

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/317370829>

Evaluación del recurso solar del Valle de Juárez

Chapter · January 2017

CITATIONS

0

READS

180

2 authors, including:



Luis Cervera-Gomez

El Colegio de Chihuahua-Ciudad Juárez

84 PUBLICATIONS 60 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Sistema de Información Geográfica de la Violencia en el municipio de Juárez, Chihuahua: Geo-referenciación y su comportamiento espacial en el contexto urbano y rural (SIGVIDA). [View project](#)



Análisis para el reemplazo de la energía eléctrica con energías alternativas en sistemas de Irrigación en el Valle de Juárez [View project](#)



EL VALLE DE JUÁREZ:

**SU HISTORIA, ECONOMÍA Y AMBIENTE
PARA EL USO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

**ESMERALDA CERVANTES RENDÓN
COORDINADORA**

© El Colegio de Chihuahua
© Esmeralda Cervantes Rendón

El Colegio de Chihuahua
Calle Partido Díaz #4723
Colonia Progresista, C. P. 32310
Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Primera edición 2017
ISBN: 978-607-8214-43-3
Coordinación Editorial: E. Liliana Chaparro Vielma
Diseño editorial y portada: Marla Rascón
Corrección: Jorge Muñoz

Se autoriza cualquier reproducción total o parcial de esta obra, siempre y cuando sea sin fines de lucro o para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente sin alteración del contenido y dando los créditos autorales.

Proyecto realizado con financiamiento de la Secretaría de Educación Pública-Subsecretaría de Educación Superior-Dirección General de Educación Superior Universitaria. CONVENIO No.: 2016-08-005-065

ÍNDICE

Introducción	5
Desarrollo histórico del Valle de Juárez <i>Gabriela Montano Armendáriz y Esmeralda Cervantes Rendón</i>	9
Economía del Valle de Juárez <i>Cely Celene Ronquillo Chávez, Thania Castañeda Picasso y Gerardo Padilla</i>	21
Agua del Valle de Juárez: caso localidad de Praxedis <i>Alfredo Granados Olivas, Arturo Soto Ontiveros y Ana Cristina García Vásquez</i>	37
Evaluación del recurso solar del Valle de Juárez <i>Adrián Botello Mares, Luis E. Cervera Gómez y Rodolfo A. Tejeda Guevara</i>	81
Financiamiento al campo para proyectos de energía solar fotovoltaica <i>Cely Celene Ronquillo Chávez, Thania Castañeda Picasso y Gerardo Padilla</i>	107
Caso de estudio: Sistema fotovoltaico para el riego en la localidad de Praxedis <i>Rodolfo A. Tejeda Guevara, Esmeralda Cervantes Rendón y Ranulfo Lemus Sánchez</i>	115

EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR DEL VALLE DE JUÁREZ

*Adrián Botello Mares, Luis E. Cervera Gómez
y Rodolfo A. Tejeda Guevara*

INTRODUCCIÓN

El sol es la fuente de energía que mantiene vivo al planeta tierra. Emite continuamente una potencia de 62 mil 600 kilowatts (o kilovatios) por cada metro cuadrado de su superficie. Esto ha venido ocurriendo a lo largo de 4 mil 500 millones de años, y se estima que continuará así por otros 5 mil millones de años, lo cual, en términos de la existencia que ha tenido la humanidad, es prácticamente ilimitado. De hecho, en un periodo de tan solo dos días, el planeta recibe una cantidad de energía equivalente a todas las reservas probadas que existen de petróleo, gas y carbón. Esto equivale a cerca de 60 veces el consumo anual de la sociedad humana, lo cual nos da una idea del potencial impresionante que tiene la energía del sol para satisfacer las demandas energéticas del mundo (Bulnes, Best, & Lejos, 2010).

PRINCIPIOS DE LA RADIACIÓN SOLAR

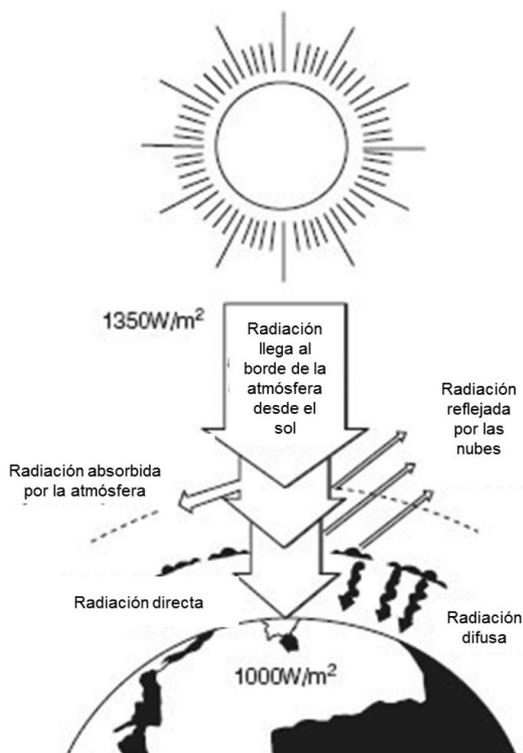
La luz del sol llega a la tierra como un tipo de energía llamada radiación que está compuesta por millones de partículas de alta energía llamadas fotones. Cada unidad de radiación solar, o fotón, lleva una cantidad fija de energía. Dependiendo de la cantidad de energía que lleva, la radiación solar cae en diferentes categorías incluyendo infrarrojos (es decir, calor), visible (radiación que podemos ver) y ultravioleta (radiación de muy alta energía). El espectro solar describe todos estos grupos de energía de radiación que llegan constantemente del sol y los clasifica según su longitud de onda (Hankins, 2010).

Las cantidades de radiación son expresadas generalmente en términos de exposición radiante o irradiancia, siendo esta última una medida del flujo de energía recibida por unidad de área en forma instantánea como energía/área-tiempo y cuya unidad es el watt por metro cuadrado (W/m^2), un watt es igual a un joule por segundo.

La exposición radiante es la medida de la radiación solar, en la cual la radiación es integrada en el tiempo como energía/área y cuya unidad es el kWh/m^2 por día (si es integrada en el día) o MJ/m^2 por día (Valero, 2010).

La energía solar llega al borde de la atmósfera de la tierra a una potencia constante de unos 1350 watts por metro cuadrado (W/m^2): esto se llama la “constante solar”. Sin embargo, no toda esta energía llega a la superficie de la tierra. La atmósfera absorbe y refleja gran parte de ella, y en el momento en que alcanza la superficie de la tierra, se reduce a un máximo de aproximadamente $1000 W/m^2$ (figuras 18 y 19).

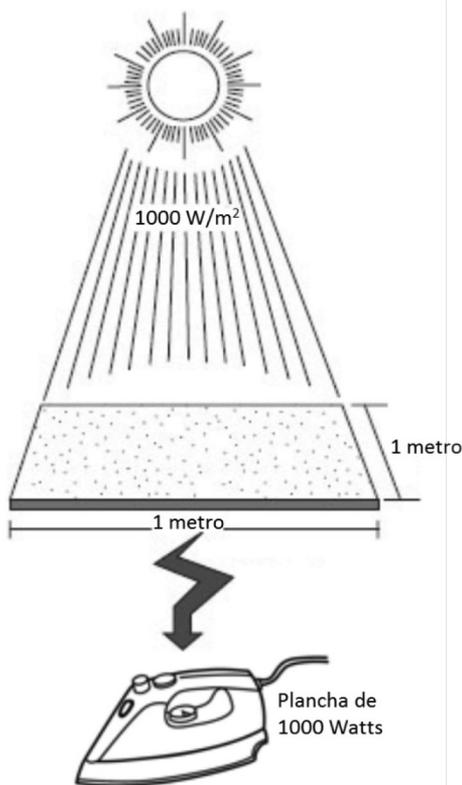
FIGURA 18. Absorción y reflexión de la radiación solar en la atmósfera.



FUENTE: Hankins (2010).

Esto significa que cuando el sol está directamente sobre la cabeza en un día soleado, la radiación solar está llegando a la tasa de alrededor de 1000 W/m^2 . Los países del norte tienen niveles de radiación solar anual más bajos que los países más cercanos al ecuador, principalmente porque tienen días más cortos en invierno.

FIGURA 19. Esquematización de la potencia de 1000 Watts/m²



FUENTE: Imagen adaptada de Hankins (2010).

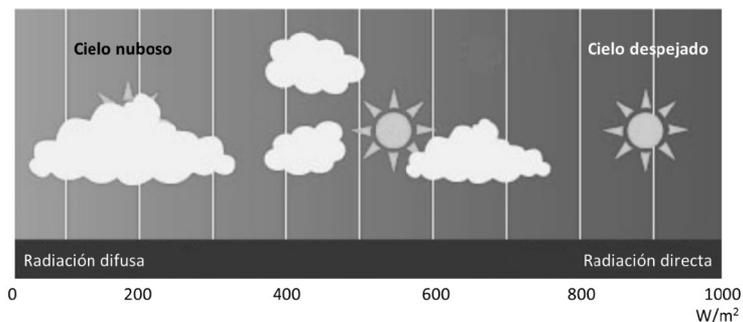
La radiación solar se puede dividir en dos tipos: directa y difusa. La radiación directa viene en una línea recta y se puede enfocar con una lente o un espejo. La radiación difusa es la radiación reflejada por la atmósfera o la radiación dispersa y reflejada por las nubes, el smog o el polvo (figura 20). Las nubes y el polvo absorben y dispersan la radiación, reduciendo la cantidad que llega al suelo.

En un día soleado, la mayoría de la radiación que llega al suelo es directa, pero en un día nublado hasta el 100 por ciento de la ra-

diación es difusa. Juntas, la radiación directa y la radiación difusa se conocen como radiación global.

La radiación en una superficie en tiempo nublado puede ser tan poca como una décima parte de la recibida en pleno sol. Por lo tanto, los sistemas solares deben ser diseñados para garantizar suficiente energía en periodos de niebla y meses con menores niveles de radiación solar. Al mismo tiempo, los usuarios del sistema deben ahorrar energía cuando están nublados. La radiación solar anual e incluso mensual es predecible. Los factores que afectan la cantidad de radiación solar que recibe un área incluyen la latitud del área, los periodos de nubosidad, la humedad y la claridad atmosférica. En las regiones solares de alta intensidad cerca del ecuador, la radiación solar es especialmente afectada por periodos de nubosidad. Los largos periodos de niebla reducen significativamente la cantidad de energía solar disponible. La alta humedad absorbe y por lo tanto reduce la radiación. La claridad atmosférica, reducida por el humo, el esmog y el polvo, también afecta la radiación solar entrante. La cantidad total de energía solar que un lugar recibe puede variar de una temporada a otra, pero es bastante constante de año en año.

FIGURA 20. Radiación directa y difusa.



FUENTE: Hankins (2010).

IRRADIANCIA SOLAR

La irradiancia solar se refiere a la radiación solar que incide realmente una superficie, o la energía recibida por unidad de área del sol. Esto se mide en watts por metro cuadrado (W/m^2) o kilowatts por metro cuadrado (kW/m^2). Si un módulo solar está frente al sol directamente, es decir, durante un día claro. En la mañana y la tarde se recibe menos energía porque la superficie plana no está en un ángulo óptimo al sol y por lo que la superficie recibirá una menor cantidad de energía; al mediodía, la cantidad de energía recibida es más alta y la cantidad real de energía recibida en un momento determinado varía con las nubes que pasan y la cantidad de polvo en la atmósfera.

INSOLACIÓN

La insolación (una forma breve de decir radiación solar incidente) es una medida de la energía solar. Un sitio que recibe seis horas pico de sol al día recoge la misma cantidad de energía que si el sol hubiera brillado durante seis horas a $1000 W/m^2$. En realidad, la irradiación cambia a lo largo del día. En un sitio de buena energía solar, la irradiancia está por encima de $1000 W/m^2$ durante aproximadamente tres horas, entre 800 y $1000 W/m^2$ dos horas, de 600 a $800 W/m^2$ en dos horas y $400-600 W/m^2$ durante dos horas y entre 200 y $400 W/m^2$ otras dos horas. Sin embargo, la energía es equivalente a seis horas de irradiancia a $1000 W/m^2$ (figura 19). Por ejemplo, durante abril se espera que en Ciudad Juárez reciba $6.9 kWh/m^2 / día$ y 6.3 horas pico de sol por día.

Las horas pico de sol son útiles porque simplifican los cálculos. Se usan comúnmente cuando se planifican sistemas y se emplean a lo largo de este libro como la medida estándar de planificación del sistema solar fotovoltaico. Tenga en cuenta que la cantidad total de energía disponible por día cambia considerablemente de mes a mes, incluso en los países ecuatoriales. En un día soleado, Ciudad Juárez, recibe más de seis horas de sol pico de insolación.

CAUSAS DE VARIACIÓN DE IRRADIACIÓN SOLAR EN LA TIERRA

La tierra en su desplazamiento por la órbita solar realiza dos movimientos principales: el de rotación sobre su propio eje y el de traslación alrededor del sol, que determinan la cantidad de luz y calor que llega a cada lugar de la superficie terrestre a lo largo del día y del año.

DISTANCIA TIERRA-SOL

La tierra gira alrededor del sol en una órbita elíptica, con el sol ubicado en uno de sus focos, la cantidad de radiación solar que llega a la tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al sol. Por lo cual un valor preciso de la distancia tierra-sol se denomina “Unidad astronómica”.

1 Unidad Astronómica (UA) = 1.496×10^8 km

Distancia mínima tierra-sol = 0.983 UA

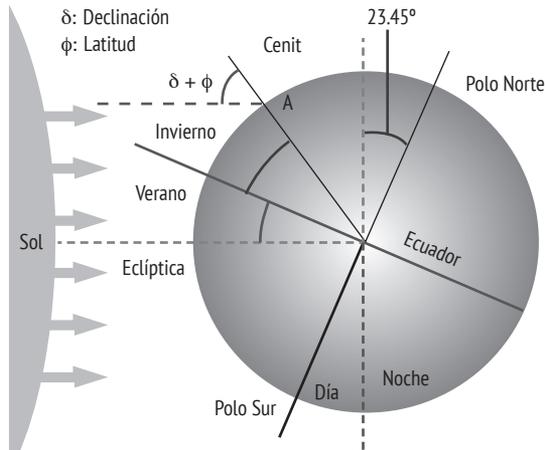
Distancia máxima tierra-sol = 1.017 UA

DECLINACIÓN SOLAR

El plano en el cual la tierra gira en torno al sol se denomina plano eclíptico. La tierra gira sobre sí misma alrededor de un eje denominado eje polar, el cual se encuentra inclinado aproximadamente 23.5° de la normal del plano denominado “plano eclíptico”. La rotación de la tierra alrededor de este eje ocasiona los cambios diurnos en la radiación solar que incide en el planeta tierra y la posición de este eje relativo al sol causa los cambios estacionales en la radiación solar. El ángulo entre el eje polar y la normal al plano elíptico permanece sin cambios. Aunque el ángulo que forma el plano ecuatorial y la línea que une los centros del sol y la tierra cambia cada día, de hecho, cambia en cada instante. La declinación es cero en los equinoccios de primavera y de otoño

(las noches y los días duran lo mismo). En el solsticio de verano tiene un ángulo de aproximadamente $+23.5^\circ$ y en el solsticio de invierno un ángulo de -23.5° (figura 21).

FIGURA 21. Declinación solar.

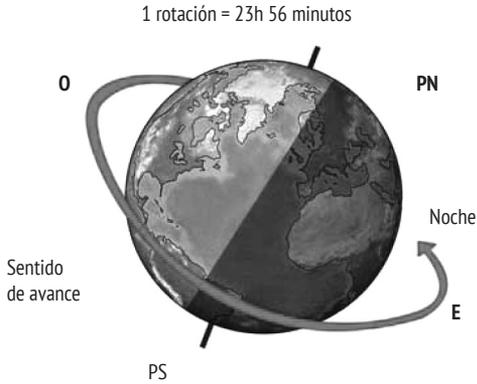


FUENTE: <https://goo.gl/images/XDLkKF>

MOVIMIENTO DE ROTACIÓN

Cada 24 horas la tierra da una vuelta completa alrededor de un eje imaginario que pasa por los polos. Gira en dirección oeste-este, en sentido contrario al de las agujas del reloj. A este movimiento le llamamos movimiento de rotación y es causante de la sucesión de días y noches, La mitad del globo terrestre quedará iluminado, en dicha mitad es de día, mientras que en el lado oscuro es de noche. En su movimiento de rotación, los distintos continentes pasan del día a la noche y de la noche al día.

FIGURA 22. Movimiento de rotación.

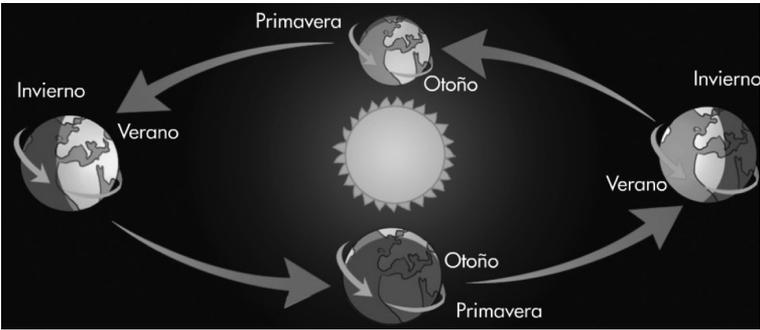


FUENTE: <https://goo.gl/images/U5aj0h>

MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN

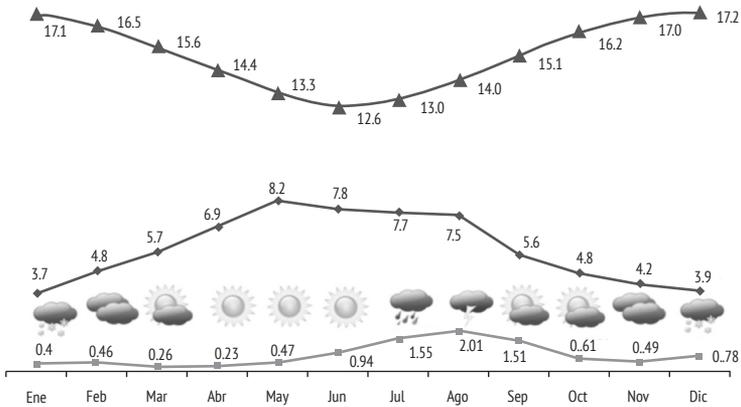
La traslación de la tierra es el movimiento de este planeta alrededor del sol. La tierra en su viaje alrededor del sol tarda en dar una vuelta completa 365 días y 6 horas, aproximadamente. Este denominado movimiento de traslación corresponde con el año solar. El hecho de que la órbita terrestre sea elíptica hace variar la distancia entre la tierra y el sol en el transcurso de un año. A primeros de enero la tierra alcanza su máxima proximidad al sol y se dice que pasa por el perihelio. A principios de julio llega a su máxima lejanía y está en afelio. La distancia tierra-sol en el perihelio es de 142 700 000 kilómetros y la distancia tierra-sol en el afelio es de 151 800 000 kilómetros.

FIGURA 23. Movimiento de traslación.



FUENTE: <https://goo.gl/images/faf4eK>

FIGURA 24. Irradiación global horizontal, precipitación y ángulo solar en Ciudad Juárez.



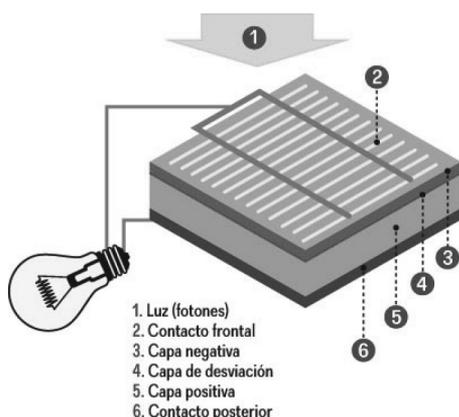
FUENTE: Elaboración propia.

La línea gris indica la precipitación mensual acumulada en pulgadas, la línea negra con rombos indica la irradiación global horizontal en kWh/m², la línea punteada muestra el ángulo solar, se presentan ideogramas de las condiciones meteorológicas durante el año.

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

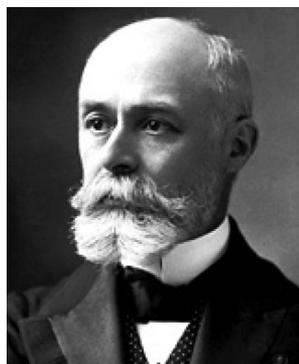
El efecto fotovoltaico consiste en que la luz puede generar una corriente eléctrica al iluminar ciertos materiales. Fue descubierto en 1839 por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel. A pesar de este temprano descubrimiento, fue hasta la década de los años cincuenta del siglo xx que se encontró un material que presentaba el efecto fotovoltaico de manera eficiente: el silicio.

FIGURA 25. Efecto fotovoltaico.



FUENTE: <https://goo.gl/images/txuGh8>

FIGURA 26. Fotografía de Alexandre-Edmond Becquerel.



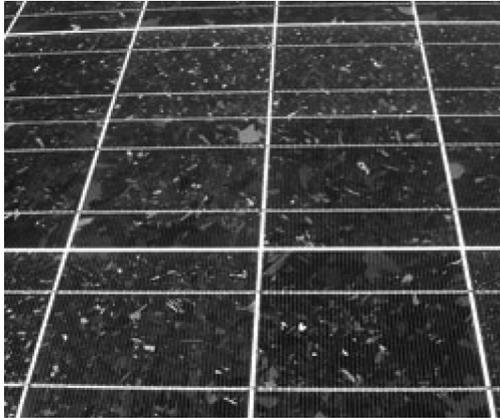
FUENTE: <https://goo.gl/images/FSLecZ>

Al principio, las celdas solares de silicio eran muy caras como para usarlas de manera comercial. Sin embargo, se les encontró una aplicación ideal en la que su precio no era un obstáculo: suministrar energía a los satélites. De esta manera, la carrera espacial entre Estados Unidos y la Unión Soviética en los años sesenta, dio un importante impulso al mejoramiento de las celdas solares, cuyas eficiencias llegaron más allá del 15 % en aquella época; a la fecha han alcanzado hasta el 39 %. Esto ha venido acompañado de importantes reducciones en sus costos.

El efecto fotovoltaico se basa en el uso de materiales semiconductores. Estos se caracterizan porque conducen la electricidad

dad mejor que un aislante y menos efectivamente que un metal, pero sobre todo porque mejoran su capacidad para conducir la electricidad al ser iluminados. Cuando incide luz sobre un semiconductor, la energía suministrada ayuda a darle mayor movilidad a algunos de los electrones presentes en el material, por lo que su capacidad para conducir la electricidad aumenta.

FIGURA 27. Panel fotovoltaico de silicio policristalino.



FUENTE: <https://goo.gl/images/MVXwxL>

Acercamiento frontal de un panel fotovoltaico de silicio policristalino. Se pueden observar las diferentes celdas del panel (veteadas en tonos de azul) y los contactos eléctricos frontales (líneas plateadas).

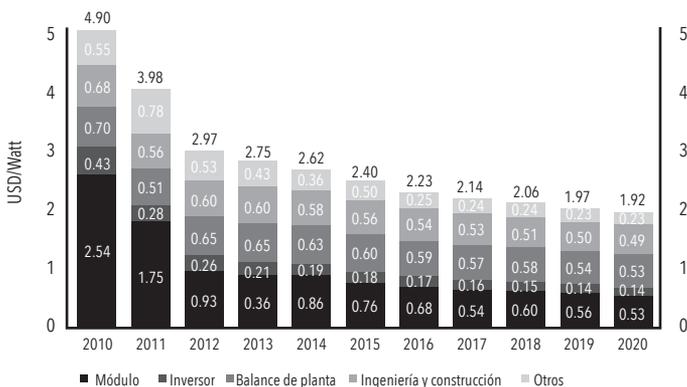
Sin embargo, para producir el efecto fotovoltaico no basta con liberar electrones. Es necesario que aparezca un voltaje que mueva a estos electrones en una dirección preferencial, generando una corriente eléctrica. La forma más común de lograr esto es unir dos materiales semiconductores de características electrónicas diferentes: uno de ellos debe ser capaz de ceder parte de sus electrones con facilidad (se le llama material tipo N), mientras que el otro debe aceptar fácilmente electrones adicionales (mate-

rial tipo P). El efecto fotovoltaico se produce precisamente al iluminar la superficie de unión entre los dos diferentes materiales.

Dado que la potencia que genera una celda solar es pequeña, lo que se hace es conectar varias entre sí para aumentar el voltaje o la corriente. Generalmente se fabrican para producir voltajes de 12 o 24 volts de corriente directa. A un conjunto de varias celdas conectadas entre sí se le llama panel o módulo fotovoltaico.

Usando módulos solares respaldados con baterías es posible dar energía a una gran variedad de aplicaciones aisladas, como telefonía rural, antenas de telecomunicaciones, boyas marítimas, televisión educativa rural, estaciones meteorológicas remotas, bombeo de agua rural, señalizaciones en carreteras y otras. En los primeros años de la tecnología fotovoltaica estas aplicaciones fueron las que más crecieron. Sin embargo, hoy las aplicaciones que más están creciendo son las de suministro de electricidad a casas o edificios de oficinas ubicados en ciudades. De hecho, la industria fotovoltaica es una de las de más rápida expansión alrededor del mundo, con tasas de crecimiento entre el 40 y 50 % anual en la última década; es decir, que su producción se está duplicando cada dos años.

FIGURA 28. Tendencia de costos de la tecnología fotovoltaica.



FUENTE: <https://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/books/181563/images/fig18.jpg>

La investigación en celdas fotovoltaicas es un área muy activa de la ciencia de materiales. Se investigan varios materiales distintos al silicio, y se busca reducir el costo de las celdas y mejorar su eficiencia.

MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR POR MEDIO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

En orden de localizar y dimensionar el potencial de las diversas fuentes de energías renovables, se requiere analizar su distribución en espacio y en tiempo y en escalas globales, regionales y locales. En este estudio nos enfocaremos solo a la energía solar, analizada en una escala regional y local para la localización de aquellos con mayor potencial para la instalación de energía fotovoltaica.

Las herramientas que proporcionan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son útiles en prácticamente todas las áreas del conocimiento, en la ciencia aplicada y en cualquier proyecto de investigación, por lo que resulta cada vez más imprescindible su uso, tomando en cuenta las fuentes y manejo adecuado de la información para la diversidad temática.

Los SIG son un instrumento que básicamente apoya a la definición de una realidad espacial que, por sí misma, requiere datos científicos de toda precisión, tanto empíricos como técnicos. En este trabajo, la aplicación se sugiere para la medición de la radiación solar.

Las funciones de análisis espacial en un SIG, para la medición de la radiación solar, dan un aporte a la obtención de resultados certeros para un espacio particular, sin embargo, no es determinante, ya que la precisión se limita a los datos de un modelo de elevación y, por lo tanto, resalta la necesidad de complementar estos análisis con otras herramientas que aporten otros datos y precisión en el tema, como la utilización de herramientas de percepción remota y *software* especializados de datos en el tema.

La radiación solar entrante, o insolación, es la principal fuente de energía del planeta, sostiene y da vida a la tierra, además

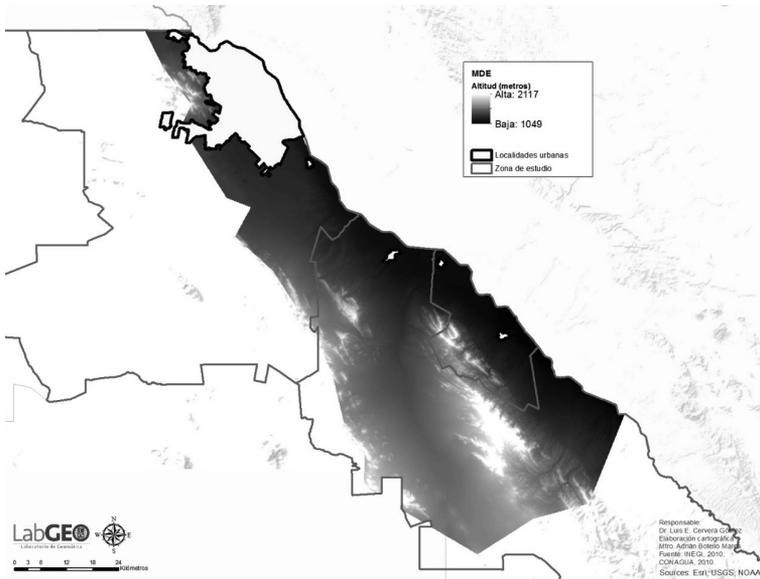
de alimentar de manera inagotable e ininterrumpida la operación atmosférica, es de alguna forma el motor del clima (Gómez-Azpeitia y Tejeda, 2015). Esta radiación puede ser aprovechada por diversas tecnologías que transforman la energía solar en energía eléctrica o térmica, por lo que una medición de la radiación solar por medio de los análisis en los SIG nos permitirá localizar con cierta precisión los lugares más aptos según sus niveles de insolación.

La radiación se modifica tanto por la atmósfera como por las entidades de superficie y topografía. La variación en la altura, pendiente, orientación y las sombras producidas por entidades topográficas influyen en la cantidad de insolación que se recibe en diferentes ubicaciones. Esta variabilidad también cambia según la hora del día y la época del año (Esri, 2016a).

Los rasgos de la topografía pueden ser estimados por operaciones sistematizadas en los SIG, por medio de los datos aportados en un Modelo Digital de Elevación (MDE). Los datos de altitud (z), es la variación de la altura, donde a partir de ella se definen las demás, tales como: el cálculo de la pendiente en la cadena de valores de los píxeles por inclinación; la orientación, al determinar la dirección cardinal de la pendiente descendente en un valor desde cada celda hacia sus vecinas; y, las sombras producidas, mediante un sombreado digital de acuerdo a la posición del sol y las elevaciones en ese momento solar.

El MDE trabajado en esta ponencia, es una extracción del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0) del Inegi (2013) para el área de estudio, en formato ráster de banda entrelazada por línea (BIL), con los datos de altitud en metros en una resolución de 15 metros (15 m x 15 m por píxel). A partir de ella se habrán de generar los cálculos para la radiación.

FIGURA 29. Modelo Digital de Elevación para el Valle de Juárez.



FUENTE: Elaboración propia con información del Inegi (2010).

Es importante anticipar que los cálculos topográficos excluyen a las áreas urbanas debido a las variaciones que presenta en torno a las construcciones, en el sentido del impacto tanto en la altitud como en la orientación y en las sombras de estos objetos.

Todas las operaciones topográficas pueden quedar resueltas de forma automatizada en un SIG, más propiamente con el objetivo de la medición de la radiación solar. Para ello, es necesario conocer los componentes de medición de la radiación solar entrante, la cual resulta de la suma de la Radiación Directa (RD), Difusa (RDf) y Reflejada (RR), denominada como Radiación Solar Total o Global (RST):

$$RST=RD+RDf+RR$$

En ese sentido, la radiación directa se intercepta sin dificultades en una línea directa desde el sol. La radiación difusa se dispersa por componentes atmosféricos, como nubes y polvo. La radiación reflejada se refleja desde entidades de superficie (Esri, 2016b).

En general, la radiación directa es el componente más importante de la radiación total, y la radiación difusa es el segundo. La radiación reflejada constituye solo una pequeña proporción de la radiación total, excepto para las ubicaciones rodeadas por superficies altamente reflexivas como la cobertura de nieve (Esri, 2016b).

Para este trabajo, se han utilizado las herramientas de un SIG específico para el análisis de radiación solar, ArcGis, esto mediante la extensión de análisis espacial del sistema, la cual permite analizar y localizar los efectos del sol sobre un área geográfica para periodos de tiempo específicos. El análisis explica los efectos atmosféricos, aunados a los topográficos antes mencionados, así como los cambios diarios y estacionales del ángulo solar.

Las herramientas de radiación solar de ArcGis no incluyen la radiación reflejada en el cálculo de la radiación total, por lo que la radiación total se calcula como la suma de la radiación directa y difusa.

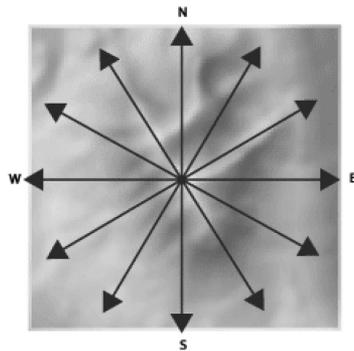
Para nuestro objetivo, se ha definido el cálculo para un área geográfica completa, el Valle de Juárez, y no información puntual interpolada. Esto implica tres pasos, de acuerdo a información del portal de Esri (2016b):

1. El cálculo de una cuenca visual hemisférica que mira hacia arriba basada en la topografía

Para calcular una cuenca visual se realiza una búsqueda en un número específico de direcciones alrededor de una ubicación de interés y se determina el ángulo máximo de obstrucción en el cielo o el ángulo del horizonte. Para todas las otras direcciones sin búsqueda, se interpolan los ángulos del horizonte.

La siguiente figura muestra el cálculo de la cuenca visual para una celda de un MDE. Los ángulos del horizonte se calculan a lo largo de un número específico de direcciones y se utilizan para crear una representación hemisférica del cielo.

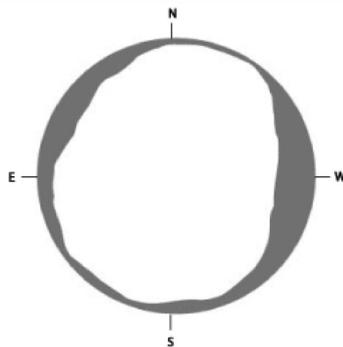
FIGURA 30. Cálculo de la cuenca visual para una celda de un MDE.



FUENTE: ESRI, 2016b..

La cuenca visual resultante caracteriza si las direcciones del cielo están visibles (aparecen en color blanco) u obstruidas (aparecen en color gris).

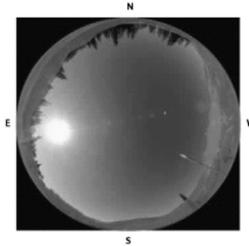
FIGURA 31. Cuenca visual.



FUENTE: ESRI, 2016b..

La cuenca visual aparece superpuesta en una fotografía hemisférica para demostrar la teoría.

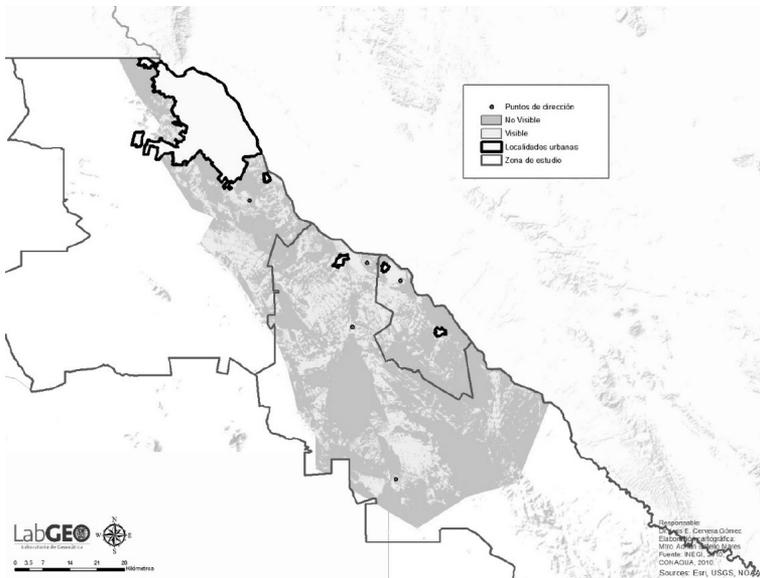
FIGURA 32. Cuenca visual superpuesta en una fotografía hemisférica.



FUENTE: ESRI, 2016b..

El resultado de la cuenca visual en el Valle de Juárez, de acuerdo a las direcciones alrededor de 5 puntos del área geográfica, es el siguiente:

FIGURA 33. Cuenca visual para el Valle de Juárez.



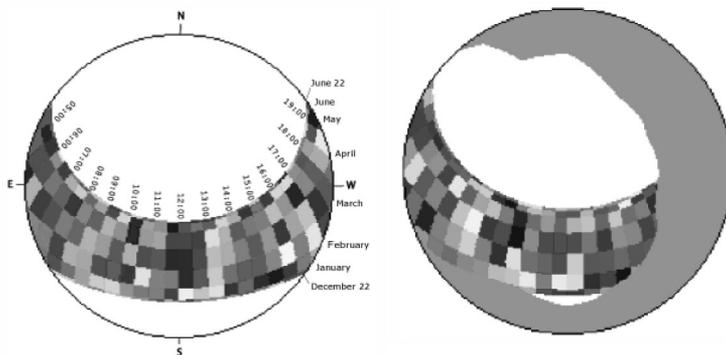
FUENTE: Elaboración propia con información del Inegi (2010) y Conagua (2010).

2. La superposición de la cuenca visual en un mapa solar directo para calcular la radiación directa

La radiación solar directa que se origina desde cada dirección del cielo se calcula utilizando un mapa solar en la misma proyección hemisférica que la cuenca visual. El mapa solar comprende sectores discretos que se definen según la posición del sol en intervalos determinados durante el día (horas) y el periodo del año (días o meses). El recorrido del sol se calcula según la latitud del área de estudio y la configuración del tiempo definida mediante los sectores del mapa solar. La radiación solar que se origina desde cada sector se calcula de forma separada, y la cuenca visual se superpone en el mapa solar para el cálculo de la radiación directa.

En las siguientes imágenes se aprecia el mapa solar y el mapa solar superpuesto con la cuenca visual:

FIGURA 34. Mapa solar y mapa solar superpuesto con la cuenca visual.



FUENTE: ESRI, 2016b..

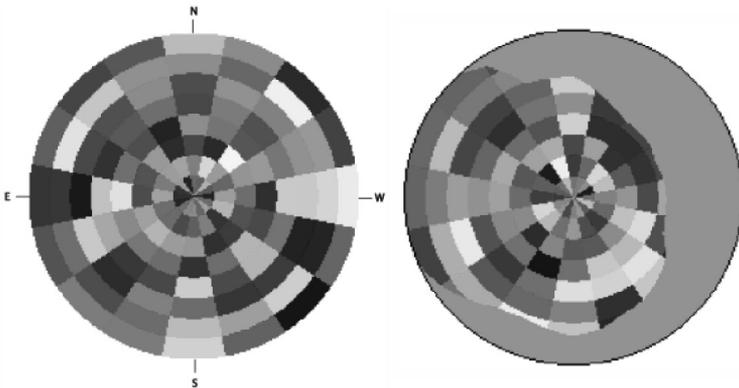
3. La superposición de la cuenca visual en un mapa celeste difuso para calcular la radiación difusa

Para calcular la radiación difusa de una ubicación en particular, se crea un mapa celeste para representar una vista hemisférica de todo el cielo dividida entre una serie de sectores del cielo

que se define mediante los ángulos de cénit y acimutales. A cada sector se le asigna un único valor de identificación, junto con ángulos de cénit centroide y acimutales. La radiación difusa se calcula para cada sector del cielo con base en la dirección.

En las siguientes figuras se aprecia, en primer lugar un mapa celeste, en el cual cada color representa un único sector del cielo, o porción del cielo, desde donde se origina la radiación difusa; y en segundo lugar, la sobreposición del mapa celeste con la cuenca visual:

FIGURA 35. Mapa celeste y sobreposición del mapa celeste con la cuenca visual.



FUENTE: ESRI, 2016b..

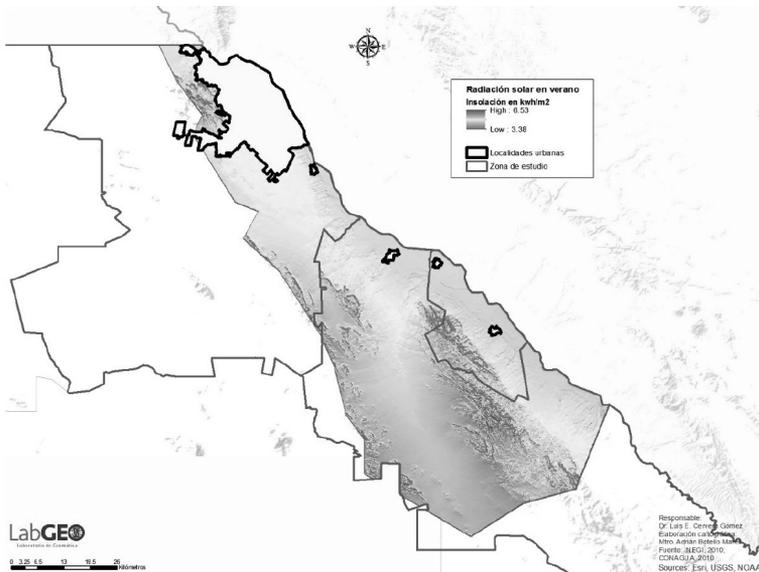
Los parámetros utilizados para la medición de radiación solar para un área geográfica, en esta aplicación para el Valle de Juárez, fueron los siguientes:

- Los valores del MDE relativo al área del acuífero, para los cálculos topográficos
- Para el cálculo de declinación y posición solar de la zona se ha asignado una latitud media en los 31 grados norte, para el periodo de los días de verano

- Se ha definido un modelo de difusión uniforme, en la cual la radiación difusa entrante es la misma desde todas las direcciones del cielo
- La proporción de flujo de radiación difusa se ha establecido por días con condiciones de cielo generalmente claras (30 % de días nublados)

Estos parámetros aplicados por la herramienta del sistema, dan como resultado el siguiente mapa de insolación global (en KWh/m²) para la región del Valle de Juárez:

FIGURA 36. Mapa de insolación global (KWh/m²) para el Valle de Juárez.



FUENTE: Elaboración propia con información del Inegi (2010) y Conagua (2010).

Las mayores cantidades de radiación durante los días de verano, en color rojo y amarillo fuerte (insolación alta), se interpretan como áreas de alto potencial de aprovechamiento para la recepción de energía solar por medio de las tecnologías de transformación. Estas áreas se localizan espacialmente en planicies al

sur y suroriente del área urbana de Ciudad Juárez, en el sur del municipio de Praxedis G. Guerrero en los linderos con el municipio de Guadalupe, así como en las inmediaciones a las sierras El Presidio, La Amargosa y Guadalupe, principalmente en las planicies que se encuentran rodeadas por ellas en el oeste y sur del municipio de Guadalupe.

La mayor parte del territorio medido se cubre por una insolación media, en color cian y amarillo claro, muy visible en prácticamente toda la zona agrícola contigua al río Bravo, con mayor notoriedad en el área circundante a las cabeceras municipales de Guadalupe y Praxedis G. Guerrero. Estas zonas pueden ser factibles para transformación de la energía solar a eléctrica o térmica, realizando análisis de mayor precisión, como antes se menciona.

Finalmente, la insolación baja, en color azul, son las áreas donde no se tiene la aptitud deseada para la captación de energía solar. Aunque la medición puede ser relativa, al tratarse de un área predominantemente apta, los niveles exactos calculados no alcanzan esas proporciones de aptitud. Estas áreas se encuentran primordialmente al este de las principales elevaciones de la región, es decir, donde las sombras del atardecer caen hacia ese lado y no se permite una radiación directa tan duradera.

CONCLUSIONES

La energía solar que incide en superficie tiene una distribución espacial en función de las características del terreno, tales como elevación, relieve, pendientes, sombras y el aspecto, como se ha visto. Sin embargo, se acostumbra utilizar solo datos puntuales obtenidos de redes solarimétricas con pobre cobertura, mediante interpolación de datos, y normalmente a escala nacional. Lo valioso de este estudio es la incorporación de dicha variabilidad espacial en un área completa de estudio, así como temporal de la radiación, mediante la inclusión de variables de cálculo rápido y eficiente.

Se destaca la utilidad y robustez de los resultados obtenidos con la implementación de las metodologías provistas en el Sistema de Información Geográfica, en cálculo de radiación solar. Dado que los resultados obtenidos para la región de estudio son espacialmente congruentes y afines a las mediciones realizadas en campo, sobresaliendo con promedios de alta y media aptitud en todo el Valle. Como queda de evidencia, los métodos en SIG se convierten en una herramienta poderosa para realizar estimaciones de radiación para la geolocalización de los mejores sitios para generar energía fotovoltaica.

Cabe aclarar que esta evaluación define un rasgo de la aptitud específica, la física-natural, sin embargo, es importante mencionar a esta como una incidencia primordial, mas no absoluta, debido a la necesidad de contemplar otros factores para determinar una aptitud deseable en su totalidad, como las condiciones sociales, económicas, jurídicas o políticas para su definición. Por lo tanto, este esquema de evaluación sienta un aporte para esta amplia definición, efectivamente, primordial.

En resumen, una evaluación de esta magnitud proporciona elementos fundamentales para tomas de decisiones futuras, sabiendo la relevancia de ellas y reconociendo su interacción con otros elementos, que en conjunto definen las mejores opciones para una inversión en energías fotovoltaicas en la zona.

BIBLIOGRAFÍA

- Alemany, Laura y Castell, Edurne (2013). "SIG y Visor Web de energía solar y eólica. Aplicación práctica en el País Vasco". Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Bulnes, C. A., Best, R., & Lejos, B. (2010). Energía del sol. *Revista Ciencia*, 61(abril-junio), 10-17. Recuperado de: http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaSol.pdf
- Conagua. (2010). "Actualización Geohidrológica del Acuífero Valle de Juárez, Chihuahua", México.

- Ecotecnia. (2016). "Radiación solar". Página electrónica: <http://econotecnia.com/radiacion-solar.html>. Consultada en octubre de 2016.
- Esri. (2016a). "Comprender el análisis de radiación solar". Página electrónica: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-solar-radiation-analysis.htm>. Consultada en octubre de 2016.
- Esri. (2016b). "Modelar la radiación solar". Página electrónica: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm>. Consultada en octubre de 2016.
- Gómez-Azpeitia, Gabriel y Adalberto Tejeda. (2015). *Prontuario Solar de México*, Universidad de Colima-Universidad Veracruzana, México.
- Hammera A. *et al.* (2003). "Solar energy assessment using remote sensing technologies". *Remote Sensing of Environment* 86 : 423-432.
- Hankins, M. (2010). *Stand-alone Solar Electric Systems, The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation.* (F. Jackson, Ed.) (1st ed.). New York. Recuperado de: <https://play.google.com/books/reader?printsec=frontcover&output=reader&id=YO8GIazAVhIC&pg=GBS.PR2.w.0.0.0.1>
- HelioGis. (2016). "Radiación solar y SIG". Página electrónica: <http://www.heliogis.com/cms/teoria/radiacion-solar-y-sig>. Consultada en octubre de 2016.
- INEGI. (2010). "Marco Geostadístico Nacional". Datos vectoriales. Aguascalientes, 2010.
- INEGI. (2013). "Continuo de Elevaciones Mexicanas 3.0". Imágenes ráster. Aguascalientes.
- Posso, Fausto *et al.* (2013). "Estimación del potencial de energía solar en Venezuela utilizando sistemas de información geográfica". Venezuela.

- Ramachandra T. V. (2007) "Solar energy potential assessment using GIS". *Energy Education Science and Technology* 18(2): 101-114.
- Súri M., y J. Hofierka (2004). "A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments". *Transactions in GIS* 8(2): 175-190.
- Valero Muñoz, A. (2010). *Principios de color y holopintura*. (E. C. Universitario, Ed.) (1st ed.). Alicante. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=CXqrBAAA-QBAJ&pg=PA62&dq=Las+cantidades+de+radiación+son+expresadas+generalmente+en+términos+de+exposición+radiante+o+irradiancia&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwix06eCjLfsAhWo3YMKHZXiBM4Q6AEIGzAA#v=onepage&q=Las%252>
- Wang, S. y Koch (2010). "Determining profits for solar energy with remote sensing data". *Energy* 35:2934-2938.