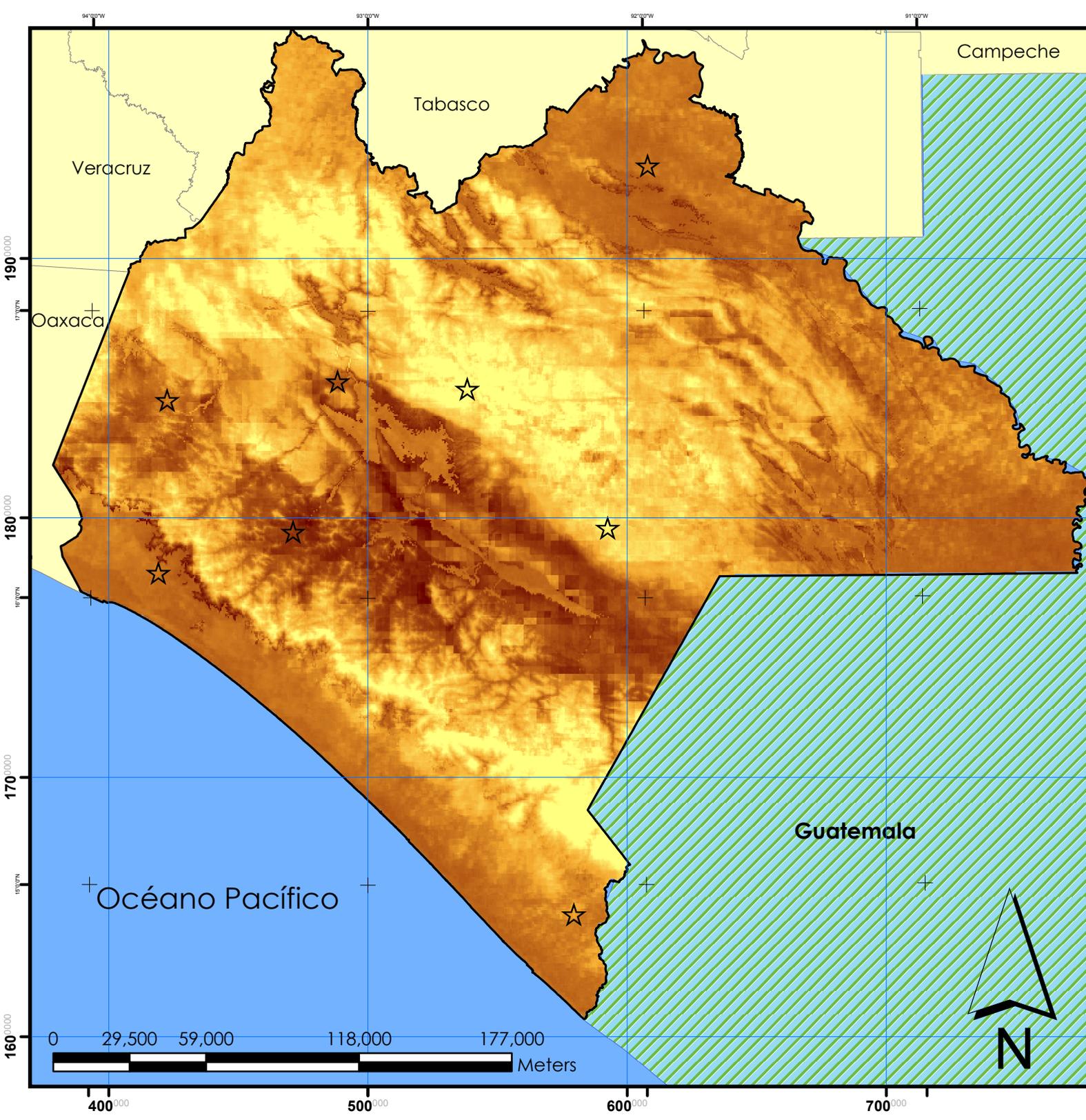
# Insolación global de abril para el estado de Chiapas

## SIMBOLOGÍA

Abril (kWh/m<sup>2</sup>/día)

- Alta: 7.86
- Baja: 0.24
- C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



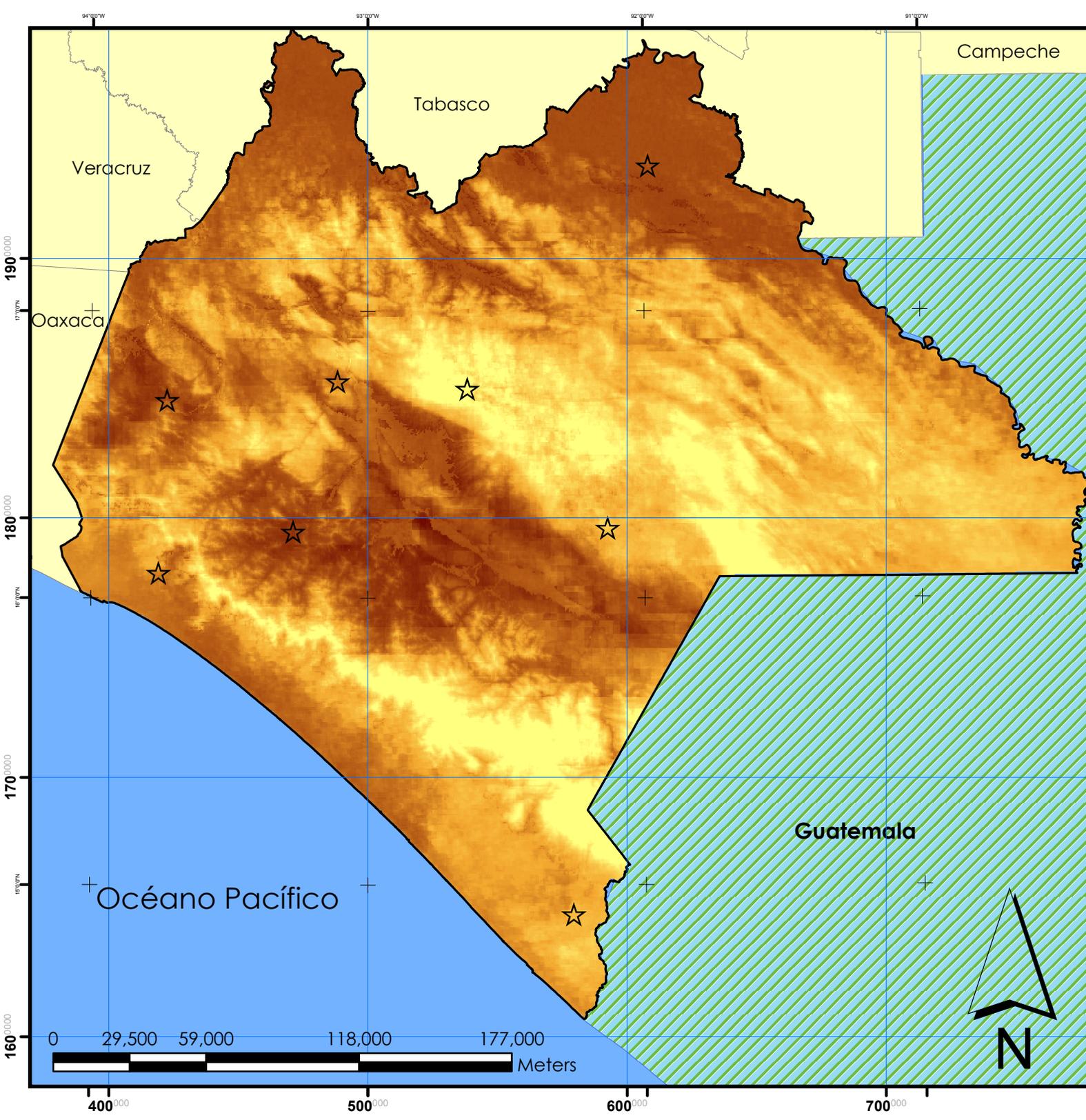
# Insolación global de mayo para el estado de Chiapas

## SIMBOLOGÍA

### Mayo (kWh/m<sup>2</sup>/día)

- Alta: 8.49
- Baja: 1.13
- ☆ C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



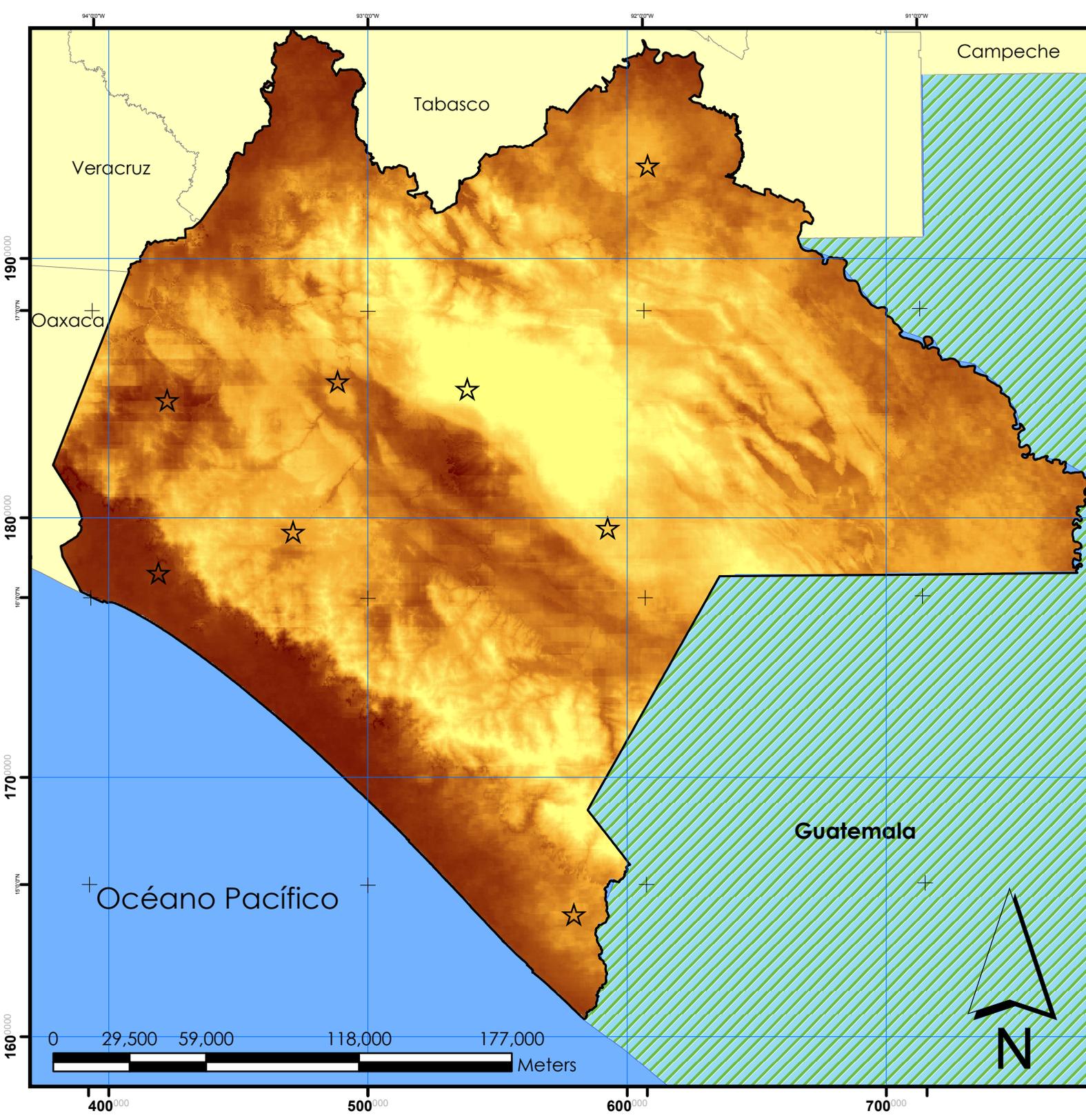
# Insolación global de junio para el estado de Chiapas

## SIMBOLOGÍA

### Junio (kWh/m<sup>2</sup>/día)

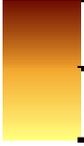
- Alta: 7.91
- Baja: 0.52
- ☆ C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



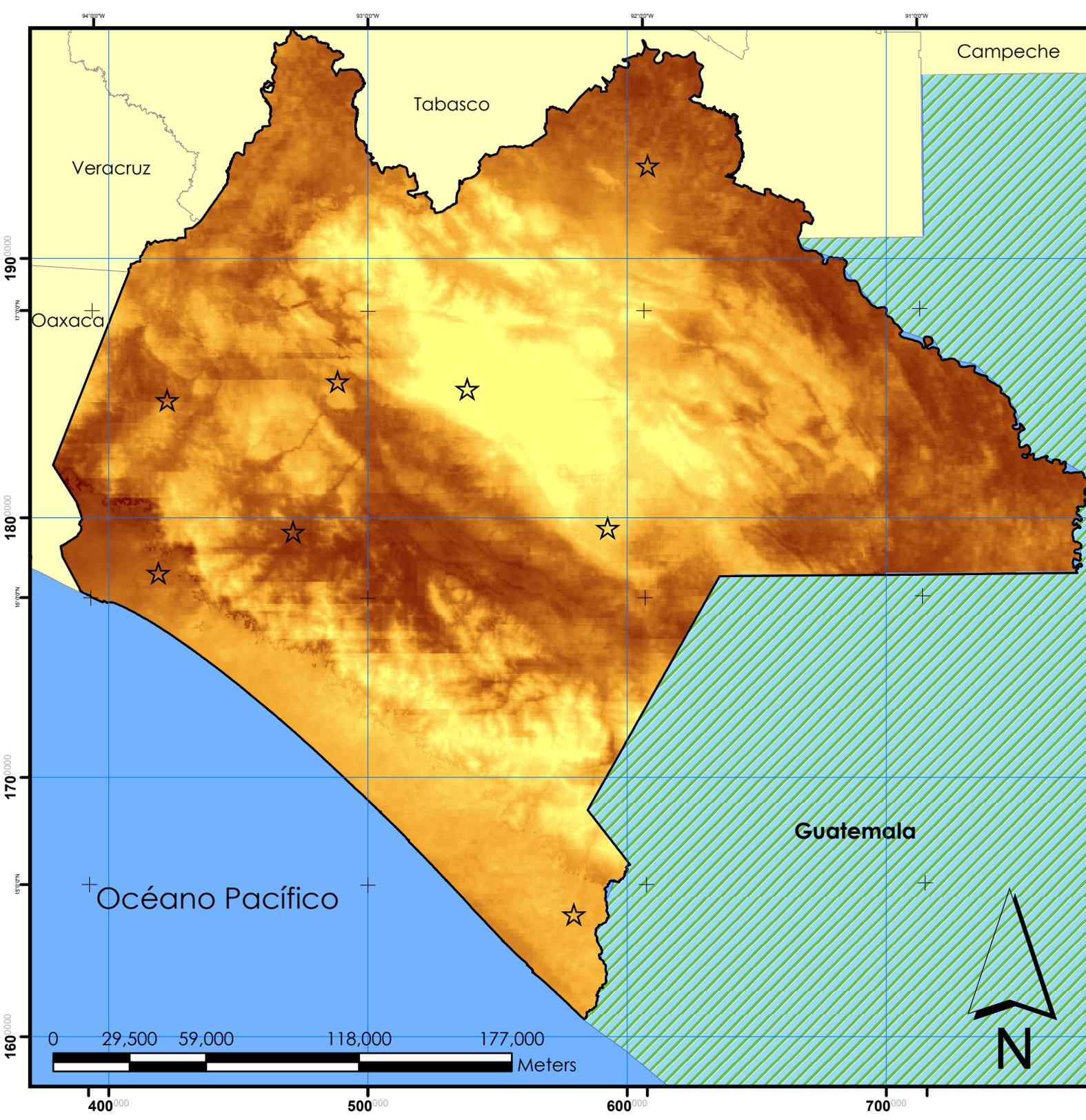
# Insolación global de julio para el estado de Chiapas

## SIMBOLOGÍA Julio (kWh/m<sup>2</sup>/día)

-  **Alta: 7.46**
-  **Baja: 0.00**
-  **C. importantes**
-  **Estados**
-  **Guatemala**

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



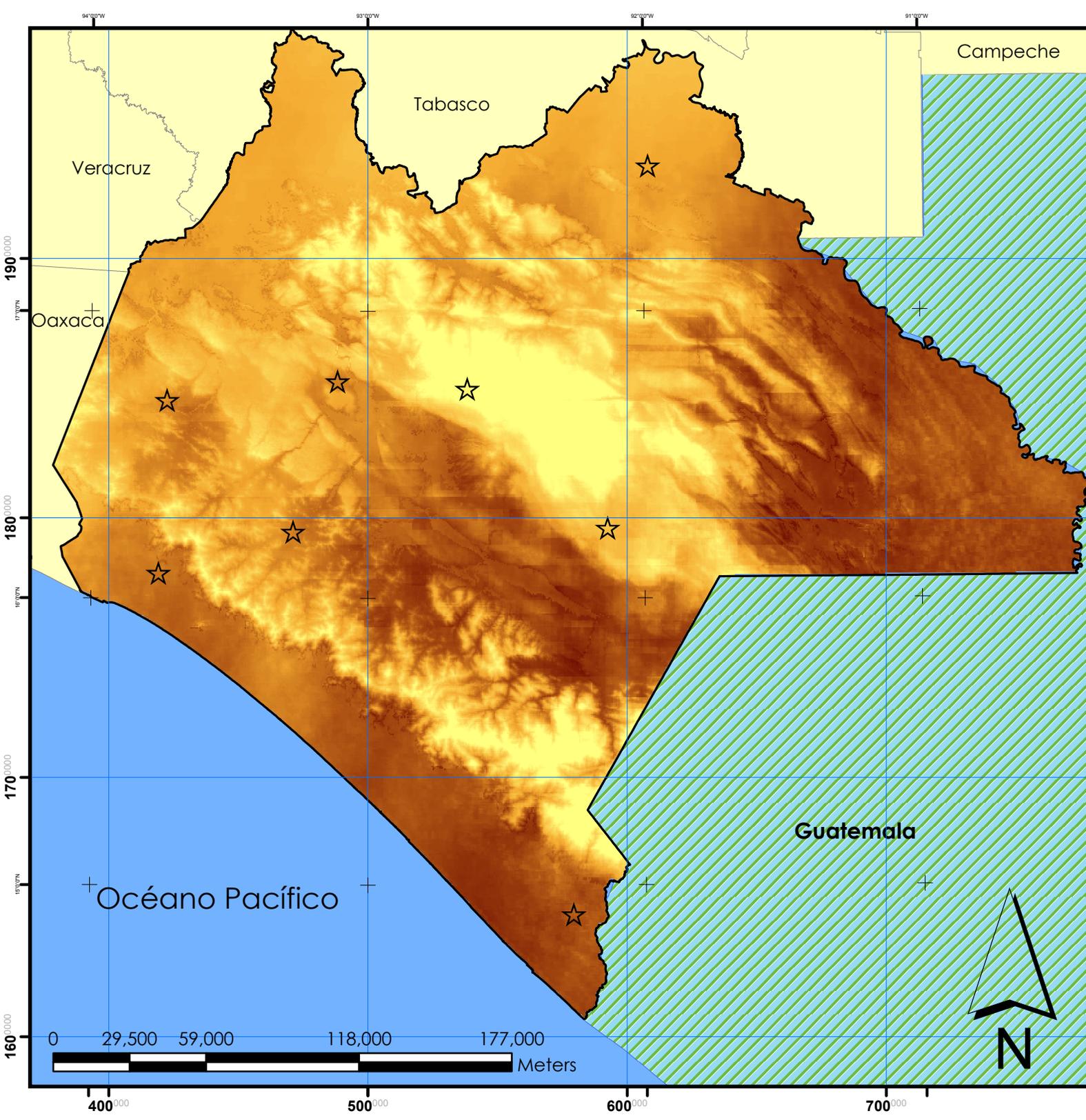


# Insolación global de agosto para el estado de Chiapas

## SIMBOLOGÍA Agosto (kWh/m<sup>2</sup>/día)

- Alta: 7.78
- Baja: 0.00
- C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



# Insolación global de septiembre para el estado de Chiapas

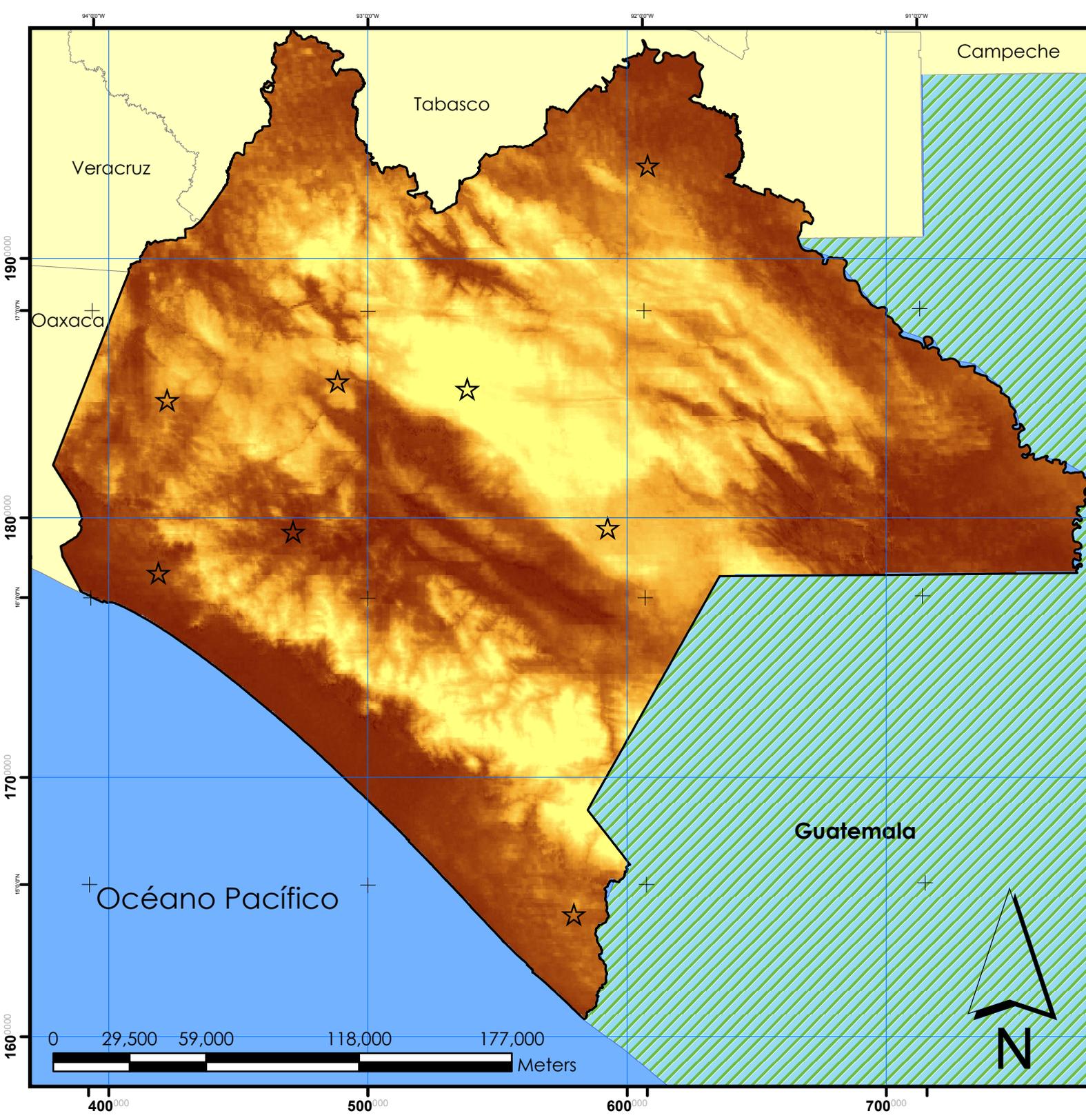
## SIMBOLOGÍA

Septiembre (kWh/m<sup>2</sup>/día)



- ☆ C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



# Insolación global de octubre para el estado de Chiapas

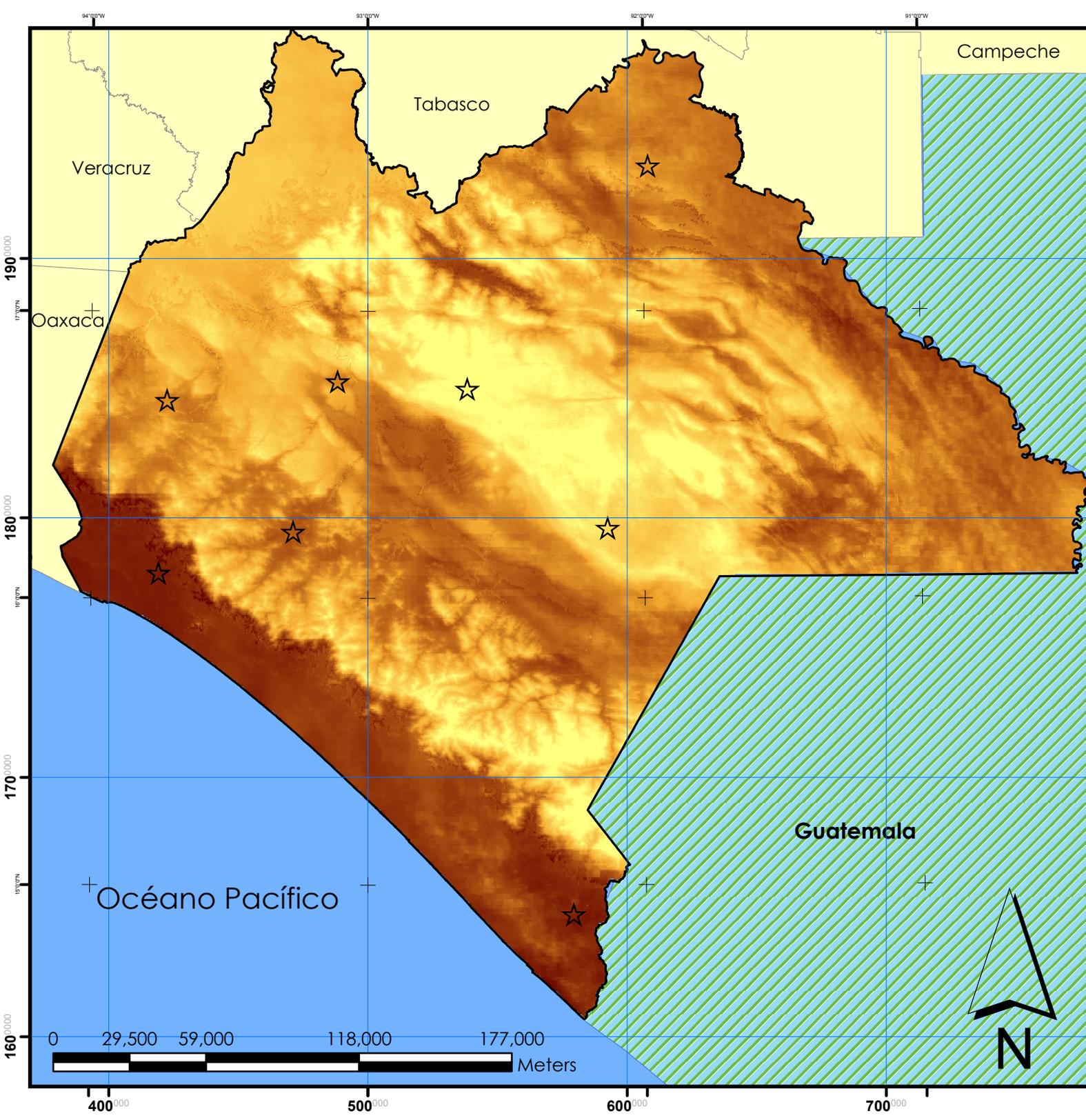
**SIMBOLOGÍA**  
 Octubre (kWh/m<sup>2</sup>/día)

Alta: 6.52

Baja: 0.11

- C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



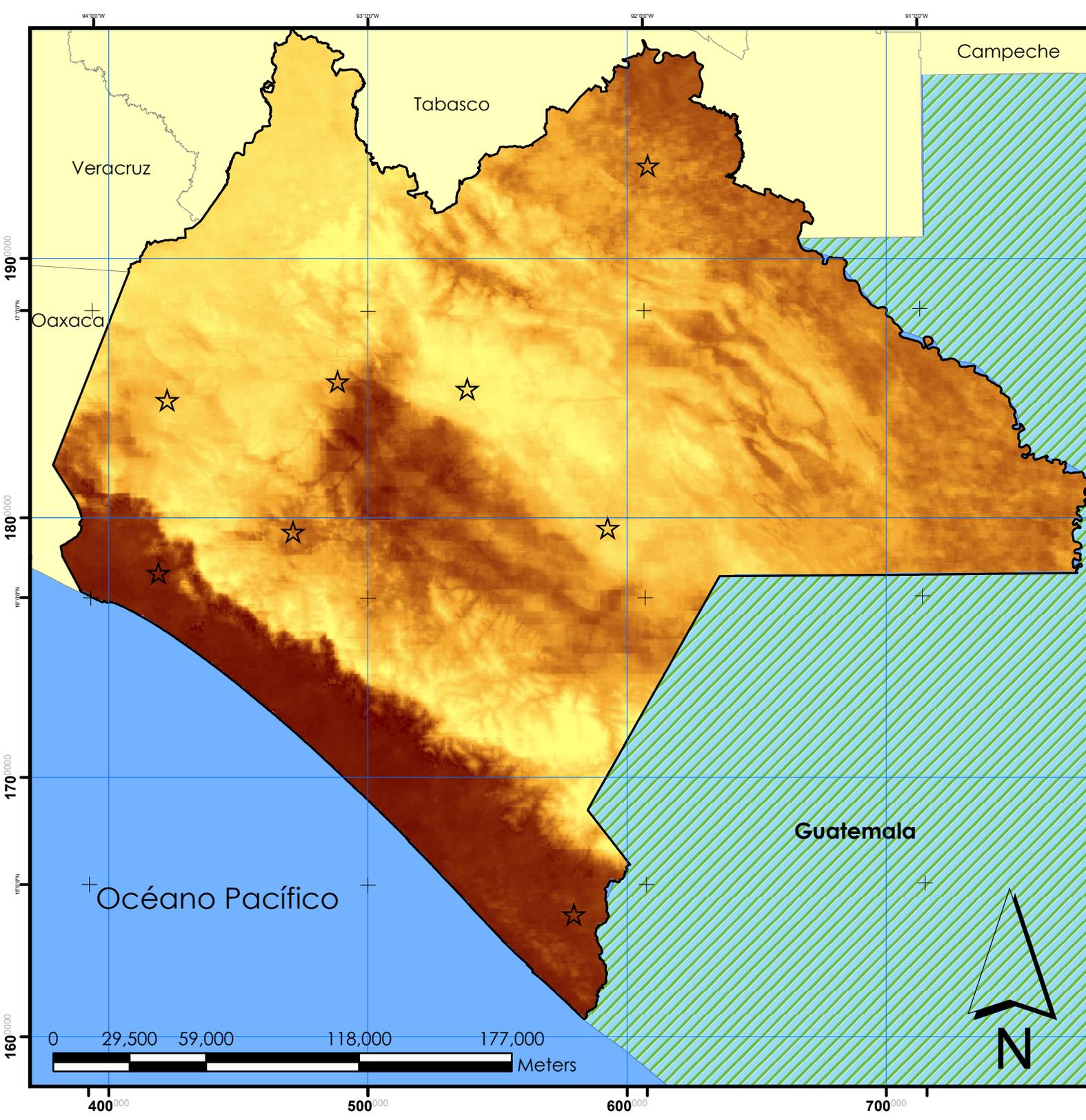
# Insolación global de noviembre para el estado de Chiapas

## SIMBOLOGÍA

Noviembre (kWh/m<sup>2</sup>/día)

- Alta: 8.03
- Baja: 0.17
- C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



# Insolación global de diciembre para el estado de Chiapas

**SIMBOLOGÍA**  
 Diciembre (kWh/m<sup>2</sup>/día)

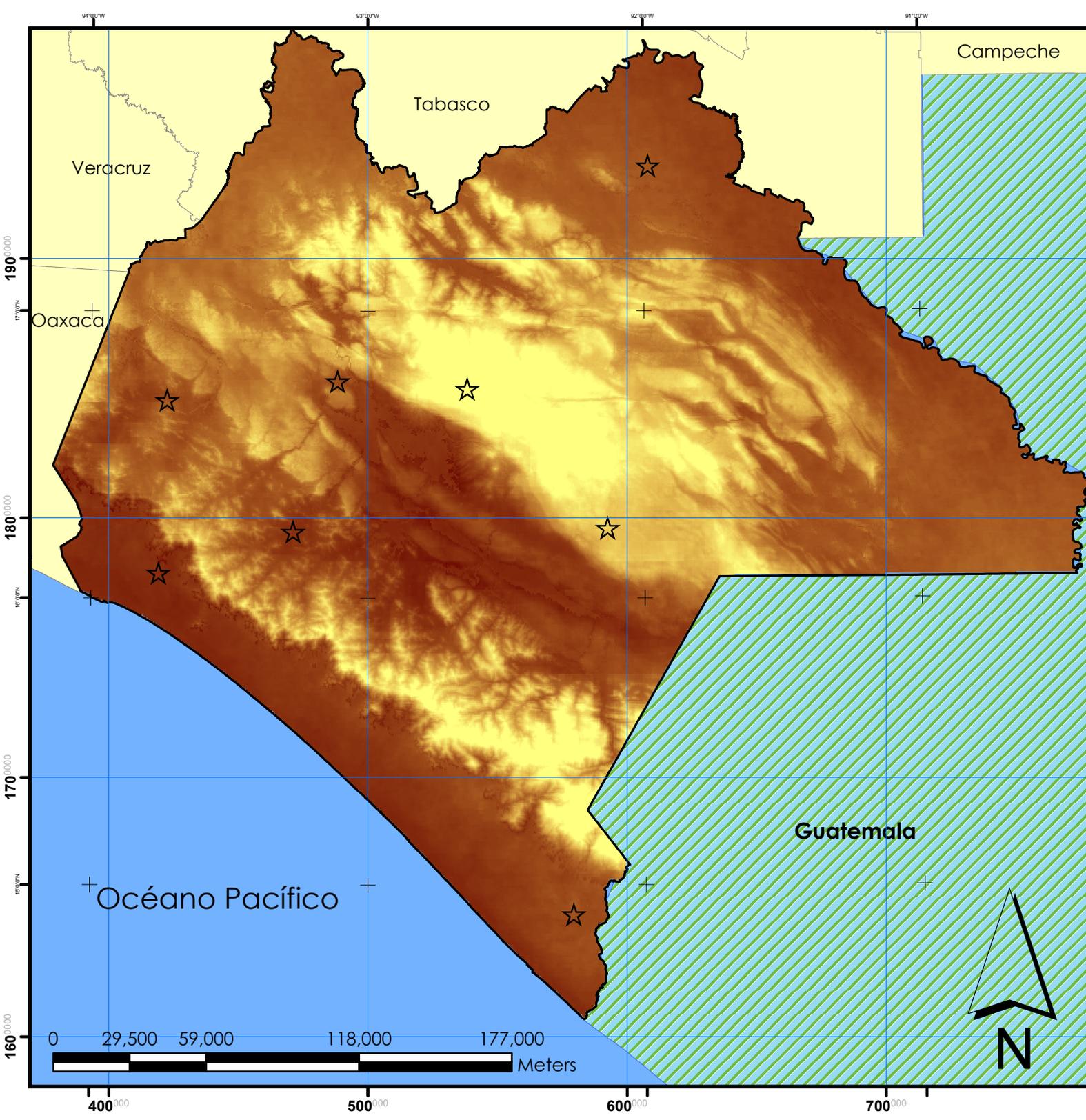
Alta: 5.53

Baja: 0.00

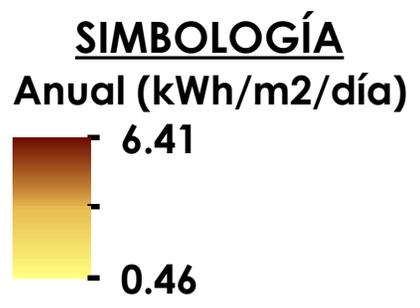
- C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.





# Insolación global anual para el estado de Chiapas



- ☆ C. importantes
- Estados
- Guatemala

FUENTE:  
 Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables  
 "Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite".  
 Insumos correspondientes al 2013.  
 Proyección UTM / Datum WGS 1984 .  
 Zona 15N.  
 Cuadrícula a cada 100,000 m.  
 Escala: 1:2,000,000.  
 Creado por: I. G. Julián Aceituno Medina y Dr. Ramón Solano Barajas.



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA ACADÉMICA  
COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
09 de junio de 2015  
Oficio No. DIP-262/2015

**C. Julián Aceituno Medina**  
**Candidato al Grado de Maestro**  
**en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**  
**Presente.**

En virtud de que se me ha hecho llegar por escrito la opinión favorable de la Comisión Revisora que analizó su trabajo de tesis denominado **“Evaluación del potencial solar para el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica en el estado de Chiapas a partir de imágenes de satélite.”** y que dicho trabajo cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión** del documento mencionado, para la defensa oral del mismo, en el examen que usted sustentará para obtener el Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables. Se le pide observar las características normativas que debe tener el documento impreso y entregar en esta Dirección un tanto empastado del mismo.

**Atentamente**

**“Por la Cultura de mi Raza”**

**Dra. María Adelina Schlie Guzmán**  
**Directora.**



**DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO**

C.c.p. Expediente